



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Estudo experimental do processo de secagem num secador solar fotovoltaico

Tiago Santos Grilo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Luís Carlos Carvalho Pires
Co-orientador: Prof. Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva

Covilhã, outubro de 2016

Agradecimentos

Ao longo de todo o período de elaboração da presente dissertação, a transposição das barreiras e obstáculos que foram ultrapassados apenas foi possível com o auxílio de diversas pessoas que me apoiaram e incentivaram. Pessoas estas, a quem me cabe agora agradecer.

Aos meus pais e irmão, um muito obrigado por todo o apoio prestado no período da dissertação, mas principalmente ao longo de todo o percurso académico que apenas foi possível concluir com a ajuda da minha família.

Ao Professor Doutor Luís Carlos Carvalho Pires gostaria de reiterar os meus agradecimentos por todo o auxílio científico que me prestou como orientador, pela colaboração e pela disponibilidade e prontidão.

À parte da família e professores, um enorme obrigado à Carina Antunes, ao Anthony Calado, Christopher Delgado, Diogo Carrilho, Fábio Fernandes, João Almeida, João Sena, Maurício Rafael, Miguel Duarte, Rui Miranda, Samuel Almeida e ao Tobias Abrantes pela colaboração e auxílio prestado em todas as fases, pela confiança e instruções.

Ao Daniel Parente pelo apoio, ajuda, companheirismo tanto dentro do laboratório como fora, que me auxiliou nos instantes mais críticos e ao qual recai também a devida quota-parte do mérito deste projeto.

Cabe-me ainda retribuir ao Sr. João Correia e aos restantes funcionários da Universidade da Beira Interior, por toda a colaboração e auxílio prestado durante estes últimos meses, dando-lhes uma palavra de grande estima e consideração.

Por último, aos demais amigos e colegas, pelo inestimável apoio, diálogo e incentivo incondicional que me transmitiram durante todo o tempo em que este trabalho se desenvolveu.

A todos sinceramente, muito obrigado.

Resumo

O presente trabalho experimental apresenta conteúdos de cunho maioritariamente explicativo e de forma coesa através de um entrelaçamento lógico de ideias. Esta dissertação incide precisamente sobre o desenvolvimento e construção de um protótipo e o estudo de estratégias distintas para a optimização da secagem de alimentos a partir da energia solar. A principal variável em estudo é o rendimento do secador solar e consequentemente a qualidade do produto final. Com o intuito de otimizar o sistema e aumentar a velocidade de secagem optou-se por acoplar um painel fotovoltaico que irá alimentar uma carga resistiva, obtendo assim uma temperatura do ar mais elevada que entrará na câmara de secagem.

Primeiramente, apresentam-se algumas considerações acerca da panóplia de aplicações e métodos de aproveitamento da energia solar, realçando o quão importante é conservar produtos agroalimentares através da sua secagem. Para elucidar este conceito começa-se por rever alguns modelos existentes de secadores solares desenvolvidos em diversos países, realçando os mais eficientes e representativos de cada categoria, de forma a entender o trabalho já concebido nesta área. Para cada modelo diferente é caracterizado o dimensionamento, conceção e a sua respectiva construção. Igualmente, foi recolhida informação relativa à sua constituição, energia total produzida e registadas algumas anomalias presentes no seu funcionamento.

Todos os resultados experimentais apresentados foram obtidos em ensaios durante o verão de 2016 cujos resultados demonstram as vantagens e desvantagens de cada estratégia adotada. Para cada um dos ensaios foi registada a temperatura ambiente, a respectiva temperatura no interior da câmara de secagem, os valores da radiação solar, a tensão da bateria, do painel e a potência na carga. Por fim, foram calculados e discutidos parâmetros de desempenho, o que possibilitou retirar uma panóplia de conclusões referentes ao *modus operandi* e dimensionamento deste género de unidades. Com a finalidade de beneficiar o máximo da energia gerada, e assim diminuir o desperdício, foram apontadas certas medidas que fomentam a utilização correta de painéis solares na secagem de produtos agrícolas. Todo o trabalho desenvolvido é com o fim de vir a ser adotado por diferentes produtores agrícolas.

Palavras-chave

Energia solar, células fotovoltaicas, secador solar, métodos de secagem, setor agrícola.

Abstract

This experimental work presents content of mostly explanatory nature and cohesively through a network of logical ideas. This dissertation focuses specifically on the development and construction of a prototype and the study of different strategies for the optimization of food drying from solar energy. The main study variable is the efficiency of the solar dryer, and therefore the quality of the final product. In order to optimize the system and increase the drying rate it was decided to couple a photovoltaic panel which will power a resistive load - thus obtaining higher air temperature which enters the drying chamber.

First, are shown some considerations about the range of applications and methods of harnessing solar energy, emphasizing how important it is to conserve food products through solar drying. To elucidate this concept existing models of solar dryers are reviewed. Models developed in different countries, highlighting the most efficient and representative of each category, in order to understand the work already developed in this area. For each different model is characterized their dimensioning, designing and their respective construction. It was also collected information relative to its constitution, the total energy produced and detected anomalies.

All experimental results were obtained in drying trials during the summer of 2016. These results demonstrate the advantages and disadvantages of each strategy adopted. For each test it was recorded the ambient temperature, its temperature inside the drying chamber, the values of solar radiation, the battery voltage and the power of the panel and the load. Finally, calculations were made and performance parameters discussed, allowing to take conclusions about the *modus operandi* and design of this type of units. In order to benefit the most of the energy generated, and thus reduce waste, certain measures have been identified that promote the correct use of solar panels for drying agricultural products. All of this work is for the purpose of being adopted by different farmers.

Keywords

Solar energy, solar cells, solar dryer, drying methods, agriculture.

Índice

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract.....	iv
Índice	v
Lista de figuras	viii
Lista de tabelas	xiii
Lista de acrónimos.....	xiv
Capítulo 1	1
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	2
1.2 Revisão bibliográfica	3
1.3 Motivação e objetivos.....	6
1.4 Descrição sumária	7
Capítulo 2	8
2 Energia solar	8
2.1 Propriedades da luz	8
2.1.1 Radiação de um corpo negro	9
2.2 Radiação solar.....	11
2.3 Energia solar na Terra	13
2.3.1 Declinação solar	18

2.3.2	Ângulo de declinação	20
2.3.3	Ângulo de incidência da radiação solar	21
2.3.4	Ângulo azimute	24
2.3.5	Ângulo ótimo	24
2.4	Tecnologia dos equipamentos fotovoltaicos	27
2.4.1	Tipos de células solares	32
2.4.1.1	Células de silício monocristalino.....	33
2.4.1.2	Células de silício policristalino.....	34
2.4.1.3	Células de silício amorfo	35
2.4.1.4	Células de tripla junção	36
2.4.2	Curvas características das células fotovoltaicas	38
2.4.3	Módulos fotovoltaicos.....	42
2.4.3.1	Associação de módulos FV em série.....	43
2.4.3.2	Associação de módulos FV em paralelo.....	44
2.4.3.3	Díodos de desvio e díodos de fileira	45
Capítulo 3	.....	47
3	Secagem solar de alimentos.....	47
3.1	Métodos de secagem	47
3.2	Classificação dos secadores solares	48
3.3	Nota conclusiva	49
Capítulo 4	.....	51
4	Projeto e conceção do secador solar	51

4.1	Componentes do sistema fotovoltaico empregue.....	52
4.1.1	Painel fotovoltaico	52
4.1.2	Bateria.....	57
4.1.3	Regulador de carga.....	64
4.1.4	Inversor.....	70
4.2	Protótipo	72
Capítulo 5	.....	80
5	Ensaio experimental	80
5.1	Descrição da instalação.....	80
5.2	Ensaio realizados	83
5.3	Análise de resultados	90
Capítulo 6	.....	93
6	Conclusão	93
6.1	Trabalhos futuros	96
Referências	.....	97

Lista de figuras

Figura 1.1 - Efeito da temperatura no crescimento de micro-organismos (adaptado de [2]).	3
Figura 2.1 - Espectro da radiação de um corpo negro para diferentes temperaturas [20].	10
Figura 2.2 - Comprimentos de onda da radiação solar na Terra (adaptado de [26]).	12
Figura 2.3 - Espectro da radiação solar na Terra (adaptado de [43]).	12
Figura 2.4 - Distância do Sol à Terra [20].	13
Figura 2.5 - Radiação incidente na atmosfera terrestre [20].	14
Figura 2.6 - Estimação da radiação solar (adaptado de [26]).	15
Figura 2.7 - Perfil anual da radiação solar na Europa (adaptado de [26]).	15
Figura 2.8 - Radiação incidente na Terra (adaptado de [20]).	16
Figura 2.9 - Radiação solar com os efeitos da atmosfera e os respectivos agentes [20].	17
Figura 2.10 - Mapa da radiação solar global anual na Terra, em kWh/m ² (adaptado de [25]).	18
Figura 2.11 - Posicionamento solar nos equinócios e nos solstícios (adaptado de [20]).	19
Figura 2.12 - Trajetória do Sol na latitude φ , em dia de equinócio [20].	20
Figura 2.13 - Variação do ângulo de declinação ao longo do ano (adaptado de [27]).	21
Figura 2.14 - Ângulos característicos da radiação solar na Terra [20].	22
Figura 2.15 - Variação da declinação, da altura do Sol e duração do dia no hemisfério norte (adaptado de [20]).	23
Figura 2.16 - Ângulo azimute (adaptado de [44]).	24
Figura 2.17 - Radiação incidente num painel fotovoltaico (adaptado de [28]).	25
Figura 2.18 - Valores médios da energia resultante da radiação incidente em Portugal continental, em kWh/Wp (adaptado de [43]).	27

Figura 2.19 - Rede de átomos de silício [20].	28
Figura 2.20 - Dopagem do tipo N (adaptado de [20]).	29
Figura 2.21 - Dopagem do tipo P (adaptado de [20]).	30
Figura 2.22 - Junção PN e a sua curva característica (adaptado de [20]).	30
Figura 2.23 - Estrutura da célula fotovoltaica (adaptado de [14]).	31
Figura 2.24 - Modelo equivalente de uma célula fotovoltaica [28].	31
Figura 2.25 - Célula fotovoltaica iluminada (adaptado de [20]).	32
Figura 2.26 - Célula fotovoltaica escurecida (adaptado de [20]).	32
Figura 2.27 - Estrutura molecular do silício e obtenção de silício monocristalino (adaptado de [20]).	34
Figura 2.28 - Células de silício policristalino (adaptado [25]).	35
Figura 2.29 - Módulos de silício monocristalino, policristalino e amorfo, respetivamente (adaptado [27]).	36
Figura 2.30 - Células fotovoltaicas de múltiplas junções (adaptado de [44]).	38
Figura 2.31 - Curva característica I/U de uma célula fotovoltaica [20].	38
Figura 2.32 - Curvas características da potência de um módulo fotovoltaico para diversos valores de radiação solar (adaptado de [44]).	39
Figura 2.33 - Curva característica da potência de uma célula fotovoltaica (adaptado de [43]).	40
Figura 2.34 - Curvas características I/U em relação à temperatura (adaptado de [20]).	41
Figura 2.35 - Comparação do tipo de célula em função da temperatura [20].	42
Figura 2.36 - Hierarquia fotovoltaica (adaptado de [31]).	42
Figura 2.37 - Detalhe da construção de um módulo fotovoltaico [20].	43
Figura 2.38 - Associação de módulos fotovoltaicos em série [20].	44

Figura 2.39 - Associação de módulos fotovoltaicos em paralelo [20].	45
Figura 2.40 - Módulo com 60 células fotovoltaicas e 3 díodos <i>bypass</i> (adaptado de [30]).	45
Figura 3.1 - Classificação dos secadores solares [45].	48
Figura 4.1 - Secador solar final com o suporte em aço inoxidável.	51
Figura 4.2 - Caixa de bornes do painel fotovoltaico (adaptado de [41]).	53
Figura 4.3 - Caixilho de alumínio anodizado do painel fotovoltaico utilizado.	54
Figura 4.4 - Média das horas de pico de Sol (adaptado de [26]).	56
Figura 4.5 - Fase de carregamento em que o óxido de chumbo é formado no ânodo, no cátodo é formado chumbo puro e o ácido sulfúrico é libertado para o eletrólito. (adaptado de [36]).	59
Figura 4.6 - Fase de descarregamento em que o sulfato de chumbo é formado em ambos os eletrodos e o ácido sulfúrico é removido do eletrólito (adaptado de [36]).	59
Figura 4.7 - Capacidade da bateria em função do número de ciclos de carga (adaptado de [20]).	60
Figura 4.8 - Bateria de 12V e 60Ah utilizada [36].	61
Figura 4.9- Vida útil das baterias consoante os ciclos de carga [36].	62
Figura 4.10 - Ciclos de carga de descarga em sistemas fotovoltaicos isolados (adaptado de [20]).	63
Figura 4.11 - Controlo de carga e descarga de uma bateria [20].	63
Figura 4.12 - Comparação entre os dois tipos de reguladores de carga [38].	65
Figura 4.13 - Corrente e tensão de saída do painel fotovoltaico utilizado (adaptado de [38]).	65
Figura 4.14 - Corrente e tensão de saída do regulador de carga MPPT (adaptado de [38]).	66
Figura 4.15 - Representação do ponto máximo de potência determinado pelo regulador de carga MPPT (adaptado de [31]).	67
Figura 4.16 - Regulador de carga utilizado - BlueSolar Charger MPPT 75|15 [38].	68

Figura 4.17 - Inversor com transformador autocontrolado [20]	71
Figura 4.18 - Inversor de 12V e 180VA utilizado [40].	72
Figura 4.19 - Detalhe do sistema de encaixe utilizado no secador solar representado em SolidWorks™	73
Figura 4.20 - Secador solar antes e após a aplicação da tinta.	74
Figura 4.21 - Protótipo do secador solar desenvolvido.	74
Figura 4.22 - Detalhe das chaminés em tubo PVC.	75
Figura 4.23 - Construção da parte superior do secador solar.	76
Figura 4.24 - Disposição dos tabuleiros no interior da câmara de secagem.	77
Figura 4.25 - Fichas de ligação de 4mm ² do tipo Tyco-Solarlok® utilizado no painel fotovoltaico [41].	77
Figura 4.26 - Conceito dimensionado em SolidWorks™ e o projeto final do secador solar.	79
Figura 5.1 - Resistência elétrica de filamentos utilizada com o respectivo suporte.	81
Figura 5.2 - Pormenor do suporte da resistência elétrica.	81
Figura 5.3 - Esquema representativo do circuito elétrico.	82
Figura 5.4 - <i>Data loggers</i> utilizados [35].	83
Figura 5.5 - Disposição dos seis <i>data loggers</i> no interior da câmara de secagem.	83
Figura 5.6 - Gráfico alusivo aos valores da temperatura ambiente.	84
Figura 5.7 - Gráfico referente aos valores da tensão do painel fotovoltaico.	85
Figura 5.8 - Gráfico relativo aos valores da temperatura no interior da câmara de secagem.	86
Figura 5.9 - Comparação entre a temperatura ambiente, a radiação solar no local e a temperatura no interior da câmara de secagem relativos ao Ensaio 1.	87
Figura 5.10 - Comparação entre a temperatura ambiente, a radiação solar no local e a temperatura no interior da câmara de secagem relativos ao Ensaio 2.	87

Figura 5.12 - Comparação entre a temperatura ambiente, a radiação solar no local e a temperatura no interior da câmara de secagem relativos ao Ensaio 4.....	88
Figura 5.11 - Comparação entre a temperatura ambiente, a radiação solar no local e a temperatura no interior da câmara de secagem relativos ao Ensaio 3.....	88
Figura 5.13 - Tensão da bateria registada nos diferentes ensaios.	89
Figura 5.14 - Potência na carga referente aos diferentes ensaios.	90

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Rendimento dos módulos fotovoltaicos (adaptado de [20]).	35
Tabela 2.2 - Área necessária para a produção de 1kWp para diferentes células (adaptado de [20]).	36
Tabela 2.3 - Eficiência das células fotovoltaicas de multijunção [20].	37
Tabela 4.1 - Características do painel fotovoltaico utilizado [35].	55
Tabela 4.2 - Quantidade de energia expressa em kWh/m ² /d (adaptado de [20]).	56
Tabela 4.3 - Características da bateria utilizada [36].	62
Tabela 4.4 - Características do regulador de carga utilizado [38].	69
Tabela 4.5 - Características do inversor utilizado [40].	72
Tabela 4.6 - Resistência elétrica dos cabos condutores [20].	78

Lista de acrónimos

AGM	Material de vidro absorvente
CCA	Capacidade de arranque a frio
CO ₂	Dióxido de Carbono
DOD	Profundidade Máxima de Descarga
EVA	Etileno Acetato de Vinilo
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
FV	Fotovoltaico
GPP	Gabinete de Planeamento e Políticas
H ₂ O	Água
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
HRA	Ângulo Horário Local
LST	Tempo Local Solar
MC4	Contato múltiplo com conector de 4mm ²
MDF	Fibra de Média Densidade
MOSFET	Transístor de Efeito de Campo Metal-óxido Semicondutor
MPP	Ponto Máximo de Potência
MPPT	Rastreamento do Ponto de Potência Máxima
MW	Megawatt (1x10 ⁶ W)
O ₂	Oxigénio
O ₃	Ozono
OECD	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
Pb	Chumbo
PbO ₂	Dióxido de chumbo
PbSO ₄	Sulfato de chumbo
PVGIS	Sistema de Informação Geográfica Fotovoltaica
PWM	Modulação por Largura de Pulso
Sb	Antimónio
Si	Silício
STC	Condições de Teste <i>Standard</i>
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo
UA	Unidade Astronómica
UE	União Europeia
UV	Ultravioleta
VRLA	Bateria de Ácido-chumbo Regulada por Válvula

Capítulo 1

1 Introdução

As técnicas alternativas para conduzir a energia solar a aplicações distintas das usuais são bastante antigas. A indústria disponibilizou à sociedade a tecnologia necessária para converter energia solar em energia elétrica há muitos anos. Atualmente, neste período de ambiente poluído e salobro há que tomar consciência da necessidade de preservar o meio ambiente. É nessa conjugação de preocupações que se deve utilizar sem mais demora a radiação solar que se tem disponível pontualmente a cada dia, com objetivos notoriamente energéticos.

O proclamado mundo desenvolvido fundamenta-se no consumo compulsivo dos combustíveis fósseis retirados de reservatórios com milhões de anos, desde a Revolução Industrial no século XVIII. Contudo, esta extração e consumo têm um custo nada efêmero: a emissão de gases tóxicos para a atmosfera. Por outro lado, a produção de eletricidade através da radiação solar que chega à superfície da Terra após percorrer 150 milhões de quilômetros, não tem essa carga [1].

É no grande interesse pelo estudo deste contexto que surge a presente dissertação. A mesma procura estudar o desempenho de um secador solar mediante diferentes condições do ambiente exterior e para tal foi imprescindível a construção de um protótipo experimental. Este projeto exequível permite avaliar o processo de secagem solar fotovoltaica levando a que posteriormente se conduza a uma otimização do mesmo.

O primeiro capítulo é meramente introdutório; debruça-se na contextualização do presente tema com a importância da água na vida terrestre e o que advém da sua presença nos alimentos tendo em conta os diversos fatores que influenciam o crescimento de micro-organismos. Como a preservação do planeta Terra é um tema de forte impacto e em franca expansão nos dias de hoje, existe cada vez mais a necessidade de encontrar soluções e alternativas viáveis para a sua utilização em pequena escala. Com o objetivo de dar a conhecer a situação atual do tema, é apresentada uma revisão bibliográfica através de artigos, relatórios e da consulta de estudos recentes. Feito este preâmbulo, são ainda revelados neste capítulo os objetivos e motivação deste trabalho. À *posteriori* é abordada a estrutura da dissertação.

1.1 Enquadramento

É do conhecimento empírico que foi da água em estado líquido que despontaram as primeiras formas de vida tornando-se a molécula mais crucial para o desenvolvimento da vida terrestre. Gradualmente, surgiram os primeiros seres vivos que apenas sobreviveram ao desenvolver mecanismos fisiológicos que lhes possibilitou retirar água do meio envolvente e retê-la nos seus organismos.

Todos os micro-organismos - seres vivos cuja visualização não é possível efetuar a olho nu - carecem de uma panóplia de condições que lhes permite coabitar num determinado meio ambiente. Os micro-organismos são essenciais na nossa vida, dado serem fundamentais na obtenção de certos produtos alimentares. Porém, são igualmente os principais responsáveis pela deterioração de grande parte dos alimentos.

A água contida nestes alimentos permite a proliferação de micro-organismos o que acarreta o desenvolvimento de reações químicas que, por sua vez, deterioram a comida. A presença destes micro-organismos nos alimentos advém de vários fatores, sendo a presença endógena o principal. Ademais da contaminação, os nutrientes presentes nos alimentos, o tempo e as temperaturas de armazenagem descabidas influenciam, de maneira diferente, a presença e o crescimento de micro-organismos nos alimentos. Portanto, a manipulação destas condições viabiliza a obtenção de produtos alimentares com maior tempo de vida e de qualidade superior.

A temperatura integra os fatores mais relevantes no desenvolvimento de micro-organismos. Ao observar a representação esquemática da Figura 1.1 percebe-se que o crescimento será mais lento se houver um aumento ou um decréscimo substancial da temperatura a que os micro-organismos estão submetidos. O crescimento para com a temperatura abaixo do valor mínimo ou acima do valor máximo, mas nem sempre os micro-organismos morrem. Por outro lado, temperaturas demasiado elevadas possibilitam assolar a maioria dos micro-organismos. O mesmo não sucede com as temperaturas baixas - o congelamento não causa a destruição dos micro-organismos, somente permanecem num estado inativo [2].

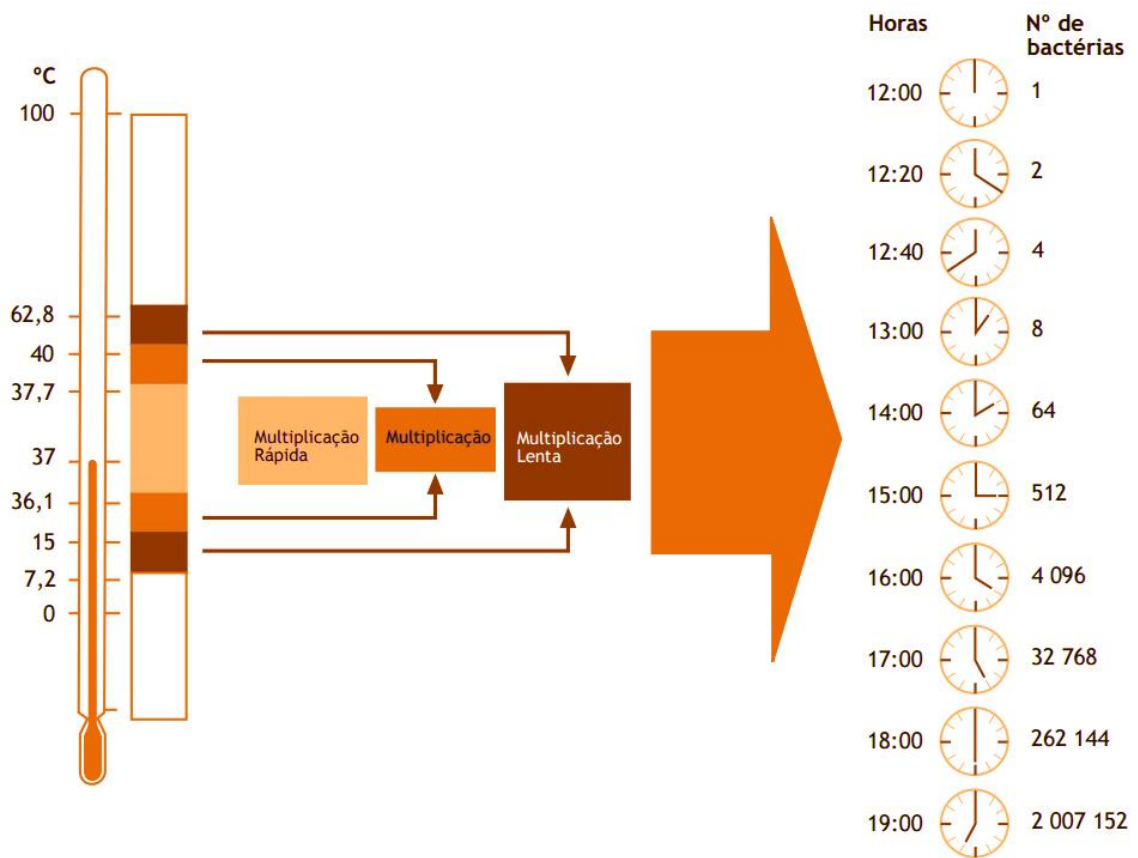


Figura 1.1 - Efeito da temperatura no crescimento de micro-organismos (adaptado de [2]).

Posteriormente, o descongelamento vai permitir que os micro-organismos possam eventualmente desenvolver-se. Desse modo, a utilização adequada da temperatura durante a conservação de produtos agroalimentares é fulcral para a sua preservação e respectiva qualidade final. Constata-se de pronto que o calor mata os micro-organismos, mas o frio apenas retém e inibe o seu crescimento.

1.2 Revisão bibliográfica

O tema “Estudo experimental do processo de secagem num secador solar fotovoltaico” encontra eco em vários artigos científicos e em relatórios de diversos autores que se debruçam sobre o presente tópico.

Em 2004, segundo os dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), a produção mundial de cereja estimava-se em 1,8 milhões de toneladas, partilhadas por uma superfície de, aproximadamente, 380 mil hectares. Quase metade da produção mundial provém da Europa, onde a Alemanha e a Itália se destacam como os principais produtores da União Europeia. Em Portugal, a produção nacional ronda as 9 toneladas anuais,

cujos territórios de cultivo mais representativos são a Cova da Beira, Alfândega da Fé, Resende e Portalegre ocupando uma área total de 6244 hectares [3].

De acordo com o relatório do Gabinete de Planeamento e Políticas (GPP) do Ministério da Agricultura, no ano de 2007, a região da Beira Interior destacou-se como líder na produção nacional de cereja ao representar uma fatia superior a 50%. Os restantes territórios presentes no pódio são as regiões de Trás-os-Montes e a região de Entre Douro e Minho, com pesos de 25% e 18%, respetivamente [4].

Devido ao elevado número de explorações de pequena dimensão, uma parte significativa da produção nacional de cereja encontra-se extremamente atomizada. Nos principais territórios de produção, a percentagem das explorações com pomares de cerejeiras de área inferior a 2 hectares supera 87% do total, ocupando estas 57% na região de Trás-os-Montes, 34% na Beira Interior e 31% na região de Entre Douro e Minho. No entanto, as explorações de plantações com uma área superior a 10 hectares apresentam uma expressão muito reduzida. Na Beira Interior, entre 1999 e 2005, a área com pomares de cerejeiras aumentou 207 hectares. A produção de cereja na Beira Interior destaca-se, essencialmente, nos concelhos do Fundão e da Covilhã, respetivamente com 69% e 12% da área desta região [4].

Quer em termos globais como regionais, a atividade agrícola justifica-se pela necessidade de as populações garantirem o seu sustento [5]. Posto isto, percebe-se a importância em produtores individuais e coletivos promoverem a concentração, conservação e escoamento da produção [6].

Com este intuito surgiram, nos últimos anos, diversas alternativas à construção de secadores solares. Os primeiros estudos no sentido de aperfeiçoar os protótipos de secadores solares relatam da década de 80. Os secadores solares iniciais eram constituídos apenas por uma câmara de secagem e, desde que as condições climáticas fossem favoráveis, o respetivo período de secagem era de 6 a 7 dias [7].

No entanto, este tipo de secagem direta acarreta inúmeras desvantagens - *e.g.* a perda de qualidade devido à infestação de insetos e o crescimento de micro-organismos são as mais prevacentes. Desde então que, para ultrapassar os inconvenientes mencionados acima, vários tipos de secadores solares foram desenvolvidos ao longo dos anos. De facto, constata-se que este estudo ainda é incipiente, exigindo uma investigação mais aprofundada consoante o local e o objetivo que se pretende alcançar. Em áreas remotas e para o setor rural, os secadores solares por convecção natural mostram-se como os mais adequados pelo facto de não requererem qualquer outra fonte de energia externa [8].

Assim, facilmente se deduz que os secadores solares diretos juntamente com os secadores solares indiretos estão dependentes das condições climáticas. Em dias nebulosos e com

precipitação, o rendimento de ambos os secadores diminui drasticamente. Por acréscimo, estas condições adversas podem levar à perda dos produtos agrícolas por apodrecimento [7].

O processo de secagem envolve a migração da água do interior do produto que se pretende secar para a sua superfície por evaporação e, portanto, é um fenómeno de transferência de calor e de massa. O coeficiente de transferência de calor por convecção é um parâmetro a ter em conta que determina a transferência de calor e massa. O dito coeficiente varia com o tipo de produtos agrícolas que se pretende secar e com o tipo de secagem. De salientar que os produtos agrícolas com alto teor de humidade na superfície apresentam maior coeficiente de transferência de calor por convecção. Num trabalho experimental em que é comparada convecção natural com convecção forçada conclui-se que a convecção forçada é a mais favorável - o coeficiente de transferência de calor por convecção forçada (1,30 - 1,46 W/m²K) foi maior quando comparado com o coeficiente por convecção natural (1,29 - 1,41 W/m²K) [9].

Para tal, a implementação de um ventilador para secadores solares por convecção forçada é bastante usual. Geralmente é acoplado nos secadores um painel fotovoltaico com o objetivo de alimentar o respectivo ventilador [9]-[13].

Num estudo experimental em Taiwan no ano de 2005, os autores desenvolveram um secador solar ao qual instalaram um módulo fotovoltaico como fonte de energia elétrica e um sistema de desumidificação para condensar a humidade [12].

Por sua vez, no Bangladesh e no mesmo ano foi desenvolvido um secador solar misto por convecção forçada onde eram utilizados dois ventiladores operados por um módulo fotovoltaico independente da rede elétrica [11].

A temperatura de secagem foi analisada numa série de artigos científicos em vários tipos de secadores. Constata-se de pronto a ausência de um valor concreto diante vários intervalos de temperatura, consoante o tipo de produto agrícola que se pretende secar. O intervalo varia entre 40°C, 50°C e 60°C [14], 61°C [15], 74°C [10], 75°C [16], e entre 34°C e 52°C para valores de radiação solar entre 227W/m² e 825W/m² [17]. Num relatório intitulado “Características de secagem de cerejas doces” conclui-se que a temperatura ideal ronda os valores entre 60°C e 75°C [18].

Num estudo realizado na Índia, em 2015, com velocidades do ar de 0,5, 1 e 2m/s, foram analisadas as temperaturas máximas alcançadas, obtendo-se 49,5, 45 e 41 °C, respetivamente, com a temperatura do ar ambiente praticamente semelhante para todas as velocidades. De salientar que a taxa de remoção de humidade é superior com a velocidade de 1m/s, seguida de 0,5 e 2m/s. Isto indica que, temperaturas do ar elevadas são muito mais eficazes no aumento da velocidade de secagem, quando comparadas com a velocidade do ar que se revela menos

pertinente. Há que ter em conta que não importa apenas a taxa de secagem, mas também a qualidade do produto final [19].

Com uma velocidade do ar de 0,5m/s, a taxa de evaporação aumentou, resultando no endurecimento da superfície do fruto. Por outro lado, com uma velocidade de entrada de 2m/s, o fruto demonstra uma cor escura com o enegrecimento da superfície, devido ao rápido arrefecimento da mesma. Em contraste, as amostras obtidas com o valor da velocidade do ar de 1m/s na entrada do coletor, apresentam uma qualidade mais elevada com boa textura e uma cor consistente. Nos três casos, as condições climáticas em pouco se diferenciaram [19].

Neste contexto, estima-se que o dimensionamento e a construção do protótipo proposto na presente dissertação, juntamente com os vários melhoramentos implementados, venha a dar um novo rumo à produção agrícola na Beira Interior.

1.3 Motivação e objetivos

Um facto adquirido acerca dos países menos desenvolvidos é que estes enfrentam dificuldades energéticas severas e, conseqüentemente, encaram obstáculos na conservação dos seus produtos agroalimentares. Esta carência de energia exacerba ainda mais o nível de pobreza, comprometendo a segurança alimentar e acumulando deste modo as respectivas implicações diretas na preservação dos alimentos. Esta dificuldade poderá ser, em muito, amenizada pelo recurso à energia solar evitando um possível desperdício de alimentos que são facilmente perecíveis. Por consequência, a racionalização das fontes de alimentos é fulcral. Com esse intuito otimizou-se métodos artesanais de transformação e conservação de alimentos.

O alicerce da sustentabilidade futura do planeta está sujeito às decisões que se tomam deliberadamente hoje em dia. As gerações que se avizinham têm de ter em conta os níveis atuais de poluição; a eleição das energias renováveis em detrimento dos combustíveis fósseis é imprescindível. Neste sentido, é cada vez mais uma necessidade aproveitar energia elétrica proveniente de fontes renováveis [20]. Todavia, relativamente à energia fotovoltaica, a documentação técnica que ajude a entender, projetar e implementar de forma segura, secadores solares com sistemas fotovoltaicos acoplados é escassa. Essa lacuna integra uma panóplia de motivos inteligíveis que serviram de motivação para o presente trabalho.

O Sol, que brilha 250 dias por ano em Portugal, fornecendo mais de 3000 horas de luz natural constitui uma desmedida fonte de energia. A secagem solar é uma prática ancestral de conservação dos alimentos de baixo custo e, sendo a agricultura uma atividade sazonal, a obtenção dos alimentos converge em determinadas épocas do ano. Portanto, para que a agricultura na Beira Interior desempenhe com êxito o papel que lhe cabe no desenvolvimento das zonas rurais do Interior, deve ser implementado, por forma a consolidar e desenvolver os mais adequados sistemas de produção e colheita, novos métodos de preservação dos produtos

agroalimentares. Assim, a relação entre a agricultura e a tecnologia tem de ser considerada em sentido lato [21].

A localização da cidade da Covilhã é de grande privilégio visto que a Cova da Beira se encontra distante das principais fontes de poluição regionais e possui explorações agrícolas de razoável dimensão. Estes fatores permitem produzir uma gama variada de produtos agroalimentares com qualidade. Além de se reconhecer as potencialidades da fileira da cereja da Cova da Beira, os estudos em relação à produção e comercialização da cereja são ainda poucos [22]. Neste sentido é, de todo, deveras importante colmatar e viabilizar o excesso de produção de cereja.

1.4 Descrição sumária

A presente dissertação é constituída por cinco capítulos em que as respetivas descrições são esclarecidas abaixo, de forma sucinta.

Visto que existe um abrangente leque de literatura analisou-se, inicialmente, no primeiro capítulo, certos pontos-chave relevantes para o presente trabalho. O capítulo 1 é meramente introdutório; é discutido o tema da importância da secagem solar tendo em conta o atual contexto mundial e regional.

No segundo capítulo, são anunciados fundamentos teóricos acerca do estudo da energia solar. Temas como as propriedades da luz, a radiação solar, a energia solar na Terra e a tecnologia dos equipamentos fotovoltaicos são esclarecidos e, nessa análise, é dado particular destaque aos componentes de sistemas fotovoltaicos e às respectivas noções técnicas.

Após uma profunda análise na literatura a vários relatórios e artigos surge, no capítulo 3, uma abordagem, de uma forma geral, aos diferentes métodos de secagem existentes e os distintos secadores solares.

Por sua vez, o capítulo 4 intitulado “Projeto e conceção do secador solar” apresenta os casos práticos do estudo em questão e os fatores que influenciaram o dimensionamento do painel solar. Este dimensionamento que agrega um grande número de variáveis só pode ser calculado com uma certa margem de aproximação. Neste capítulo é abordado todo o processo de construção do secador solar e a descrição dos respectivos materiais utilizados - sendo este um parâmetro determinante na dimensão máxima do secador.

Por fim, no capítulo 5 e 6, são descritos, respetivamente, os ensaios experimentais realizados e são apresentadas as conclusões relativas à elaboração da presente dissertação e são propostos futuros trabalhos a desenvolver.

Capítulo 2

2 Energia solar

De todas as energias renováveis existentes, a solar destaca-se por ser uma fonte de energia abundante e alcançável em todo o planeta. As restantes são caracterizadas por certas peculiaridades e nem sempre estão acessíveis em todos os pontos do globo terrestre. Esta forma de energia possui um potencial energético inesgotável quando comparado com a escala humana [23].

Uma das desvantagens referentes à energia solar está relacionada com o facto da radiação solar se difundir quando atinge a atmosfera terrestre - apenas 70% dos raios solares alcançam a superfície da Terra. Adicionalmente, a localização dos painéis fotovoltaicos é de grande importância para a produção de eletricidade. Embora se produza energia durante os períodos de nebulosidade, a energia é produzida a uma taxa mais reduzida.

O preço da instalação de energia solar tem diminuído significativamente nos últimos anos para mínimos sem precedentes, visto que as influências políticas e as de mercado têm impulsionado mais instalações deste tipo. Os dados mais recentes demonstram que esta redução contínua dos preços solares é improvável que abrande tão cedo [24]. Este declínio é extremamente benéfico - tornará mais competitivo o mercado relacionado com a energia solar utilizada para gerar eletricidade. Percorrendo este caminho, onde claramente se denota um melhor desenvolvimento da ciência e da tecnologia solar, talvez se possa ter à disposição projetos ainda mais simplificados e exequíveis com os respectivos materiais exclusivamente elaborados para aplicações solares. Somente nesse momento, se denotará um ápice na grande afluência da energia solar.

2.1 Propriedades da luz

A luz, dentro de uma determinada gama de comprimento de onda, designada por λ , é uma radiação eletromagnética visível constituída por um campo elétrico e um campo magnético. Os raios mudam de direção ao trespassar num novo meio em função da variação da velocidade da luz nos diferentes meios por onde atravessa. Portanto, para determinar a velocidade de propagação da luz há que ter em conta a presença dos campos magnético e elétrico e também as condições de propagação naqueles meios - sendo a permissividade e a permeabilidade, desses ambientes, características importantes. A permissividade é a relação entre a carga e a energia

dos fótons provenientes do exterior. Por sua vez, a permeabilidade é a medida da capacidade de um material para suportar a formação de um campo magnético dentro de si.

Sabe-se que:

- Permitividade do vácuo, $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} [F/m]$ (2.1)

- Permeabilidade do vácuo, $\mu_0 = \frac{1}{4 \times \pi \times 10^{-7}} [H/m]$ (2.2)

Com as duas grandezas da Equação 2.1 e 2.2 determina-se a velocidade da luz no espaço pela fórmula:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \times \mu_0}} = 300 \times 10^6 m/s = 300\,000\, km/s \quad (2.3)$$

Os fótons constituem uma parte da radiação luminosa e qualificam-se pela sua energia, E, em elétron-volt e pelo comprimento de onda, λ , em metros. Para determinar a energia de cada fóton, o alemão Max Planck conseguiu caracterizar a intensidade da luz emitida por um corpo negro em função do comprimento de onda. Esta solução permitiu-o chegar à seguinte equação:

$$E = \frac{h \times c}{\lambda} [eV] \quad (2.4)$$

Onde,

E - Energia do fóton (eV);

h - Constante de Planck = $6,63 \times 10^{-34}$ (J·s);

λ - Comprimento de onda (m).

2.1.1 Radiação de um corpo negro

Independentemente da temperatura, qualquer corpo emite radiações eletromagnéticas. Por sua vez, o corpo negro absorve toda a radiação incidente no mesmo; a sua absorvidade é igual a 1 ($\alpha=1$) e a sua refletividade é nula ($\rho=0$). Um corpo negro, aparte de ser absorvedor ideal, é também um emissor ideal ($\epsilon=1$) [25]. Um corpo deste tipo emite sempre radiações térmicas com igual intensidade, a uma certa temperatura e para cada comprimento de onda, cujo espectro poderá ser o da Figura 2.1.

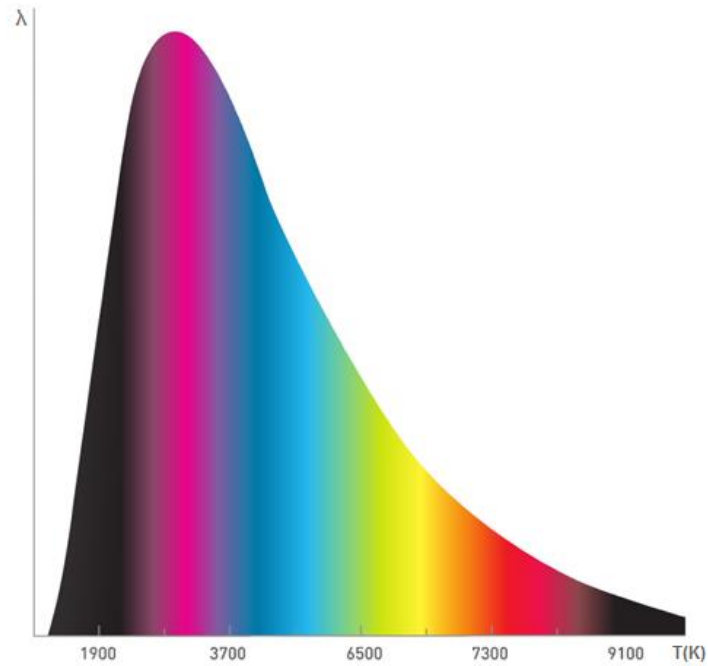


Figura 2.1 - Espectro da radiação de um corpo negro para diferentes temperaturas [20].

De salientar que para um certo comprimento de onda há um valor máximo para a intensidade da radiação. Por outro lado, ao aumentar a temperatura o pico mencionado move-se para comprimentos de onda inferiores.

Segundo Planck, a radiação espectral de um corpo negro é determinada por:

$$F(\lambda) = \frac{2 \times \pi \times c^2}{\lambda^5 \times \left(e^{\frac{h \times c}{\lambda \times T}} - 1 \right)} [W \cdot m^{-2} \cdot \mu m] \quad (2.5)$$

Onde,

F - Radiação espectral ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m$);

c - Velocidade da luz (m/s);

h - Constante de Planck (J·s);

λ - Comprimento de onda (μm);

T - Temperatura do corpo (K).

Por sua vez, a densidade da potência da radiação global do corpo negro, é:

$$H = \sigma \cdot T^4 \quad (2.6)$$

Em que,

σ - Constante de Boltzmann ($5,67032 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$);

T - Temperatura do corpo (K).

As presentes noções e conceitos são essenciais para o perfeito entendimento da radiação solar em todas as atividades no sector da energia solar.

2.2 Radiação solar

O Sol irradia para o espaço, luz e calor provenientes das reações nucleares de fusão no seu interior. A estrela do nosso sistema solar emite energia como radiação eletromagnética a um ritmo extremamente elevado e relativamente contínuo. O Sol, ao emitir constantemente radiações comporta-se como um corpo negro à temperatura de 6000K, cerca de 5727°C, e em todos os segundos é produzida, aproximadamente, 38×10^{25} J de energia [26].

Todavia, apenas uma infinitésima porção dessa energia alcança a superfície terrestre. Se fosse possível aproveitar a energia proveniente de apenas dez hectares da superfície do Sol, seria o suficiente para suprir a procura atual de energia mundial. No entanto, o mesmo não é possível pelo facto da Terra se situar a 150 milhões de quilómetros do Sol e apenas uma pequena fração da energia que deixa uma área específica atinge uma área igual na Terra. Em segundo lugar, o planeta gira sobre o seu eixo, portanto qualquer módulo fotovoltaico na superfície terrestre recebe apenas a energia radiante do Sol em cerca de metade de cada dia. Por fim, a atmosfera e as condições climáticas da Terra são responsáveis por uma redução de 30% de toda a energia solar recebida. Porém essa porção de energia que chega à superfície terrestre justifica, de longe, o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologia que é indispensável para se conseguir aproveitá-la [26].

A taxa a que a energia solar atinge uma unidade de área na Terra designa-se por radiação solar. As respectivas unidades de medida são Watt por metro quadrado (W/m^2). A radiação solar é uma medida instantânea que varia ao longo do tempo.

A energia da radiação solar chega sob a forma de ondas eletromagnéticas num espectro amplo. Comprimentos de onda mais longos têm menos energia, *e.g.* o infravermelho, do que os mais curtos, como a luz visível. Toda a região de energia eletromagnética que se distingue pelo comprimento de onda e pela frequência é designado espectro eletromagnético. A distribuição espectral da radiação solar que incide na parte superior da atmosfera da Terra é representada na Figura 2.2.

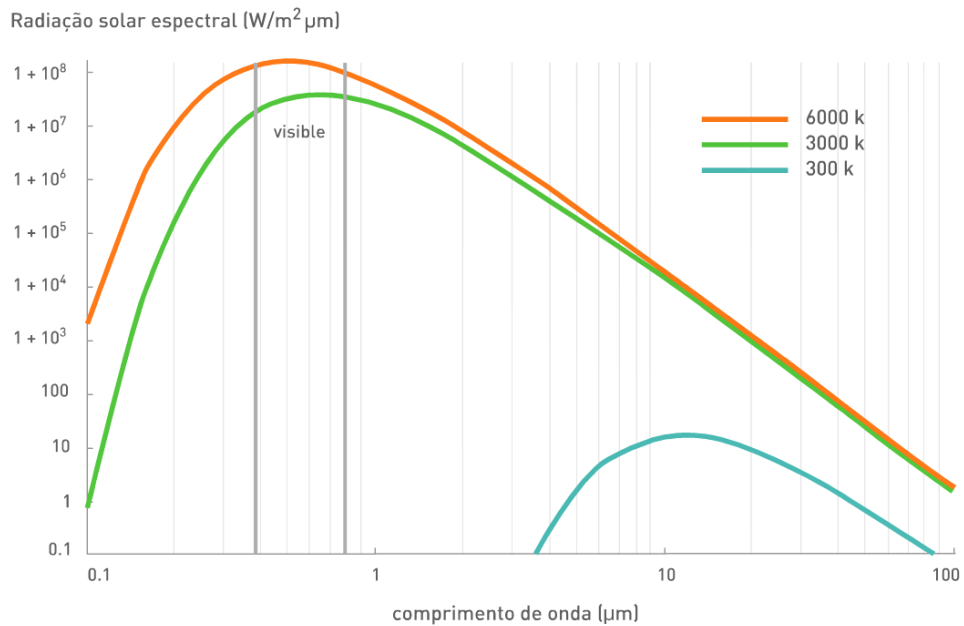


Figura 2.2 - Comprimentos de onda da radiação solar na Terra (adaptado de [26]).

Da figura retira-se que o espectro da radiação do Sol é mais amplo do que a parte da radiação visível ao olho humano. O pico do espectro está dentro do espectro visível, mas existem quantidades significativas de comprimentos de onda presentes mais longos e mais curtos. Somente uma ínfima fração da radiação solar compreendida entre 10^{-7} e 10^{-5} metros é visível.

O Sol fornece uma vasta gama de energia, concentrada maioritariamente em torno das regiões do visível e do infravermelho. No entanto, o espectro da radiação solar abrange todo o espectro eletromagnético desde os raios X e γ até às ondas hertzianas, tal como representa a Figura 2.3.

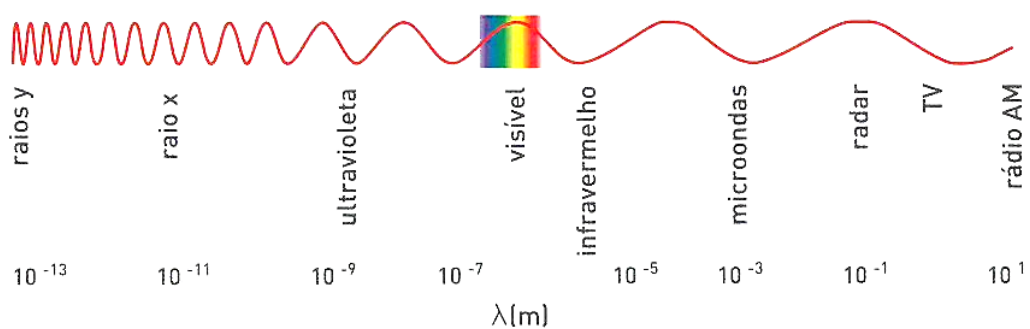


Figura 2.3 - Espectro da radiação solar na Terra (adaptado de [43]).

A energia que o Sol emite é composta, na sua totalidade, por energia radiante e perto de 99% da energia solar encontra-se entre 0,15 e 4,0 μm . A gama de energia eletromagnética emitida

pelo Sol encontra-se principalmente em três regiões: ultravioleta ($\lambda < 0,4 \mu\text{m}$), visível ($0,4 < \lambda < 0,74 \mu\text{m}$) e infravermelho ($\lambda > 0,74 \mu\text{m}$).

As moléculas de H_2O presentes na atmosfera terrestre absorvem tanto a radiação solar de maior comprimento de onda como também difundem uma fração mínima dos raios de onda curta. Por sua vez, a maioria da radiação é absorvida pelo ozono da atmosfera exterior e os raios X e o ultravioleta são assimilados pelo oxigénio. Aparte destas consequências, a energia radiante deteriora-se ao atravessar a atmosfera e estes acidentes desviam a sua direcção e diminuem a sua intensidade.

2.3 Energia solar na Terra

Considera-se que o Sol produz uma quantidade constante de energia e que na sua superfície a intensidade da radiação solar é aproximadamente $59,6 \times 10^6 \text{W/m}^2$. Visto que os raios solares se espalham pelo espaço, Figura 2.4, a radiação torna-se gradualmente menos intensa. A constante solar, designada por S , refere-se à intensidade média da radiação que incide sobre uma superfície perpendicular aos raios solares no limite da atmosfera terrestre.

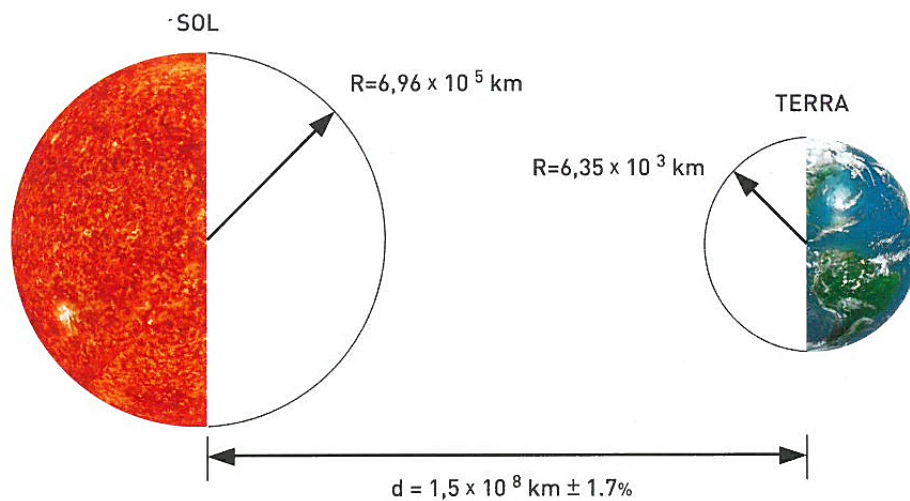


Figura 2.4 - Distância do Sol à Terra [20].

A palavra "constante" é ilusória visto que a órbita elíptica da Terra altera a intensidade da radiação solar que incide sobre a mesma. Esta intensidade varia cerca de 7% entre o dia 1 de janeiro, designado periélio que indica o momento em que a Terra está mais próxima do Sol, e o dia 3 de julho, quando a Terra está mais distante do Sol - afélio. Juntando o facto de o eixo de rotação do globo terrestre ser inclinado $23,5$ graus relativamente à vertical, o valor médio anual da constante solar é:

$$S = 1367 \text{ W/m}^2 \quad (2.7)$$

Tendo em conta os valores conhecidos dos diâmetros do Sol e da Terra, bem como a distância entre ambos, é possível determinar de que forma a energia solar alcança o planeta. Como foi referido anteriormente, o valor da potência da radiação solar, H_{Sol} , na sua superfície é:

$$H_{Sol} = 59,6 \times 10^6 \text{ W/m}^2 \quad (2.8)$$

Por sua vez, a potência da radiação solar, H_0 , na periferia da atmosfera terrestre, pode ser calculada por:

$$H_0 = \frac{R^2_{Sol}}{D^2} \times H_{Sol} \quad (2.9)$$

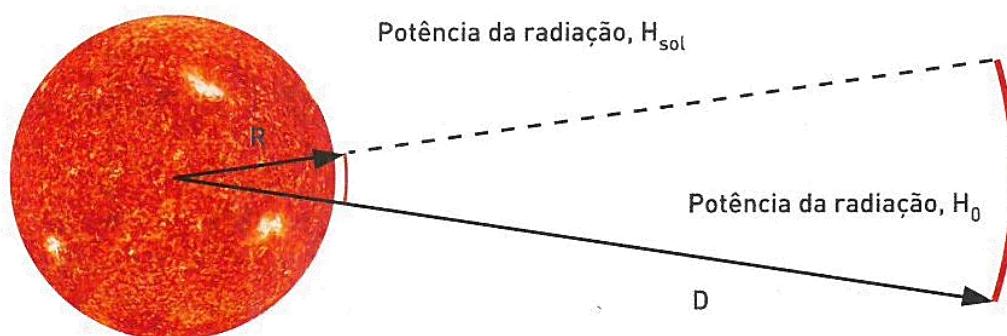


Figura 2.5 - Radiação incidente na atmosfera terrestre [20].

Para determinar, com algum rigor, a potência da radiação solar no limite da atmosfera há que ter em conta que a distância do Sol à Terra é inconstante, e pode ser calculada pela expressão:

$$\frac{H}{S} = 1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{360(n-2)}{365}\right) \quad (2.10)$$

Em que,

$S = 1367 \text{ W/m}^2$;

n - número do dia do ano.

O Terra como apresenta ao Sol uma área dada por πR^2 , a quantidade total de radiação solar que nela incide obtém-se pela fórmula $S \times \pi R^2$. Este valor é então dividido por metade, visto que apenas uma face da Terra está voltada para o Sol, $4\pi R^2/2$, o que resulta em 684 W/m^2 .

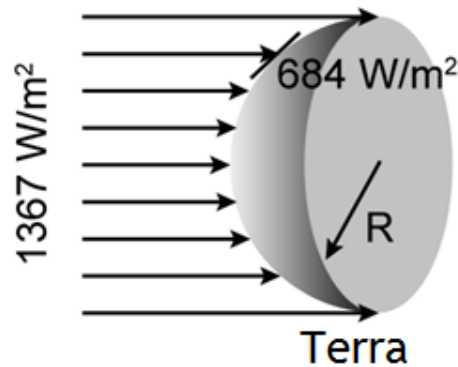


Figura 2.6 - Estimação da radiação solar (adaptado de [26]).

Ao meio-dia, e em ótimas condições climáticas, o nível de radiação na Terra atinge, sensivelmente, os 1000 W/m^2 . Daí este valor ser considerado nos ensaios convencionais dos módulos fotovoltaicos e, pela mesma razão, se encontrar presente nos respectivos *datasheets*. Ao assumir que 30% da energia do Sol desvanece na atmosfera e que um dia tem por média doze horas de Sol, pode-se estimar por alto a quantidade de radiação solar por unidade de área (H) que incide na superfície da Terra, em qualquer local:

$$H = 0.7 \times 684 \times 12 = 5,75 \text{ kWh/dia} \quad (2.11)$$

Reconhecendo que no hemisfério norte, o Sol, em média, brilha apenas seis horas por dia, fica:

$$H = 0.7 \times 684 \times 6 = 2.88 \text{ kWh/dia} \quad (2.12)$$

A Figura 2.7 indica o perfil anual de radiação solar média para diferentes locais da Europa. A linha sólida representa o valor de $5,75 \text{ kWh/dia}$ enquanto a linha tracejada mostra $2,88 \text{ kWh/dia}$.

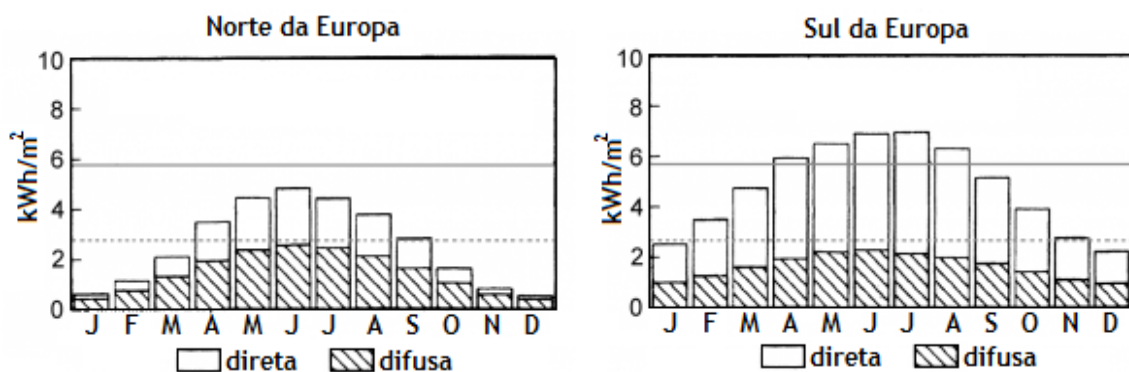


Figura 2.7 - Perfil anual da radiação solar na Europa (adaptado de [26]).

A radiação solar que chega à Terra pode ser separada em dois tipos: a componente direta e a componente difusa. Caso a superfície se encontre inclinada relativamente à horizontal, há que se considerar um terceiro componente refletido pelo meio envolvente: o albedo. Este último componente representa a parte da radiação incidente, direta ou difusa, que por sua vez é relançada em todas as direções por reflexão ou difusão [20].

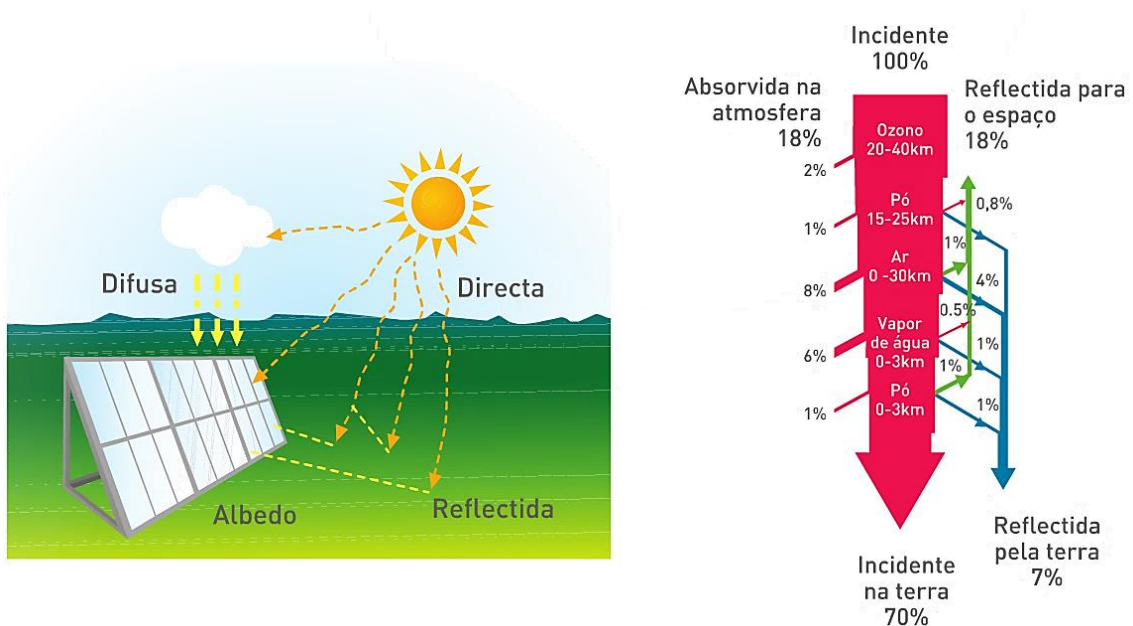


Figura 2.8 - Radiação incidente na Terra (adaptado de [20]).

O valor do albedo está compreendido entre 0 e 1, valor este que depende do tipo de superfície em que o fluxo da radiação solar incide. O albedo refere-se a um conceito prático que diz respeito à refletância de uma certa superfície sem considerar as variações do ângulo de incidência que, contudo, influenciam e podem ser relevantes.

Devido à dispersão, reflexão e absorção das distintas camadas que constituem a atmosfera terrestre, a radiação incidente na atmosfera evidencia-se mais em termos de quantidade que a incidente na superfície terrestre. Do mesmo modo, a radiação direta caracteriza-se por deter maior quantidade de energia.

Quando a radiação solar atinge a atmosfera terrestre, o valor médio da transmissividade total da atmosfera é da ordem dos 0,7. Portanto, da energia solar total incidente, 18% é absorvida pela atmosfera, a mesma percentagem é refletida para o espaço e a superfície da Terra reflete 7%. Ao ter em consideração os diferentes fatores responsáveis pela diminuição da radiação na atmosfera, o gráfico fica:

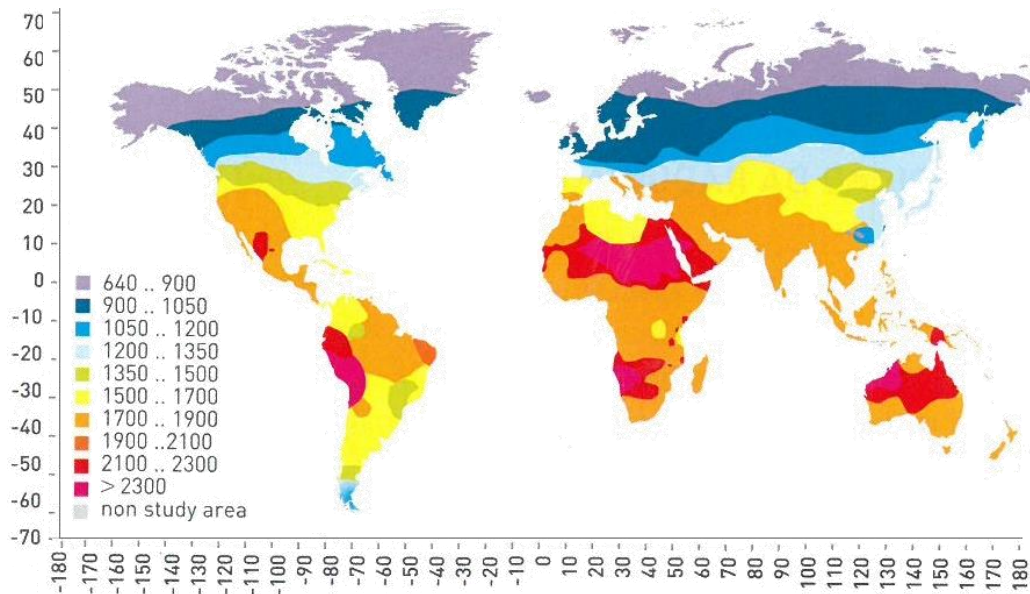


Figura 2.10 - Mapa da radiação solar global anual na Terra, em kWh/m² (adaptado de [25]).

Da figura observa-se que a faixa, paralela ao equador, de latitude $\pm 30^\circ$ é a zona do globo onde o valor da radiação solar é mais elevado.

2.3.1 Declinação solar

A declinação solar é fulcral para compreender a produção de eletricidade através de painéis fotovoltaicos. O facto de os dias serem mais longos no verão faz com que o Sol se encontre mais alto no céu durante este período. Deste modo, é depositada mais energia por metro quadrado na superfície da Terra o que leva a uma maior produção de eletricidade nesta época do ano. No entanto, há que ter em conta que com o aumento da temperatura a eficiência dos módulos fotovoltaicos diminui.

A declinação solar designa a posição angular do Sol, ao meio-dia solar, em relação ao plano do equador. Ou seja, é o ângulo entre os raios solares e o plano equatorial. Este ângulo varia de acordo com o dia do ano, entre os limites $\pm 23,45^\circ$. A declinação solar pode ser calculada em qualquer dia do ano. A presente informação, juntamente com a latitude, pode ser utilizada para calcular o ângulo de elevação do Sol acima do horizonte num dado momento e num determinado local. O conjunto destes valores, simultaneamente com o ângulo de montagem ideal do painel solar, é bastante útil para calcular a quantidade de energia que é possível produzir [27].

Ao traçar um gráfico da declinação solar em função do tempo, num ano inteiro, o resultado é uma onda sinusoidal com uma amplitude de $23,45^\circ$. No entanto, a órbita da Terra em torno do Sol não é perfeitamente circular, é elíptica. Devido a esse fato, a Terra move-se mais

rapidamente em torno do Sol no início de janeiro do que no início de julho. Assim as mudanças na declinação solar ocorrem mais rápido em janeiro do que em julho [28].

Como representado na Figura 2.11, a Terra descreve uma elipse no seu movimento de translação em torno do Sol.

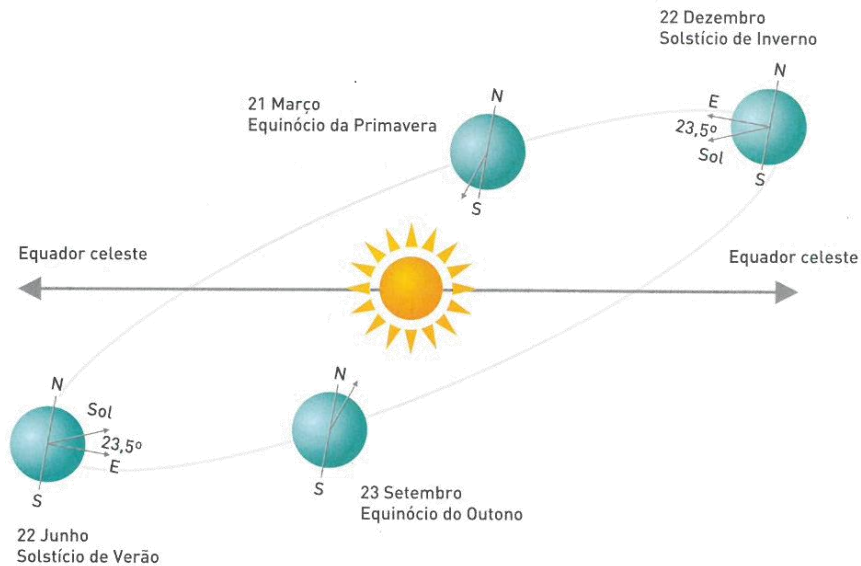


Figura 2.11 - Posicionamento solar nos equinócios e nos solstícios (adaptado de [20]).

Destacam-se quatro posições características da disposição do planeta Terra face ao Sol: dois solstícios e dois equinócios. Aos solstícios de verão e de inverno no hemisfério norte coincidem o solstício de inverno e de verão no hemisfério sul, respectivamente. O mesmo se passa com os equinócios da primavera e outono - também são antagónicos nos dois hemisférios:

- Equinócio da primavera: equador da Terra ordenado com um plano que cruza o centro do Sol (20 de março). Declinação nula.
- Solstício de verão: hemisfério norte da Terra inclinado para o Sol (21 de junho). Declinação máxima de $+23,45^\circ$.
- Equinócio do outono: o equador da Terra e o equador do Sol intersectam-se (21 de setembro). Declinação nula.
- Solstício de inverno: hemisfério norte da Terra inclinado para o lado oposto do Sol (21 de dezembro). Declinação máxima de $-23,45^\circ$.

No equador da Terra e em dia de equinócio, o Sol demonstra uma rotação perfeitamente perpendicular ao equador. Durante esse dia o Sol está no zênite, perpendicular ao local de observação. Numa latitude distinta, que não o equador, o Sol percorre uma trajetória com um ângulo de incidência igual à latitude desse local, Figura 2.12.

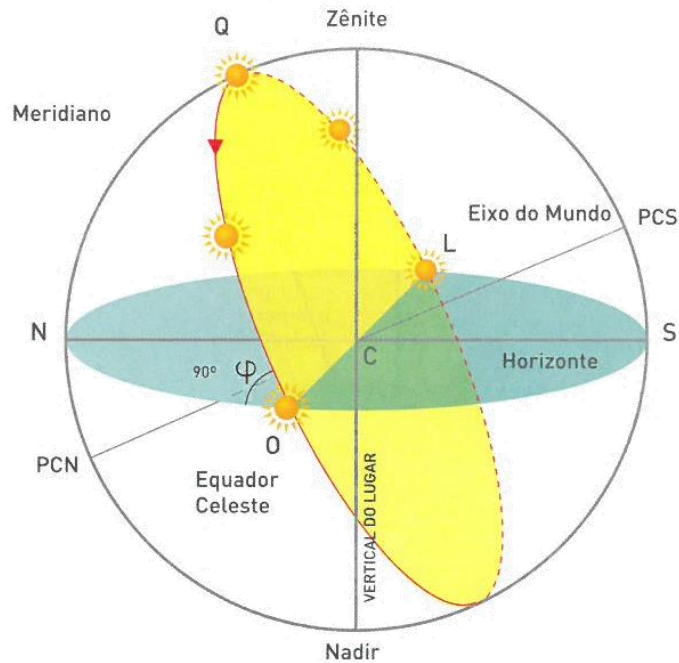


Figura 2.12 - Trajetória do Sol na latitude φ , em dia de equinócio [20].

2.3.2 Ângulo de declinação

O ângulo de declinação, denotado por δ , varia sazonalmente com a inclinação da Terra face ao seu eixo de rotação e ao movimento de translação da Terra em torno do Sol. Se o planeta não fosse inclinado sobre o seu eixo de rotação, a declinação seria sempre 0° . No entanto, como referido atrás, a Terra está inclinada $23,45^\circ$ e o ângulo de declinação varia por volta desse valor. O designado ângulo de declinação determina-se pela seguinte fórmula:

$$\delta = 23,45^\circ \times \text{sen} \left[\frac{360}{365} (d - 81) \right] \quad (2.13)$$

Em que d representa o número de dias desde o início do ano.

Da fórmula anterior, conclui-se que o ângulo de declinação é zero nos dias de equinócio: 21 de março e 23 de setembro. A declinação atinge um máximo de $23,45^\circ$ no dia 22 de junho, solstício de verão no hemisfério norte, e um mínimo de $-23,45^\circ$ no dia 22 de dezembro, solstício de inverno no hemisfério norte, tal como está representado na Figura 2.13. A Equação 2.13

considera que a órbita da Terra é perfeitamente circular, em vez da sua verdadeira forma elíptica; daí que a dita fórmula é imprecisa até 2 graus, certas vezes durante o ano.

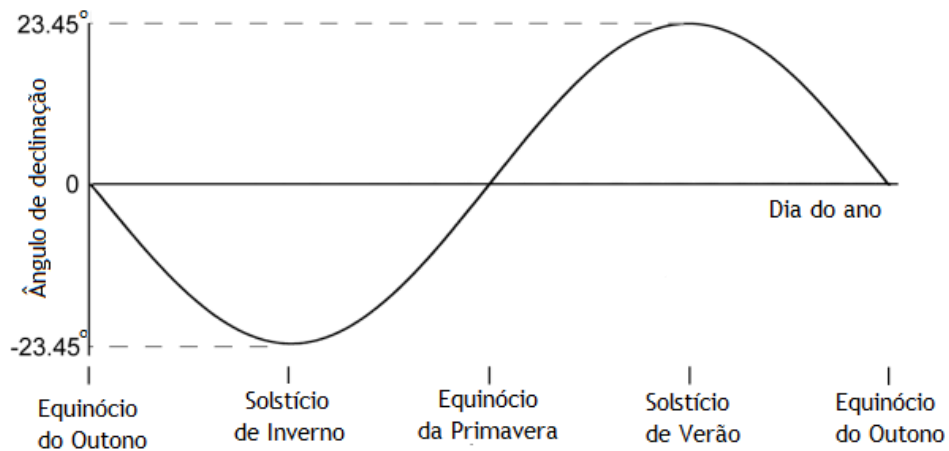


Figura 2.13 - Variação do ângulo de declinação ao longo do ano (adaptado de [27]).

2.3.3 Ângulo de incidência da radiação solar

As alterações na localização do Sol têm um efeito direto sobre a intensidade da radiação solar. A intensidade da radiação solar depende também do ângulo de incidência - o ângulo em que os raios solares atingem a superfície da Terra [28]. Neste contexto, vários ângulos são úteis nos cálculos da radiação solar, Figura 2.14.

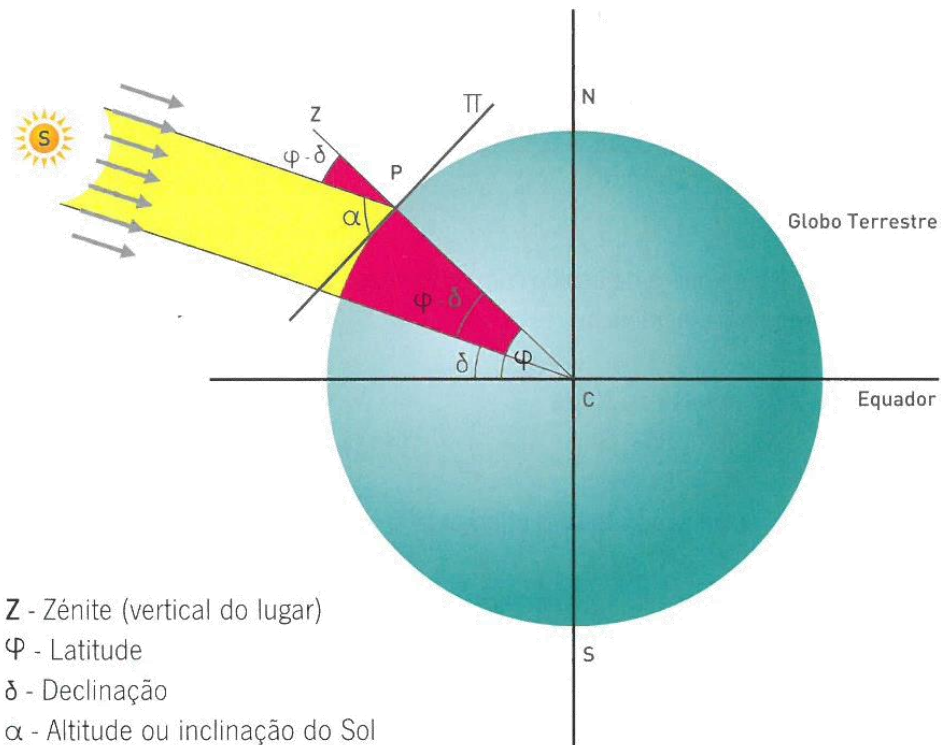


Figura 2.14 - Ângulos característicos da radiação solar na Terra [20].

Da figura retiram-se os ângulos a ter em conta:

- Altura solar (α) - ângulo dos raios solares acima do horizonte;
- Latitude (φ) - ângulo entre o equador terrestre e a vertical do lugar (zénite);
- Ângulo de incidência ($\varphi - \delta$) - ângulo formado entre os raios solares e a normal à superfície de captação;
- Ângulo Zenital ($\theta_z = \varphi + \delta$) - ângulo formado entre os raios do Sol e a vertical (zénite) que corresponde ao ângulo que é essencial corrigir no painel solar para que este forme um ângulo de 90° com os raios solares.

Quanto à altura do Sol, esta pode ser determinada, sabendo previamente o ângulo de incidência e o ângulo de declinação:

$$\alpha = 90 - \varphi + \delta \text{ (No hemisfério norte);}$$

$$\alpha = 90 + \varphi + \delta \text{ (No hemisfério sul).}$$

No entanto, para uma maior precisão emprega-se a expressão:

$$Altura_{solar} = \text{sen}^{-1}[\text{sen } \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos(HRA)] \quad (2.14)$$

O meio-dia local é designado por tempo local solar (LST) e é definido quando o Sol está no seu ponto mais alto no céu. A hora local (LT) geralmente varia do LST por causa da excentricidade da órbita da Terra juntamente com fusos horários e horários de verão. Por sua vez, o termo HRA designa o ângulo horário local que converte o tempo local solar (LST) no número de graus em que o Sol se movimenta no céu. Posto isto, entende-se que ao meio-dia solar o ângulo é zero [26].

Tendo em conta a rotação da Terra, em 24 horas o planeta gira 360 graus. Por conseguinte, dividindo 360° por 24, número de horas de um dia, obtém-se que o planeta Terra se movimenta 15° por hora; o ângulo solar é também 15° por hora a partir do meio-dia solar. Da parte da manhã o ângulo será negativo e à tarde será positivo:

$$HRA = 15^\circ (LST - 12) \quad (2.15)$$

Como a altura do Sol se altera entre um ângulo de $\pm 23,45^\circ$, nas latitudes de $\pm 23,45^\circ$, o Sol apresenta-se no zénite em duas ocasiões por ano. Além destas latitudes e do equador, o Sol não se encontrará no zénite em nenhuma outra latitude. Para o hemisfério norte pode-se esboçar o gráfico seguinte:

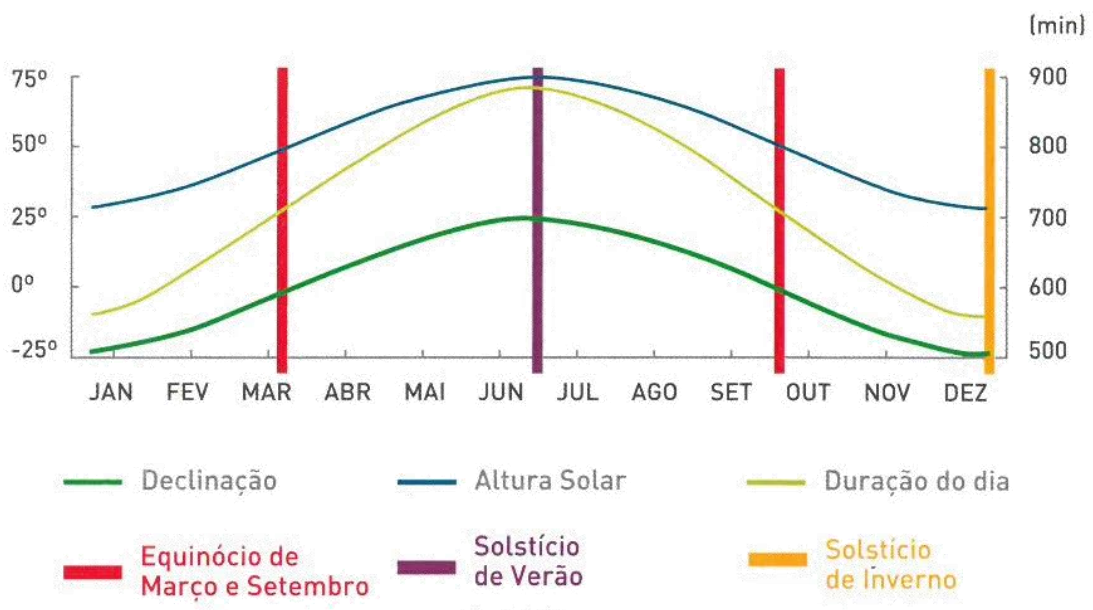


Figura 2.15 - Variação da declinação, da altura do Sol e duração do dia no hemisfério norte (adaptado de [20]).

2.3.4 Ângulo azimute

O ângulo azimute caracteriza a direção do movimento do Sol. Ao meio-dia solar, o Sol está sempre orientado a sul no hemisfério norte. Em geral, o ângulo de azimute varia com a latitude e altura do ano e a equação completa para calcular a posição do sol ao longo do dia é:

$$\text{Azimute} = \cos^{-1} \left[\frac{\text{sen } \delta \cdot \cos \varphi - \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos(HRA)}{\cos \alpha} \right] \quad (2.16)$$

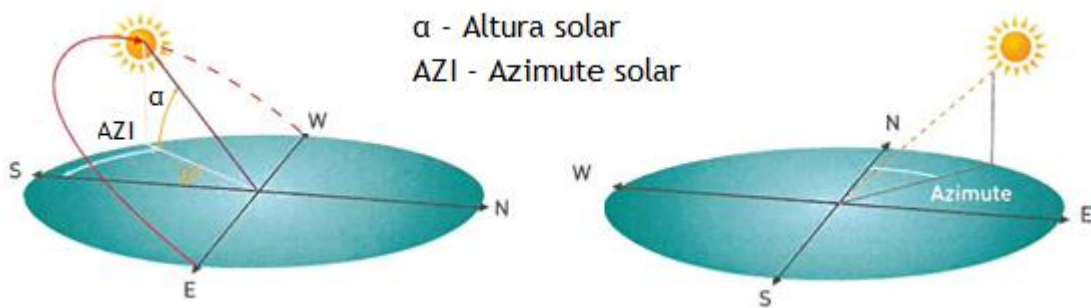


Figura 2.16 - Ângulo azimute (adaptado de [44]).

O ângulo de azimute pode ser comparado com a direção da bússola com norte=0° e sul=180°. Caso seja necessário seguir a trajetória do Sol ao longo do dia, este ângulo adquire extrema importância. No solstício de verão atinge a sua amplitude máxima e no solstício de inverno a mínima.

2.3.5 Ângulo ótimo

Para determinar a radiação que incide num painel fotovoltaico há que ter em conta uma série de parâmetros referidos anteriormente para depois se quantificar a radiação incidente no mesmo.

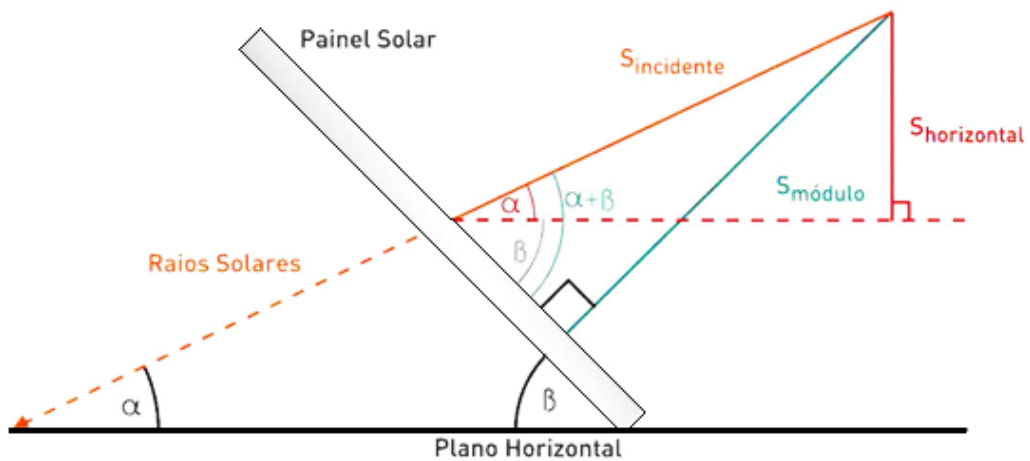


Figura 2.17 - Radiação incidente num painel fotovoltaico (adaptado de [28]).

Para determinar a radiação no plano horizontal utiliza-se a expressão:

$$S_{horizontal} = S_{incidente} \times \sin \alpha \quad (2.17)$$

Da mesma forma, a fórmula para a radiação no módulo será:

$$S_{módulo} = S_{incidente} \times \sin(\alpha + \beta) \quad (2.18)$$

Ao juntar a Equação 2.17 e 2.18, vem:

$$S_{módulo} = \frac{S_{horizontal} \times \sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha} \quad (2.19)$$

Em que,

$S_{horizontal}$ - Radiação no plano horizontal (W/m^2);

$S_{incidente}$ - Radiação incidente (W/m^2);

$S_{módulo}$ - Radiação no módulo fotovoltaico (W/m^2);

α - Altura solar;

β - Ângulo entre o plano horizontal e o painel solar.

Como se depreende da Figura 2.17, a radiação solar recolhida advém da radiação incidente numa determinada altura do ano e do ângulo de inclinação do painel fotovoltaico. Através da Equação 2.16, conclui-se que com um maior ângulo de incidência obtêm-se resultados superiores quando comparado com o painel na vertical, em que se regista um menor ângulo de incidência. Contudo, o ângulo ótimo é o ângulo de inclinação intermédio que apresenta maior capacidade de produzir energia elétrica que as duas hipóteses anteriores. O ângulo ideal varia ao longo do ano, em função das estações do ano e da localização. Portanto, o ângulo de eleição nas instalações fixas é um ângulo de valor médio anual.

Devido ao facto de Portugal continental se localizar no hemisfério norte e possuir latitudes entre 37° e 42°, os painéis devem ser direccionados para o sul geográfico com um ângulo de inclinação próximo dos trinta e três graus face ao plano horizontal terrestre. Deste modo, é possível que os sistemas obtenham uma maior taxa de conversão de energia [27].

Para uma maior precisão nos resultados finais do projeto em questão utilizou-se um ângulo de 33° na inclinação do painel fotovoltaico, tendo em conta a informação disponibilizada no website da PVGIS para a região da Covilhã. Estes parâmetros adotados possibilitam assim uma maior conversão da quantidade de energia que provém da radiação solar, visto que esta incide perpendicularmente na superfície dos módulos fotovoltaicos durante um período mais longo [29].

Os valores médios da quantidade de energia recebida na Terra, proveniente do Sol, está avaliada a nível internacional, por local, à superfície do planeta. O mapa da Figura 2.18 apresenta a energia resultante da radiação incidente em Portugal continental, em kWh/Wp, proveniente de sistema fotovoltaicos autónomos, virados a sul e com a inclinação igual à sua latitude.

Como Portugal continental se encontra no intervalo de latitudes referidas atrás, são atingidos valores de radiação solar bastante apreciáveis e deveras superiores aos apurados na maioria dos restantes países europeus. Comparativamente com a Alemanha, Portugal regista uma média de 2200 a 3000 horas de Sol por ano, enquanto, o país da Europa mais desenvolvido em termos de aproveitamento solar compreende um intervalo entre 1200 e 1700 horas de exposição solar anual. Por sua vez, no concelho da Covilhã o número médio de horas de Sol ronda as 2800 horas por ano

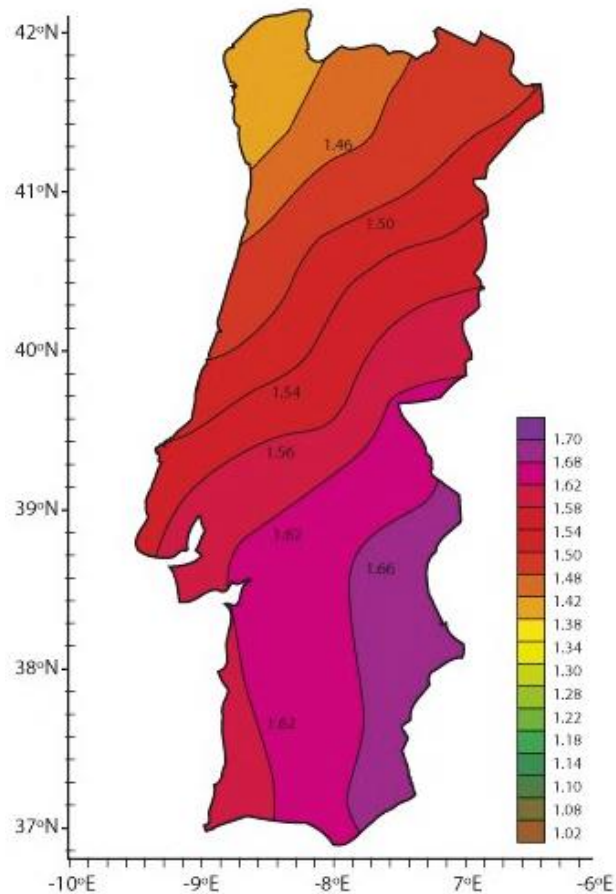


Figura 2.18 - Valores médios da energia resultante da radiação incidente em Portugal continental, em kWh/Wp (adaptado de [43]).

2.4 Tecnologia dos equipamentos fotovoltaicos

A tecnologia para o aproveitamento da energia solar tem vindo a emergir nos últimos anos como uma das tecnologias de energia renovável mais amadurecida e desenvolvida. Por essa razão espera-se que desempenhe um papel de extrema importância no global da produção de eletricidade. Ao acompanhar o rápido desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica em consideração, o presente subcapítulo documenta sistematicamente a tecnologia presente nestes equipamentos, bem como as respetivas características e fatores que possam prejudicar a produção de eletricidade. Além disso, realiza-se uma análise comparativa dos diferentes tipos de células solares e o seu progresso resumidamente. O resto do capítulo visa fornecer uma análise abrangente dos componentes destes mesmos sistemas, tal como o regulador de carga, baterias e o painel fotovoltaico em si.

Os painéis fotovoltaicos produzem eletricidade através do efeito fotovoltaico. Este fenómeno foi relatado pelo físico francês Alexandre Becquerel em 1839. O efeito fotovoltaico consiste na exposição de um material semicondutor à luz que, por sua vez, é usada para empurrar eletrões,

libertando-os a partir da superfície do mesmo sólido. Daí, surge uma diferença de potencial nos extremos da estrutura de material semiconductor.

Os materiais semicondutores são caracterizados por possuírem uma banda de valência completamente preenchida por elétrons, assim como uma banda de condução sem elétrons. Esta rutura entre as duas bandas de energia, designada por *gap* de energia, ronda o valor de 1eV, ao passo que nos materiais isoladores é de vários eletrão-volt. Assim sendo, quaisquer fótons que possuam energia superior ao *gap* do material semiconductor, ao incidir no mesmo, excitam os elétrons da banda de valência para a banda de condução.

O silício é o elemento químico predileto para a produção de células solares, visto que possui algumas propriedades químicas distintas, especialmente na sua forma cristalina. Um átomo de silício contém 14 elétrons, organizados em três camadas diferentes. As duas primeiras camadas que possuem 2 e 8 elétrons, respetivamente, estão completamente cheias. No entanto, a camada exterior apresenta-se preenchida com 4 elétrons - apenas metade. Daí que um átomo de silício procura maneiras de a preencher, e para tal tem de partilhar 4 elétrons de valência. Como representado na Figura 2.19, um átomo de silício apresenta 4 elétrons de ligação que se unem aos átomos vizinhos originando uma rede cristalina.

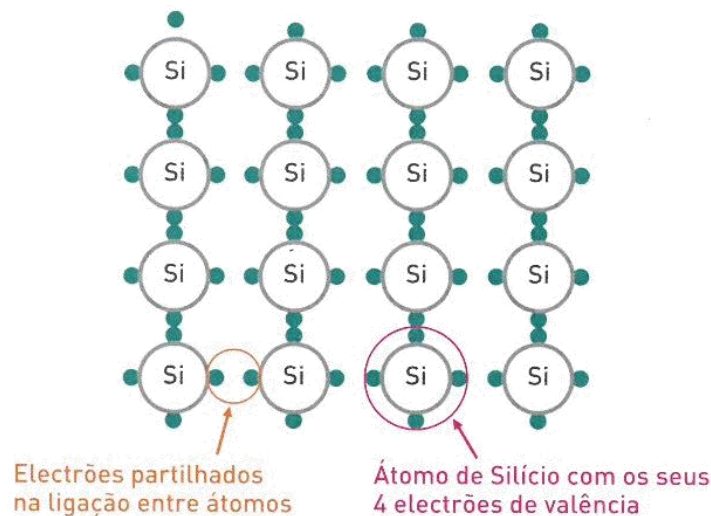


Figura 2.19 - Rede de átomos de silício [20].

O único problema que advém deste facto é que o silício cristalino puro apresenta-se como um mau condutor de electricidade porque os seus elétrons não se encontram livres para se deslocar, em contraste com os elétrons de condutores ideais, e.g. o cobre. Quando é incidida energia sobre o silício puro, alguns elétrons libertam-se e em cada caso é deixado o dito *gap*. Estes elétrons, designados portadores livres, vagueiam aleatoriamente pela rede cristalina com o intuito de procurar outro *gap* e, desta maneira, carregam uma corrente eléctrica. No entanto, existem muito poucos *gaps* no silício puro. Para resolver esta questão, o silício presente nas

células solares contém impurezas - outros átomos que foram proposadamente associados com os átomos de silício.

Ao misturar silício impuro com átomos que possuam 5 elétrões de ligação como o antimónio, também designado por estíbio, é necessário muito menos energia para libertar o electrão em excesso, Figura 2.20. Como resultado, a maioria desses electrões libertam-se para a banda de condução e obtêm-se muitos mais portadores livres do que se teria com o silício puro. O processo de adição de impurezas para melhorar a condutividade do material denomina-se dopagem. Quando dopado com Antimónio (Sb), o silício resultante é designado tipo N, "n" de negativo, devido à prevalência de electrões livres.

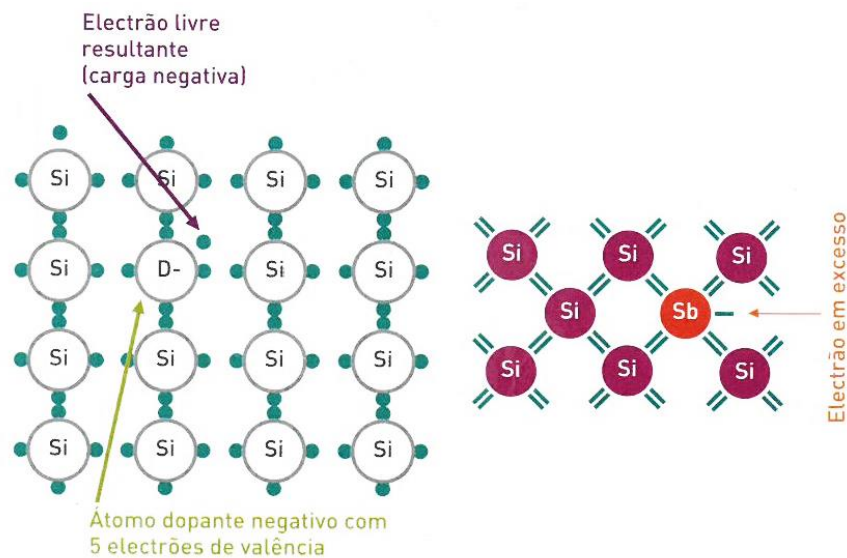


Figura 2.20 - Dopagem do tipo N (adaptado de [20]).

Da mesma forma, cargas positivas designados buracos são introduzidas ao dopar o silício com átomos que contêm menos elétrões que o silício. A outra parte de uma célula solar típica é dopada, por exemplo, com alumínio. Ao adicionar nesta rede átomos como o alumínio que têm apenas três elétrões de ligação, em vez de quatro, haverá um elétron em falta. Por conseguinte, com pouca energia é possível mover um elétron para este buraco. Assim, o alumínio designa-se dopante do tipo P como está representado na Figura 2.21.

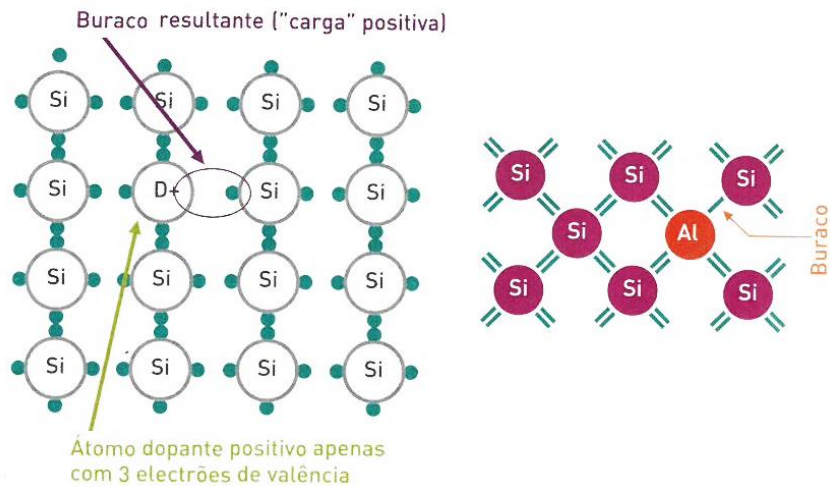


Figura 2.21 - Dopagem do tipo P (adaptado de [20]).

Como estas cargas são móveis, transportam corrente elétrica e ao juntar um semiconductor do tipo P a um do tipo N forma-se uma junção PN. Quando materiais do tipo P e do tipo N são colocados em contacto um com o outro, a junção comporta-se de maneira muito diferente do que qualquer um dos materiais por si só. Especificamente, a corrente irá fluir facilmente numa direcção, mas não na inversa, criando assim um simples díodo - Figura 2.22. O dito comportamento não-inverso resulta da natureza do processo de transporte de carga nos dois tipos de materiais [28].

Nesta junção PN os eletrões livres do lado N movem-se para o lado P. Esta migração desenrola um défice de eletrões no lado N e, por conseguinte, um acréscimo de eletrões no lado P. O equilíbrio é atingido no momento em que o campo elétrico originado obstrui o movimento dos restantes eletrões livres no lado N.

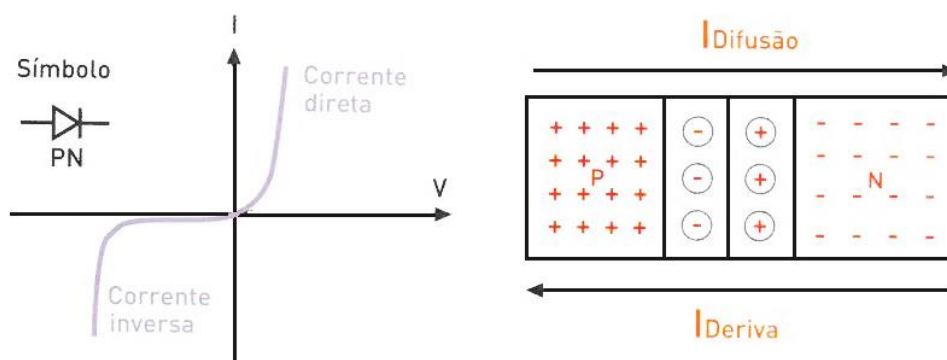


Figura 2.22 - Junção PN e a sua curva característica (adaptado de [20]).

No entanto, apenas um fóton é capaz de excitar um eletrão, havendo sempre deste modo uma demasia de energia que será dissipada em calor. Ademais, a taxa teórica de conversão em células de silício ronda os 26%. Um fator distinto, mas igualmente restrigente neste método

de conversão, é o facto de serem necessários fotões com energia maior que a energia de *gap* para converter a energia solar em eletricidade [24]. Somente uma porção do espectro da radiação solar se apresenta apta para excitar os eletrões em células de silício, numa banda inferior a $1\mu\text{m}$. No caso de fotões com energia maior que a energia de *gap* incidirem na junção PN, desenrolar-se-á a geração de pares eletrões-lacuna criando, deste modo, uma corrente eléctrica. Assim sendo, cria-se uma célula fotovoltaica.



Figura 2.23 - Estrutura da célula fotovoltaica (adaptado de [14]).

A Figura 2.24 representa uma fonte de corrente que, de igual forma, se resume a um modelo equivalente de uma célula solar.

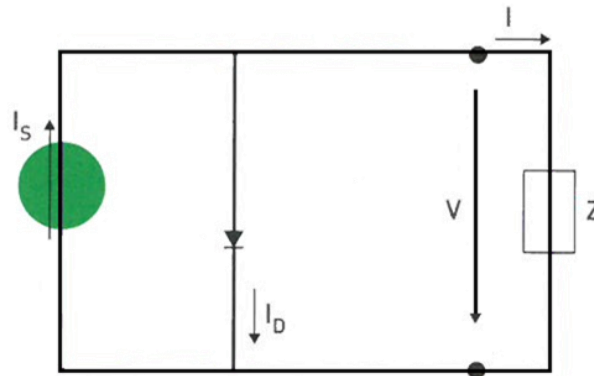


Figura 2.24 - Modelo equivalente de uma célula fotovoltaica [28].

A célula funciona como uma fonte de corrente sempre que recebe luz, ou seja, reage como um diodo, conduzindo no quarto quadrante do gráfico cartesiano. Quando é obscurecida conduz no primeiro quadrante tal como está representado na Figura 2.26.

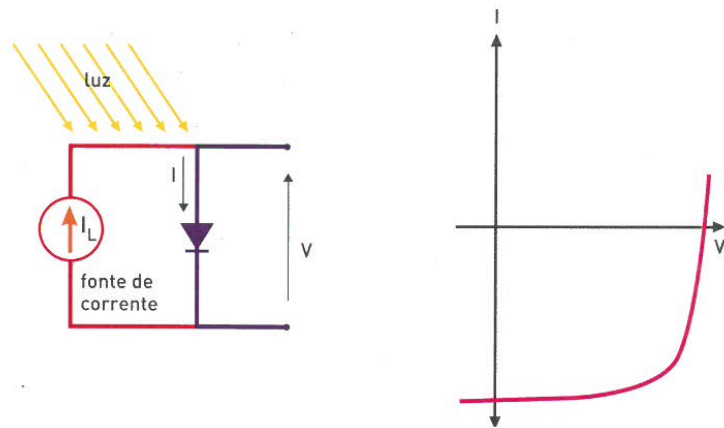


Figura 2.25 - Célula fotovoltaica iluminada (adaptado de [20]).

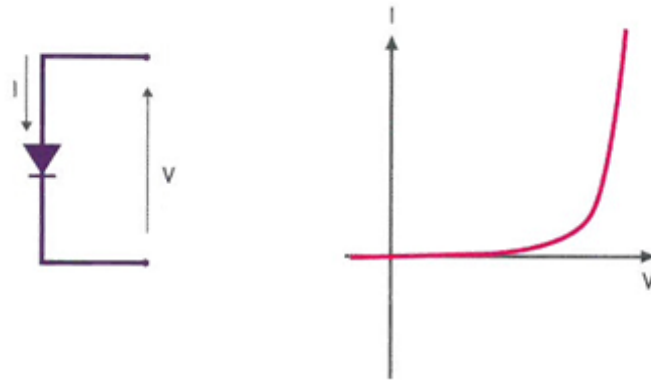


Figura 2.26 - Célula fotovoltaica escurecida (adaptado de [20]).

2.4.1 Tipos de células solares

Existe uma infinidade de variáveis que é necessário ter em conta quando se opta por um sistema de energia solar fotovoltaica. O silício utilizado nas células solares assume inúmeras formas. Enquanto existem dezenas de variações de células solares, os dois tipos mais usuais são feitos de silício cristalino (monocristalino e policristalino) e o silício amorfo. Este último tipo é utilizado em células de filmes finos que, por sua vez, exigem uma menor quantidade de material e energia no seu método de fabrico.

A diferença fundamental é a pureza do mesmo. A célula solar será mais súpura na conversão de energia solar em energia elétrica quanto mais ordenadas se apresentarem as moléculas de silício. A eficiência de painéis fotovoltaicos encontra-se diretamente relacionada com a pureza do silício, no entanto os métodos utilizados para aperfeiçoar a pureza do mesmo são bastante onerosos.

O desempenho de uma célula solar é caracterizado em termos da eficiência de um sistema fotovoltaico, ou seja, da potência produzida proveniente dos fotões incidentes. A abordagem

mais comum é obter as características corrente-tensão (I-V) e averiguar o ponto de potência máxima (MPP). Toda a área frontal do módulo fotovoltaico, abrangendo também a moldura, é tomado em conta quando se mede o respectivo desempenho. As condições de teste padrão que são utilizadas quando se determina a eficiência das células são 1000 W/m² de radiação global a uma temperatura *standard* de 25°C. Dependendo do tipo de célula solar, as taxas de eficiência rondam valores entre os 7 e os 25% - Tabela 2.1. Portanto, melhorar a eficiência das células solares e, ao mesmo tempo, manter o baixo custo por célula é um objectivo importante da indústria fotovoltaica [20].

2.4.1.1 Células de silício monocristalino

Em relação às células de silício, quanto mais puro é o alinhamento das moléculas, mais eficiente é o material ao converter a radiação solar em eletricidade. Dos três tipos de células de silício, as monocristalinas destacam-se por serem as mais eficientes com valores acima de 20% de eficiência. Os que as torna únicas é o facto de serem feitas a partir de um tipo muito puro de silício e são facilmente reconhecíveis por apresentarem uma coloração externa uniforme devido à sua alta pureza - Figura 2.29.

As células solares monocristalinas são fabricadas a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino, provenientes de fornos especiais. O método de cristalização é dispendioso e deveras complexo. O processo mais usual é o Czochralski, representado na Figura 2.27, que foi inspirado no nome do inventor. Este método consiste em fundir os lingotes de silício policristalino pelo procedimento de indução eletromagnética. Posteriormente, é arrefecido lentamente, levando à homogeneização do cristal monocristalino de silício que é depois cortado em bolachas de 0,4 a 0,5 milímetros de espessura obtendo-se, finalmente, a célula de um único cristal.

As células de silício monocristalino demonstram-se mais eficientes na produção de energia elétrica e também se apresentam mais vantajosas em termos de espaço, ou seja, é necessário menos células por unidade para produzir a mesma quantidade de energia elétrica.

As células de silício monocristalino também se destacam em relação ao tempo de vida. Muitos fabricantes oferecem garantia até 25 anos sobre esses tipos de sistemas fotovoltaicos. No entanto, esta superioridade das células de silício monocristalino vem com uma etiqueta de preço; as células monocristalinas são as mais onerosas de todas as células solares. Uma das razões para que as células de silício monocristalino sejam tão caras é o processo de corte dos quatro lados acaba por desperdiçar muito silício.

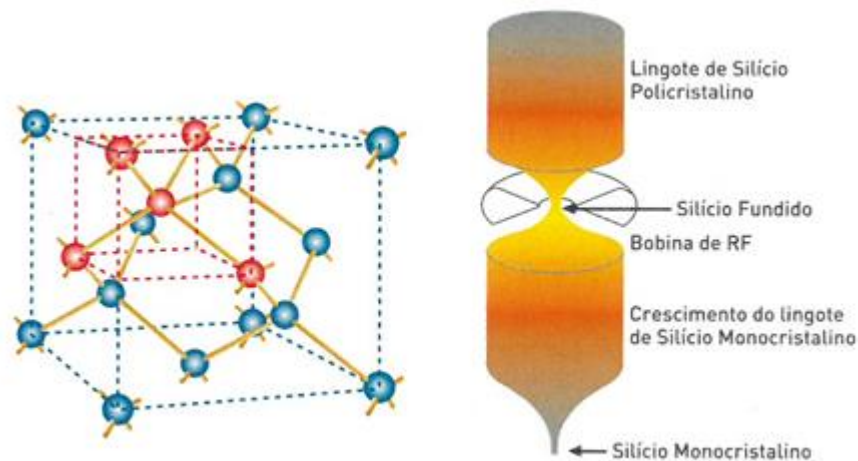


Figura 2.27 - Estrutura molecular do silício e obtenção de silício monocristalino (adaptado de [20]).

2.4.1.2 Células de silício policristalino

As células de silício policristalino foram as primeiras células solares introduzidas na indústria no início dos anos 80. Ao contrário das células de silício monocristalino, este tipo de células não requer o processo Czochralski. Em vez disso, o silício bruto é derretido e vertido para um molde quadrado onde é arrefecido. Neste procedimento, os átomos dispõem-se em cristais, concebendo uma estrutura policristalina com espaços de divisão entre os cristais, tal como está representado na Figura 2.28. Seguidamente, os lingotes são cortados em pastilhas perfeitamente quadradas para comporem as células fotovoltaicas. Desta forma, quase nenhuma porção de silício é desperdiçada durante o processo de fabrico.

Os painéis solares policristalinos tendem a ser menos tolerantes ao calor que os painéis solares monocristalinos. O calor tem um efeito negativo no respectivo desempenho e encurta a vida útil dos painéis solares. No entanto, esta discrepância entre os dois é mínima.

Os painéis solares policristalinos não são tão eficientes devido à menor pureza do silício. A eficiência dos painéis em questão é tipicamente entre 13 e 16%. Devido a esta realidade, os painéis fotovoltaicos de células de silício policristalino são também menos eficientes em termos de espaço [28].

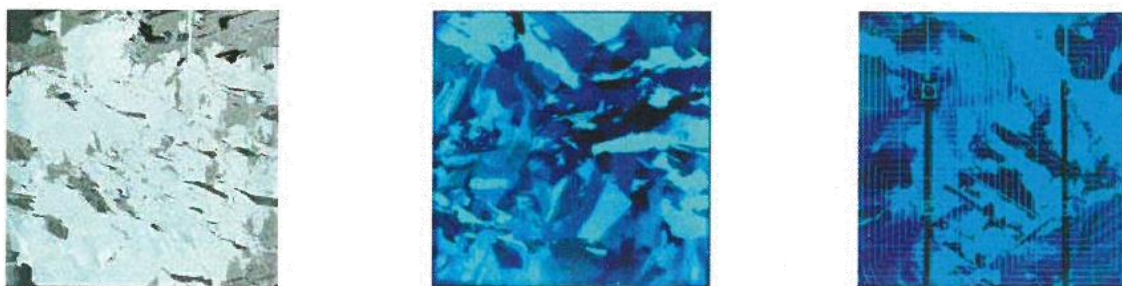


Figura 2.28 - Células de silício policristalino (adaptado [25]).

2.4.1.3 Células de silício amorfo

As células solares de silício amorfo são um tipo de células solares de filme fino. Porém, existe uma variedade de células de filme fino com algumas a registarem 15% de eficiência como está explícito na Tabela 2.1 e este tipo de células apresenta taxas de crescimento por volta dos 60% entre 2002 e 2007 [8]. As células solares de filme fino são caracterizadas pelo modo como vários tipos de materiais semicondutores, incluindo o silício, em alguns casos, se apresentam em camadas verticais. São obtidas ao depositar finas camadas de plasma de silício microcristalino sobre vidro, plásticos e diversos materiais criando assim uma série de filmes finos.

Tabela 2.1 - Rendimento dos módulos fotovoltaicos (adaptado de [20]).

Rendimento (%)			
Material das células	Ano de 2006	Actualmente	
		Em laboratório	Em produção industrial
Silício monocristalino	13 - 17	25	13 - 14
Silício policristalino	11 - 14	21	11 - 14
Silício amorfo	7	15	7

A grande vantagem desta tecnologia é o respectivo custo. A produção em massa é muito mais fácil quando comparada com os módulos baseados em silício cristalino. Como o produto em si é bastante flexível, este tipo de células é usualmente empregue em novas aplicações de tecnologias solares. O mercado das células solares de filme fino continua em expansão por todas estas vantagens, ademais, as elevadas temperaturas e o sombreamento causam menos impacto nesta tecnologia. Uma grande desvantagem deve-se ao facto desta tecnologia requerer uma grande quantidade de espaço, como representa a Tabela 2.2. Juntando ao facto de apresentar vida útil mais reduzida, este tipo de células é por vezes desadequada em sistemas residenciais.

Tabela 2.2 - Área necessária para a produção de 1kWp para diferentes células (adaptado de [20]).

Material das células	Área necessária (m ² /kWp)
Silício monocristalino	7 - 9
Silício policristalino	8 - 11
Silício amorfo	16 - 20

A tecnologia de filme fino utiliza várias substâncias, incluindo silício amorfo, telureto de cádmio, índio cobre e seleneto de gálio. Cada tipo de material é adequado para diferentes propósitos. As células solares de filme fino fabricadas com silício amorfo são, geralmente, empregues em aplicações de menor escala devido ao baixo *output* de energia elétrica. As ditas células são fabricadas pela deposição de uma película fina de silício sobre uma folha de um material distinto. O painel é então formado como uma única peça e as células individuais não são tão visíveis como nos outros tipos.

A eficiência dos painéis solares com células de silício amorfo não é tão elevada comparativamente aos de células solares individuais.



Figura 2.29 - Módulos de silício monocristalino, policristalino e amorfo, respetivamente (adaptado [27]).

2.4.1.4 Células de tripla junção

As células de tripla junção englobam-se nas células solares de múltiplas junções PN produzidas a partir de diferentes materiais semicondutores. A junção PN de cada material produz corrente elétrica em resposta a comprimentos de onda distintos. O facto de serem produzidas por diversos materiais permite uma absorção numa gama mais ampla de comprimentos de onda da

radiação solar, melhorando significativamente a sua eficiência na conversão de energia elétrica.

As células tradicionais de junção simples demonstraram, inicialmente, uma eficiência máxima de 24% tal como é apresentado na Tabela 2.3. Teoricamente, um número infinito de junções teria uma eficiência limite de 86,8% quando exposta a radiação solar altamente concentrada. Conforme referido anteriormente, as células solares de silício cristalino apresentam uma eficiência máxima de 25%, enquanto as células de multijunção demonstram desempenhos elevados na ordem dos 40% em ensaios laboratoriais.

Tabela 2.3 - Eficiência das células fotovoltaicas de multijunção [20].

Material	Tipo	Eficiência	Ano
GaAs/Ge	Junção Simples	24%	1995
InGaP/GaAs/Ge	Junção Dupla	27%	1997
InGaP/GaAs/Ge/Ge	Junção Tripla	34,2%	2001
InGaP/GaAs/Ge/Ge	Junção Tripla	37,3%	2004
InGaP/GaAs/Ge/Ge	Junção Tripla	40%	2006

No entanto, este desempenho é alcançado à custa do aumento da complexidade e do preço de fabrico. A maioria das células multijunção produzidas são de três camadas. No entanto, as células de junção tripla requerem o uso de semicondutores que podem ser sintonizados para frequências específicas. Como está representado na Figura 2.30, as células de tripla junção são geralmente constituídas por fosfeto de gálio-índio (InGaP) no topo, arsenieto de gálio (GaAs) no meio e gálio-índio-azoto-arsénio (GalnNAs) para a célula inferior.

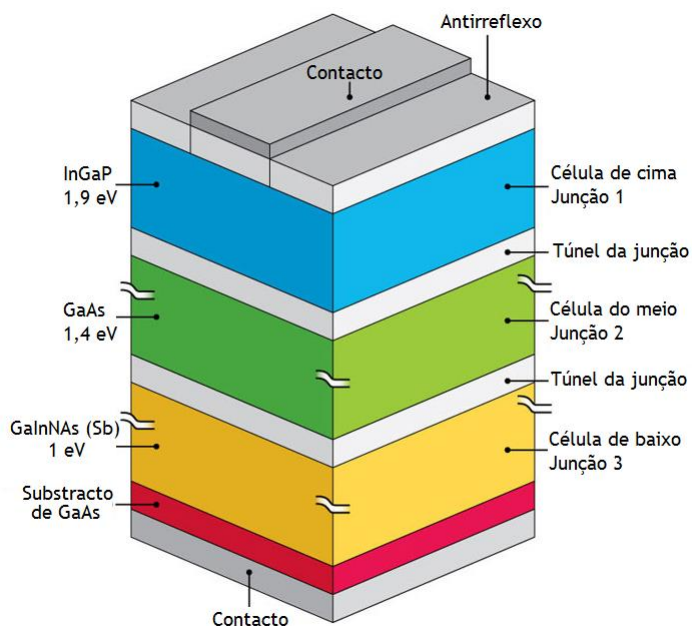


Figura 2.30 - Células fotovoltaicas de múltiplas junções (adaptado de [44]).

2.4.2 Curvas características das células fotovoltaicas

Como foi mencionado anteriormente, as células fotovoltaicas podem ser modeladas como uma fonte de corrente em paralelo com um diodo. A célula fotovoltaica comporta-se como um diodo quando não há luz presente para produzir corrente e à medida que a intensidade da luz incidente aumenta, gera-se corrente pela célula fotovoltaica. Partindo deste pressuposto, analisar a curva característica do funcionamento de uma célula fotovoltaica adquire grande importância quando se pretende esclarecer as condições ótimas do funcionamento de sistemas de produção solar. A curva da corrente em função da tensão de uma célula fotovoltaica iluminada adquire a forma representada na Figura 2.31.

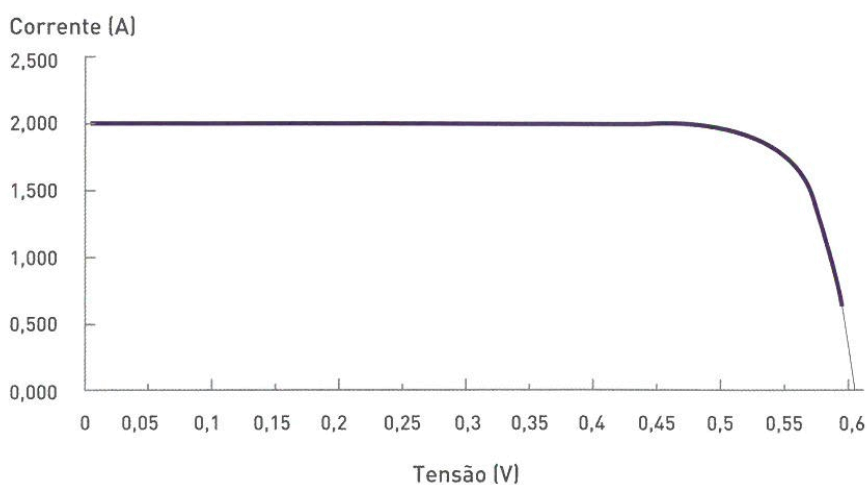


Figura 2.31 - Curva característica I/U de uma célula fotovoltaica [20].

O gráfico acima indica as características de uma célula fotovoltaica de silício que opera em condições normais de corrente e tensão. Facilmente se averigua que a corrente se mantém desde a corrente de curto-circuito, $U = 0V$, até um certo valor da resistência da carga e só posteriormente a corrente diminui. A tensão de circuito aberto, designada por U_{CA} , representa o valor da tensão quando não há qualquer carga externa ligada ao sistema e toda a corrente fotovoltaica produzida pela radiação incidente volta pelo diodo. A tensão através da carga medida varia desde zero a V_{OC} , em que diversos parâmetros de desempenho para a célula são determinados a partir destes dados.

A potência fornecida por uma célula fotovoltaica é o produto da corrente com a tensão: $I \times U$. Identicamente, ao multiplicar ponto a ponto todos os valores da tensão desde a situação de curto-circuito até à situação de circuito aberto, obtém-se a respectiva curva da potência para um determinado nível de radiação, ilustrada na Figura 2.32.

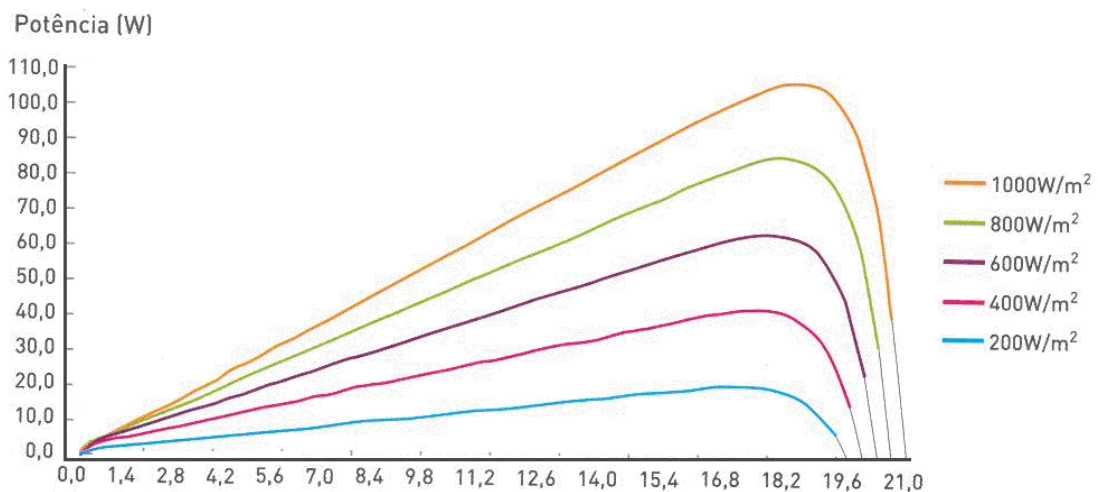


Figura 2.32 - Curvas características da potência de um módulo fotovoltaico para diversos valores de radiação solar (adaptado de [44]).

Com o intuito de obter a melhor conversão possível, para cada valor da radiação proveniente do Sol, o sistema fotovoltaico necessita de operar no ponto ótimo de máxima potência, designado por MPP. Nos pontos de I_{CC} e U_{CA} , a potência é zero e o valor máximo para a energia ocorre entre os dois pontos referidos. A tensão e a corrente no MPP são denominadas por U_{MP} e I_{MP} respetivamente, Figura 2.33.

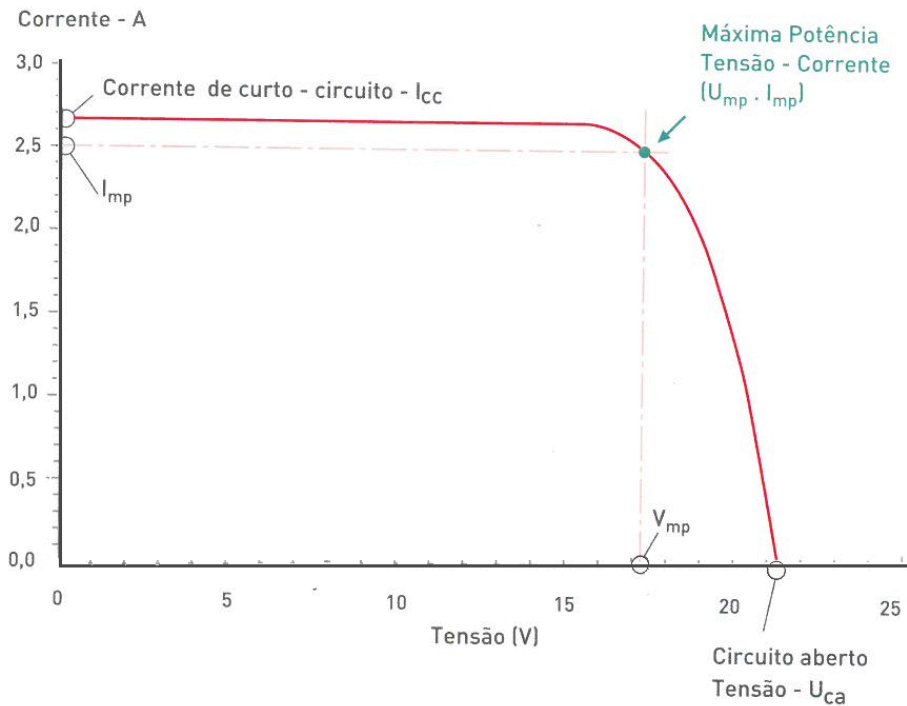


Figura 2.33 - Curva característica da potência de uma célula fotovoltaica (adaptado de [43]).

O calor excessivo reduz significativamente o *output* de um sistema solar fotovoltaico. Pode parecer contraintuitivo, mas de facto a eficiência da célula é afetado negativamente com o aumento da temperatura.

Assim como os restantes materiais semicondutores, as células solares são sensíveis à temperatura. Quando ocorre um aumento de temperatura, o *gap* do semicondutor é reduzido, influenciando assim a maior parte dos parâmetros desse material semicondutor. A diminuição do *gap* do semicondutor com um aumento da temperatura é análoga ao aumento da energia dos eletrões no material. Portanto, é necessário mais energia para quebrar a ligação [30].

Numa célula fotovoltaica, o parâmetro mais afetado pelo aumento de temperatura é a tensão de circuito aberto, U_{CA} , como demonstrado na Figura 2.34.

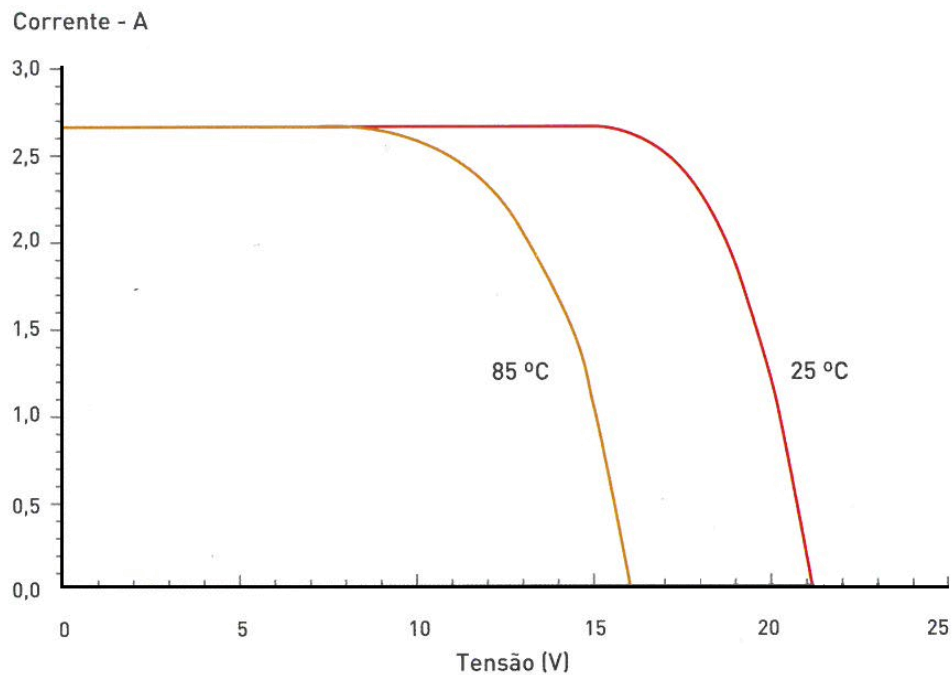


Figura 2.34 - Curvas características I/U em relação à temperatura (adaptado de [20]).

A temperatura do painel solar afeta diretamente a potência máxima de *output*. Com o aumento da temperatura da célula fotovoltaica, a corrente aumenta exponencialmente, ao mesmo tempo que a tensão de saída diminui de forma linear. Dado que a potência é o produto entre a tensão e a corrente, quanto mais quente está o painel solar menos capacidade apresenta para produzir energia.

A perda de energia devido à variação da temperatura depende também do tipo de painel solar utilizado. Tipicamente, os painéis solares baseados em células de silício monocristalino e policristalino apresentam um coeficiente de temperatura, P_{mpp} , a rondar os $-0,37$ e $-0,44\%/K$, respectivamente [30]. Entre estes dois tipos, o monocristalino demonstra ser o mais eficiente. Quanto menor o coeficiente de temperatura melhor será o desempenho do painel fotovoltaico. Por sua vez, as células de silício amorfo destacam-se ainda mais com um coeficiente de temperatura de $-0,34\%/K$, o que significa que para cada grau acima de $25^{\circ}C$, a potência máxima do painel é reduzida em $0,34\%$. A Figura 2.35 compara a potência, em Watt-pico, de células de silício amorfo e cristalino em função da temperatura.

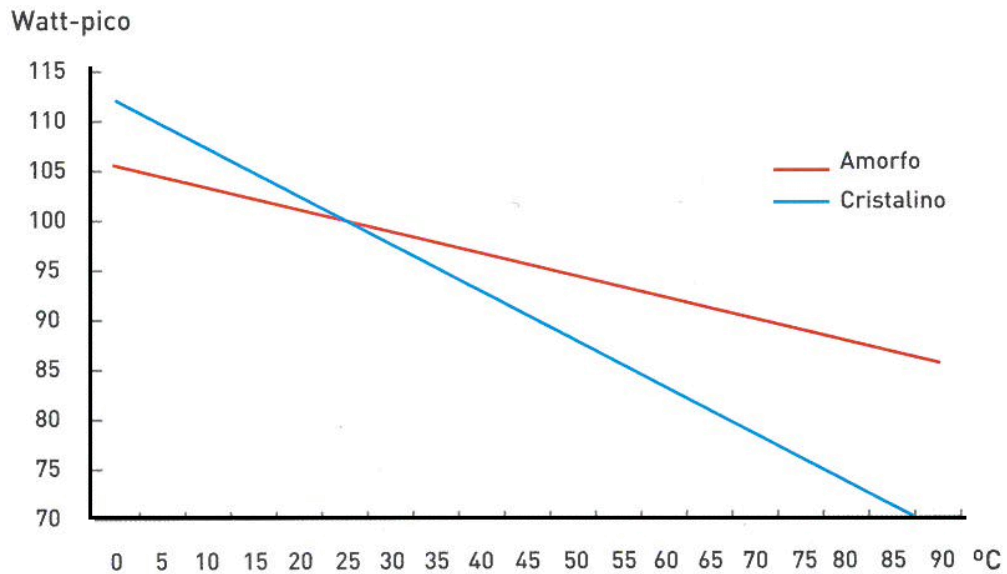


Figura 2.35 - Comparação do tipo de célula em função da temperatura [20].

2.4.3 Módulos fotovoltaicos

Um módulo fotovoltaico é um agrupamento de células fotovoltaicas. A tensão produzida por uma única célula fotovoltaica é, inconvenientemente, baixa. Ao ligarem-se várias células em série, a soma da tensão de cada célula já atinge um valor considerável. Esta ligação em série das células fotovoltaicas constitui uma unidade que se designa módulo fotovoltaico. A parte frontal é composta por uma janela de vidro de baixo teor de ferro, com elevada característica de transmissão, que protege a superfície do material fotovoltaico.

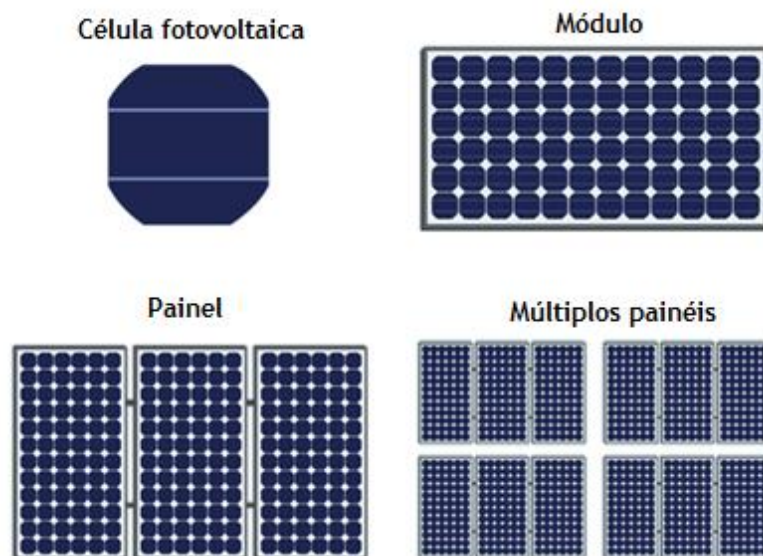


Figura 2.36 - Hierarquia fotovoltaica (adaptado de [31]).

Os múltiplos painéis fotovoltaicos, os módulos são conectados em série, em paralelo ou numa distribuição mista consoante se pretenda obter diferentes valores de tensão ou corrente [31]. Na sua construção os módulos são produzidos de forma a resistir às condições climáticas adversas a que vão estar sujeitos. Na película superficial, aparte dos aros de alumínio leves e duradouros, são utilizados vidro e Etileno Acetato de Vinilo (EVA) sendo a película translúcida de forma a não refletir a radiação solar incidente no módulo fotovoltaico - Figura 2.37.

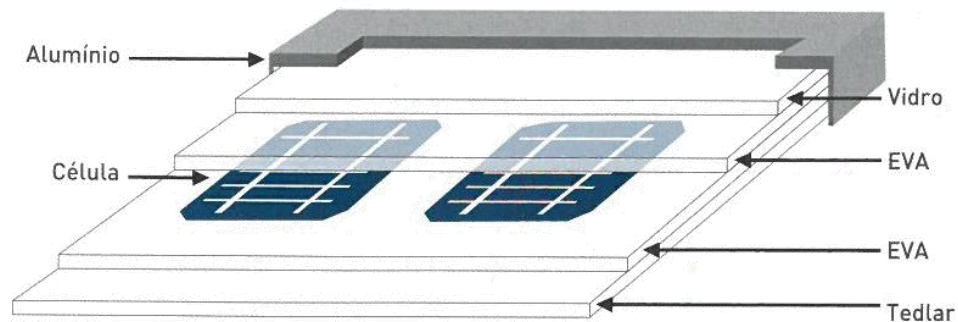


Figura 2.37 - Detalhe da construção de um módulo fotovoltaico [20].

2.4.3.1 Associação de módulos FV em série

Um circuito em série é um circuito fechado contínuo onde a corrente flui apenas num caminho passando através de todas as cargas. Nesta ligação em série, para a mesma potência, a tensão nominal do painel fotovoltaico aumenta e a respectiva corrente diminui. Este facto leva a uma redução do custo total do sistema e a uma perceptível melhoria da eficiência, visto que a secção do cabo necessário é menor. Somente os painéis fotovoltaicos com características semelhantes e com um valor de corrente idêntico devem ser ligados em série. Se entre os painéis ligados em série há um painel com corrente nominal inferior aos demais, a corrente que atravessa os restantes painéis tomará o valor do respectivo painel fotovoltaico. Uma tal redução na corrente acarreta uma redução na potência de saída e, portanto, a uma perda significativa no desempenho do sistema.

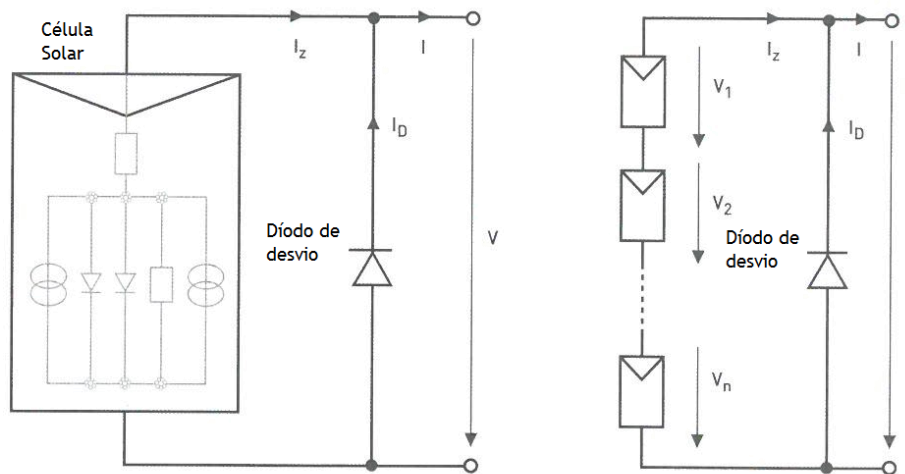


Figura 2.38 - Associação de módulos fotovoltaicos em série [20].

Da Figura 2.38 retiram-se as seguintes expressões:

$$U_T = U_1 + U_2 + \dots + U_n = n \times U \quad (2.200)$$

$$I_T = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_N \quad (2.211)$$

Ao associar módulos fotovoltaicos em série há que evitar ultrapassar a tensão máxima de associação, referenciada na ficha técnica do mesmo.

2.4.3.2 Associação de módulos FV em paralelo

Nos circuitos em paralelo a corrente tem vários caminhos para percorrer. Caso um componente no circuito se encontre obsoleto, a corrente continuará a mover-se ao longo dos restantes caminhos. Da mesma forma, apenas os painéis fotovoltaicos com uma tensão semelhante devem ser ligados entre si em paralelo. Ao conectar um painel de 15V a um painel de 24V, a tensão global será arrastada para 15V. Uma tal redução na tensão irá levar a uma redução na saída de potência e, portanto, a uma perda no desempenho do sistema.

Com a associação em paralelo adquirem-se correntes mais elevadas, preservando a tensão estipulada do módulo fotovoltaico. Assim, vem:

$$U_T = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad (2.22)$$

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N = n \times I \quad (2.23)$$

Nos casos em que se utiliza um regulador de carga MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), não é recomendado misturar painéis solares com características elétricas distintas. Pelo que diferentes potências tornam impossível para o regulador de carga determinar a tensão de funcionamento ideal, visto que são diferentes para cada tipo de painel.

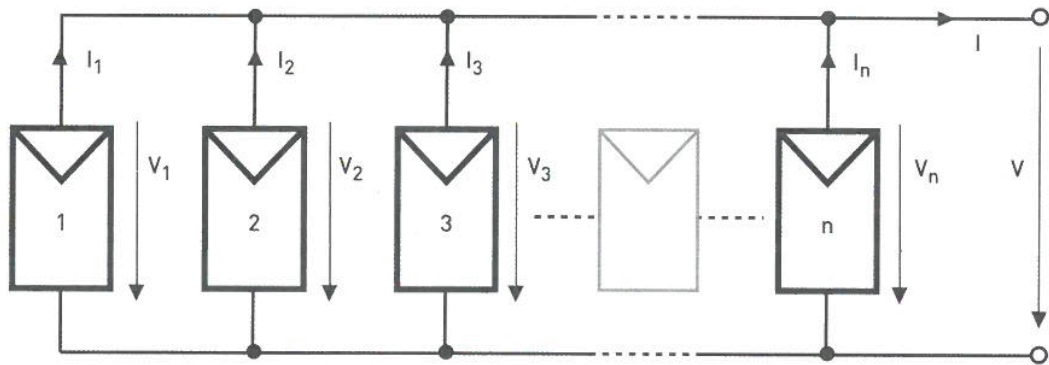


Figura 2.39 - Associação de módulos fotovoltaicos em paralelo [20].

2.4.3.3 Díodos de desvio e díodos de fileira

Os díodos de desvio, também designados por díodos *bypass*, são uma adição imprescindível para qualquer módulo fotovoltaico cristalino. A função dos díodos de *bypass* é evitar os chamados fenômenos *hot-spot* que podem danificar células fotovoltaicas. Como representado na Figura 2.40, é geralmente colocado, pelo fabricante, um diodo por 20 células fotovoltaicas. Esta configuração permite que os módulos fotovoltaicos operem com alta confiabilidade durante o respectivo período de vida.

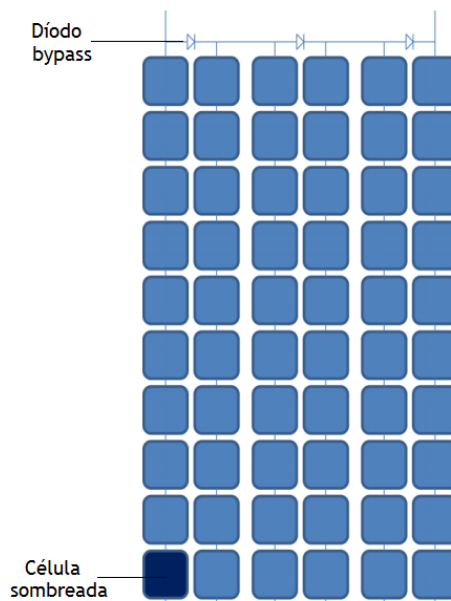


Figura 2.40 - Módulo com 60 células fotovoltaicas e 3 díodos *bypass* (adaptado de [30]).

Tal como o painel fotovoltaico empregue no presente projeto, um módulo com 60 células normalmente é construído a partir de três *substrings*, cada um protegido por um diodo *bypass*. As três *substrings* são ligadas em série formando o módulo fotovoltaico [30].

Ao tentar conduzir corrente através de uma célula sombreada a sua tensão torna-se negativa, ou seja, a célula consome energia em vez de a produzir. O consumo de energia da célula fotovoltaica faz com que a célula dissipe a energia em forma de calor, levando ao seu aquecimento, designado por *hot-spot*, e eventualmente se queime. Nestes casos a tensão da *substring* torna-se negativa e a corrente flui pelo diodo *bypass*, em vez de fluir através da célula fotovoltaica sombreada. O ponto exato em que a célula fotovoltaica consome energia elétrica em vez de produzir, difere entre os diversos tipos de células e díodos. Normalmente uma diferença de 20% entre a radiação incidente nas superfícies das células de uma *substring* é suficiente para ativar o diodo *bypass* da *substring*.

De igual forma, nos sistemas associados em paralelo são utilizados díodos de fileira com o intuito de evitar correntes inversas e curto-circuitos. Portanto, quando o sistema é composto por vários painéis solares ligados em paralelo, devem ser empregues díodos de fileira em cada ramo (*string*) ligado em paralelo.

De um modo geral, os díodos de fileira são utilizados em sistemas fotovoltaicos quando estão presentes dois ou mais ramos paralelos ou quando há a eventualidade de algum painel estar sujeito a sombreamento. O tipo e o tamanho do diodo de fileira escolhido dependem de diversos fatores. De entre os existentes, destacam-se dois: o diodo de silício de junção PN e o diodo de barreira Schottky. Ao analisar a curva característica dos díodos de junção PN, verifica-se que é necessário atingir uma tensão mínima para o diodo conduzir a corrente. Tensão essa que é imprescindível para se romper a barreira presente na junção do diodo. A barreira na junção de um diodo Schottky é inferior quando comparada com os díodos de junção PN. Um diodo Schottky, quando diretamente polarizado, demonstra uma tensão de apenas 0,25V em oposição aos díodos PN que apresentam valores na ordem dos 0,7V [30].

De acordo com a norma CEI 60364-7-712, na secção 712.512.1.1, a tensão inversa dos díodos de fileira precisa de ser o dobro da tensão de circuito aberto em STC (Condições de Teste *Standard*) [20].

$$U_{D\ inv.} \geq 2 \times U_{OC\ (CTS)} \quad (2.244)$$

Capítulo 3

3 Secagem solar de alimentos

A utilização da radiação do Sol para processos de secagem é uma das mais antigas aplicações da energia solar. Este método foi adotado desde os primórdios da humanidade com o intuito principal de preservar alimentos. Além disso era empregue na secagem de outros materiais úteis como peles de animais e materiais de construção. Esta fonte de energia era a única disponível para o Homem até à descoberta e utilização da madeira e biomassa.

Os secadores solares são, geralmente, equipamentos de pequena capacidade e baseiam-se em dados empíricos. A panóplia existente destes projetos é utilizada principalmente para a secagem de vários produtos agroalimentares, quer em pequenas comunidades remotas, quer em produção industrial de pequena escala, sendo nesse sentido que a presente dissertação foi desenvolvida.

Neste capítulo intitulado "Secagem solar de alimentos" são descritas várias aplicações da secagem a partir do Sol. Os fenómenos de secagem solar, dos numerosos secadores solares desenvolvidos, são também caracterizados juntamente com as leis gerais que regem os métodos de secagem por convecção.

A secagem de produtos agroalimentares mostra-se uma tarefa desafiante e árdua de se realizar devido às diferentes características estruturais destes produtos. A remoção da água dos produtos agroalimentares tem de ser executada sem comprometer as respectivas propriedades físicas e químicas tendo em conta a sua qualidade final. Para obter os produtos de qualidade desejados, deve-se compreender na íntegra os métodos de secagem existentes e todos os conceitos fundamentais relacionados.

3.1 Métodos de secagem

Os produtos agroalimentares são deveras sensíveis às condições de secagem. A secagem solar deve ser efetuada de forma a não afetar seriamente a cor do produto, o sabor, a textura e o valor nutritivo. Posto isto, a seleção das condições de secagem é de extrema importância.

O método de funcionamento dos secadores solares é baseado num princípio da transmissão de massa e calor, designado convecção, pelo qual a água é forçada a evaporar e esse vapor é removido naturalmente ou por convecção forçada. Assim que uma quantidade da massa de um fluido é aquecida, as respectivas moléculas movimentam-se rapidamente aumentando, desta maneira, o volume total. O princípio da convecção explica-se pelo movimento de ascensão desta massa menos densa no interior do fluido que, por sua vez, preenche a posição das massas que apresentam uma temperatura inferior. A fração mais densa do fluido, e obviamente mais fria, desloca-se para a parte inferior ocupando a posição que previamente era preenchido pela parte do fluido anteriormente aquecido. Estas correntes formadas, de convecção natural, sustentam o fluido em circulação visto que este dito processo se repete várias vezes [32].

3.2 Classificação dos secadores solares

Os secadores solares que foram concebidos e desenvolvidos são caracterizados pelas várias formas que apresentam. A escolha de um método de secagem depende do tipo de produto a secar, da disponibilidade do mesmo e do custo total do sistema. Vários métodos de desidratação e diversos tipos de secadores encontram-se comercialmente disponíveis para a secagem de uma grande variedade de produtos agroalimentares.

Os secadores podem ser classificados de vários modos como representa a Figura 3.1. Independentemente das classificações e da categorização das tecnologias de desidratação, a aplicação de uma técnica de secagem em particular depende do tipo de matéria-prima e das suas características. Geralmente, a escolha do tipo de secador solar e do método de secagem é altamente dependente da capacidade, da eficiência e do custo de investimento [33].

Os secadores solares dividem-se em duas principais categorias:

- Ativo;
- Passivo.

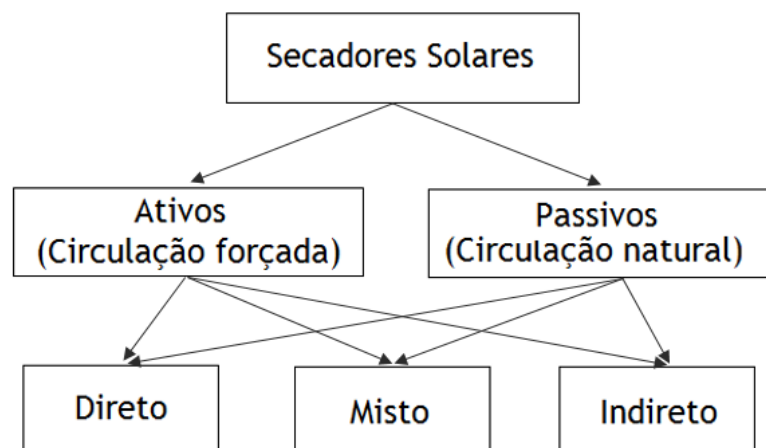


Figura 3.1 - Classificação dos secadores solares [45].

Nos secadores solares ativos, de convecção forçada, o ar quente circula através de um ventilador que normalmente é alimentado por pequenos painéis solares. Neste processo de remoção de humidade há um maior controlo de temperatura e do caudal do ar que é forçado a sair para o exterior. Nos secadores ativos, a secagem é consideravelmente rápida e não requer grandes áreas para a colocação dos produtos agroalimentares. Geralmente, os alimentos são distribuídos verticalmente em tabuleiros independentes com o intuito de aumentar a capacidade do sistema. Assim os secadores solares por convecção forçada demonstram-se adequados para grandes quantidades de produtos agrícolas [14].

Por outro lado, a secagem natural é a simples exposição dos alimentos ao Sol colocados num piso próprio que é capaz de reter calor. Este método apresenta-se bastante económico quando comparado com a secagem por convecção forçada. O facto de não ser necessário ventilador, não leva a um consumo de energia para a utilização de equipamentos complexos de secagem. Porém, este método é mais lento sendo necessário grandes superfícies de exposição dos produtos a secar, visto que no caso específico destes coletores, a gravidade apresenta-se como a única força responsável pelas correntes de convecção [34]. Outro fator a ter em conta, são as condições climáticas do local onde se pretende realizar a secagem. Estas condições são importantes uma vez que, como referido anteriormente, para obter um produto final de qualidade deve-se controlar as propriedades físicas e químicas do produto a secar. Os secadores solares passivos são os mais primitivos, a sua construção é bastante simples e barata, e geralmente são utilizados em regiões onde não existe rede elétrica [33].

Na secagem solar direta, os produtos agroalimentares são expostos por tempos prolongados à radiação solar sob as condições climáticas do local. Este método mostra-se muito demorado e a hipótese de ocorrerem contaminações devido a micro-organismos e insetos é maior. No entanto, há outro tipo de secadores solares diretos em que o produto que se pretende secar encontra-se normalmente dentro de uma tenda, estufa, ou numa caixa coberta com vidro. Assim, o produto é aquecido pela radiação solar e o ar húmido é removido pelo movimento do vento ambiente. Estes secadores aceleraram a taxa de perda de humidade e o produto está seguro contra as intempéries. Nos sistemas indiretos de aquecimento do ar de secagem é possível utilizar várias fontes de energia tornando vantajosa a utilização de ventiladores. Além disso, foram também desenvolvidos secadores solares mistos que utilizam ambos os princípios dos secadores diretos e dos indiretos.

3.3 Nota conclusiva

O processamento de alimentos através da secagem solar abriga duas tecnologias emergentes em conjunto para resolver os dois principais problemas que o Homem enfrenta: como produzir energia suficiente para uma população global em expansão e como alimentar essa população, tendo em conta que este facto apresenta uma conotação diferente no que diz respeito aos

países em desenvolvimento. Esta situação exige também uma busca de métodos mais rápidos, mais baratos e mais seguros, através da qual os alimentos possam ser conservados.

Mediante a avaliação dos vários modelos na revisão bibliográfica do primeiro capítulo, dos elementos de construção e os respectivos princípios operacionais da grande variedade de desenhos existentes de sistemas de secagem solar, este capítulo apresenta um estudo preliminar da secagem de alimentos num secador solar construído e desenvolvido para esse propósito.

O protótipo desenvolvido enquadra-se como sendo um secador solar passivo e indireto operando num esquema de convecção natural. Embora tenha um ventilador, o mesmo não foi utilizado nos testes realizados. No entanto pode ser utilizado em todas as combinações demonstradas na Figura 3.1. Os dois elementos básicos constituintes do secador solar são: o painel fotovoltaico, onde a radiação solar incide, e a resistência de filamentos que gera o calor utilizado para aquecer o ar circulante. Deste modo, os raios solares não incidem no produto localizado dentro da câmara de secagem opaca.

O método de secagem solar indireta é caracterizado pelas inúmeras vantagens que apresenta. A única desvantagem é o custo mais elevado devido ao equipamento auxiliar necessário. De facto, não há perdas no sistema e o produto final não está sujeito a qualquer fenómeno natural visto que está empilhado verticalmente em tabuleiros no interior da câmara de secagem [32].

Embora o fenómeno de convecção natural seja caracterizado pela transferência da energia interna do fluido, do mesmo modo que na convecção forçada, segundo vários estudos, verifica-se que, tanto a intensidade do movimento do fluido como os coeficientes de transferência de calor são inferiores quando comparados com os sistemas de convecção forçada. Portanto, o sistema dimensionado deve apresentar a menor resistência possível à passagem do ar no seu interior, tal como devem ser evitadas perdas de carga por alterações bruscas na direcção do fluido, tanto quanto possível [33].

Capítulo 4

4 Projeto e conceção do secador solar

O princípio de funcionamento do secador solar desenvolvido baseia-se nos conceitos de radiação e convecção atrás referidos. Com o intuito de promover a circulação do ar quente, foram acopladas à zona mais alta do secador duas saídas de ar como ilustra a Figura 4.1. Assim, o ar quente, após libertar calor na câmara de secagem, é expelido pelas forças de convecção, renovando deste modo o ar quente no interior do secador solar. Por outro lado, a renovação do ar na câmara de secagem é realizada na zona inferior do secador, por intermédio de uma abertura retangular ajustável por onde entra o ar frio do exterior. Consequentemente, assegura-se a circulação do ar no decorrer de todo o processo, promovendo a secagem dos produtos agroalimentares.

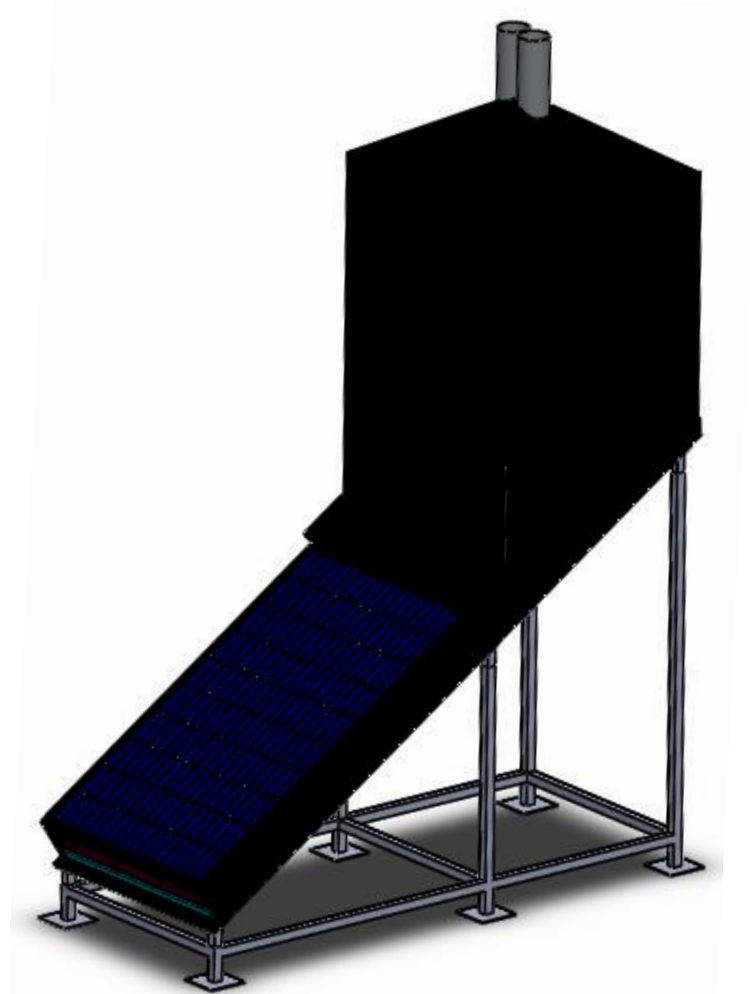


Figura 4.1 - Secador solar final com o suporte em aço inoxidável.

4.1 Componentes do sistema fotovoltaico empregue

Os sistemas fotovoltaicos, assim como outros sistemas de produção de energia elétrica, são baseados em princípios de operação e interface com outros sistemas elétricos em que também são guiados por normas bem estabelecidas e padrões elétricos.

Embora um painel fotovoltaico produza energia quando exposto à radiação solar, uma série de outros componentes são necessários para conduzir, controlar, converter, distribuir e armazenar a energia produzida pelo painel.

Dependendo dos requisitos funcionais e operacionais do sistema, os componentes específicos necessários incluem elementos de extrema importância, como um inversor de energia DC-AC, baterias e reguladores de carga.

Os equipamentos que constituem as instalações diferenciam-se por uma série de prestações e indicações elétricas. Estas instalações são constituídas essencialmente por quatro componentes indispensáveis:

- Painel fotovoltaico - componente responsável por converter diretamente a energia proveniente do Sol em energia elétrica DC;
- Regulador de carga - dispositivo eletrônico que controla a carga da bateria com a energia proveniente do painel e posteriormente regula a descarga dessa energia para os restantes equipamentos do sistema;
- Bateria - componente que acumula a energia elétrica remanescente do atual consumo do sistema no instante da sua produção pelo painel;
- Inversor - equipamento responsável por converter um sinal elétrico DC num sinal elétrico AC.

À *posteriori* são especificados ao pormenor os quatro equipamentos quanto às suas propriedades e especificações elétricas, bem como os restantes componentes indispensáveis utilizados no sistema.

4.1.1 Painel fotovoltaico

O painel fotovoltaico é constituído por células de silício nas quais ocorre a conversão direta da energia eletromagnética do Sol em energia elétrica. As características da corrente elétrica e da tensão possível de se fornecer à carga são determinadas pela quantidade de células presentes no módulo. O painel fotovoltaico utilizado apresenta 60 células de dimensão 156×156 milímetros quadrados e em que a cada 20 está colocado 1 diodo *bypass*, como representado na Figura 4.2. Desta maneira, a presente configuração reduz a possibilidade da criação de *hot-spots*.

Partindo do princípio que a luz incidente na superfície das células do módulo fotovoltaico é uniforme, cada célula produz uma tensão de cerca de 0,5V. Deste modo, a tensão em cada *substring* será de +10V e o diódo *bypass* terá 10V na sua entrada sem conduzir qualquer corrente. As células sombreadas não produzem a mesma quantidade de energia que as células não sombreadas, uma vez que todas as células de um módulo fotovoltaico estão ligadas em série e, portanto, diferenças na potência causam diferenças na tensão.

Díodos *bypass* do tipo Tyco SL1515

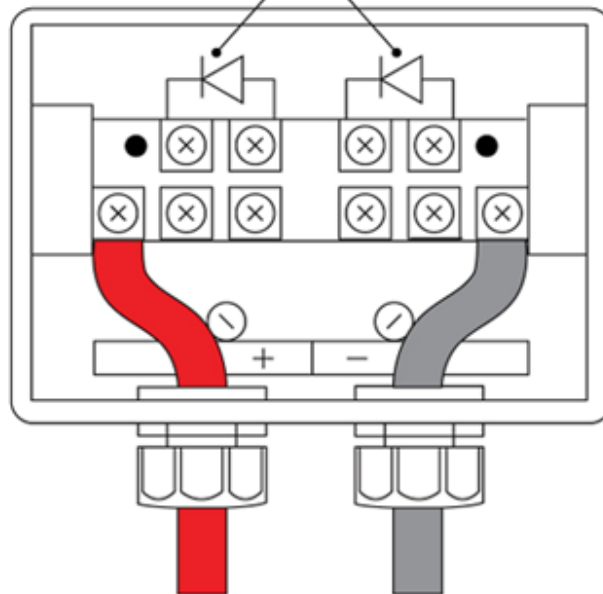


Figura 4.2 - Caixa de bornes do painel fotovoltaico (adaptado de [41]).

Na caixa de bornes encontram-se os díodos *bypass* que são responsáveis por proteger o painel contra possíveis sombreamentos das células fotovoltaicas.

Estas células encontram-se num substrato constituído por uma superfície de vidro temperado bastante resistente posicionado na face exposta ao Sol que serve de proteção. Na parte inferior encontra-se a dita caixa de bornes com a ligação elétrica dos circuitos que se pretende alimentar [20].

Pela Figura 4.3, observa-se que o substrato das células e os restantes constituintes relacionados estão distribuídos sobre um caixilho de alumínio anodizado. Desta forma, o painel apresenta a robustez imprescindível para o mesmo se poder instalar na estrutura de suporte do secador solar tendo em atenção as adversidades atmosféricas a que estará sujeito.



Figura 4.3 - Caixilho de alumínio anodizado do painel fotovoltaico utilizado.

Dos diversos parâmetros que caracterizam os painéis fotovoltaicos alguns são referidos na chapa de características enquanto outros se podem consultar na ficha técnica específica do painel fornecida pela marca. Os fabricantes apresentam uma mescla de propriedades relevantes para o estudo dos sistemas de produção fotovoltaica, assim como as características significativas para o dimensionamento dos mesmos [20].

Uma das propriedades principais dos painéis fotovoltaicos é o seu desempenho perante o aumento de temperatura. Ao observar o respectivo *datasheet*, os coeficientes de temperatura do painel fotovoltaico policristalino utilizado são:

$$P_{mpp} - 0,405 \% / K \quad (4.1)$$

$$U_{OC} - 114 mV / K \quad (4.2)$$

$$I_{SC} + 4,1 mA / K \quad (4.3)$$

Como foi referido anteriormente, a temperatura do painel solar influencia em muito a potência máxima de *output*. A Equação 4.1 aponta que o valor do coeficiente de temperatura do painel empregue no sistema é de $-0,405\%/K$. O dito valor indica que, para cada grau acima de $25^{\circ}C$, a potência máxima do painel é reduzida em $0,405\%$. Daí que, num dia quente de verão, em que a temperatura do painel solar facilmente atinge os $45^{\circ}C$, a quantidade de eletricidade produzida será 12% menor. Por outro lado, num dia ensolarado na primavera, outono ou mesmo no inverno, onde as temperaturas são mais baixas que $25^{\circ}C$, a quantidade de energia elétrica produzida será superior que o nível nominal máximo.

Portanto, na maioria dos climas no norte da Europa, onde se registam temperaturas diárias acima e abaixo de 25°C, tenderia a equilibrar-se mutuamente. Por outro lado, em locais mais perto do equador os problemas de perda por aquecimento podem tornar-se substanciais em relação ao ano inteiro; neste caso os painéis fotovoltaicos de silício amorfo são os mais adequados [30].

Tabela 4.1 - Características do painel fotovoltaico utilizado [35].

Parâmetro	Valor
P_{mpp}	250Wp
U_{mpp}	30,56V
I_{mpp}	8,21A
U_{OC}	37,84V
I_{SC}	8,85A
Rendimento	15,12%
Área por kWp	6,61m ²

No dimensionamento e manuseamento de sistemas solares fotovoltaicos deve-se ter em atenção os diversos parâmetros representados acima:

- U_{OC} - representa a tensão em circuito aberto;
- I_{SC} - indica a corrente máxima produzida pelo painel fotovoltaico exposto à luz solar quando os respectivos terminais são curto-circuitados;
- U_{mpp} - é a tensão onde um painel produz a potência máxima.

De notar que o valor de U_{OC} não pode exceder a tensão de entrada permitida do regulador de carga. Os cálculos da secção dos cabos eléctricos empregues e da protecção de *overcurrent*, *i.e.* fusíveis e disjuntores, são baseados no valor I_{SC} e deve ser classificado como no mínimo 125% da potência nominal do regulador de carga.

Como foi referido anteriormente, a radiação do Sol que incide na superfície da Terra após atravessar a atmosfera, enfraquece notavelmente. A conveniência de determinar essa quantidade de energia para se determinar e dimensionar as instalações solares deu lugar à constante solar. A constante solar indica a energia que atinge a atmosfera terrestre. Dessa energia, apenas chega à superfície da Terra, onde se encontram os painéis fotovoltaicos, 1kW/m².

O Sol fornece todos os dias a supracitada porção de energia. No entanto, fá-lo apenas durante uma faixa de horas de pico de Sol, em que o número de horas varia com a estação do ano e a localização da instalação. Para Portugal continental, tem-se:

- Norte de Portugal: 4 horas;
- Sul de Portugal: 6 horas.

De notar que as respectivas horas equivalem à média anual. Tal-qualmente, ao longo das restantes horas de radiação solar também se regista aproveitamento energético, sendo este de menor valor, tal como representa o gráfico da Figura 4.4.

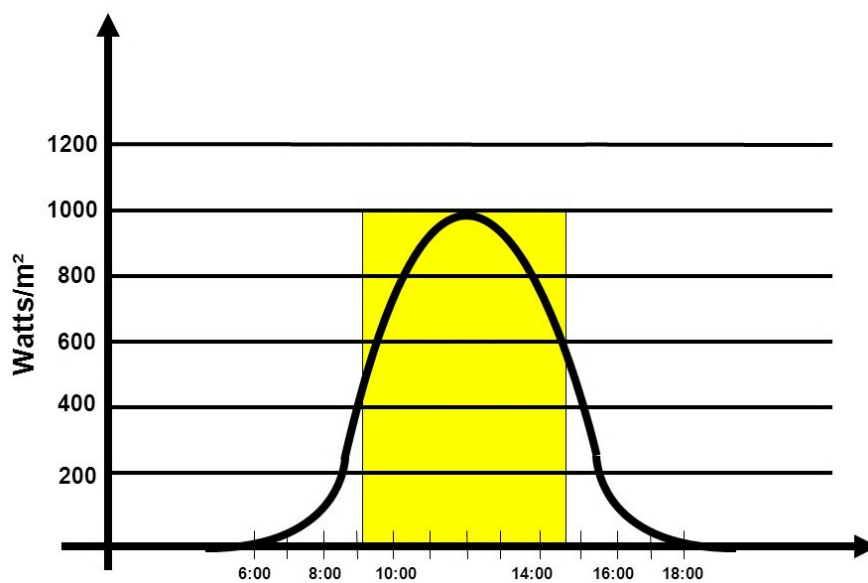


Figura 4.4 - Média das horas de pico de Sol (adaptado de [26]).

A variação da quantidade de energia solar captada em Portugal está parcialmente representada na tabela seguinte:

Tabela 4.2 - Quantidade de energia expressa em kWh/m²/d (adaptado de [20]).

Cidade	Junho	Julho	Agosto	Setembro
Bragança	6,650	7,270	6,436	4,554
Coimbra	6,194	6,700	6,160	4,579
Évora	7,053	7,631	6,958	5,126

4.1.2 Bateria

As baterias em sistemas fotovoltaicos isolados são empregues com o propósito de armazenar a energia elétrica produzida pelo painel fotovoltaico. Estes elementos armazenam a energia concebida durante as horas de radiação solar para seguidamente a fornecerem à carga assim que seja necessário, em períodos noturnos ou nublados.

O tipo de baterias recomendado para sistema de energia solar fotovoltaica são as baterias *Deep Cycle*. Este tipo de baterias é projetado especificamente para serem descarregadas para níveis de energia reduzidos e recarregadas rapidamente, ou carregadas por ciclos e descarregadas dia após dia, durante vários anos.

Diferentes elementos químicos podem ser combinados entre si para formar baterias distintas. Algumas destas combinações são de baixo custo, mas também de baixa potência. Por sua vez, as baterias de chumbo-ácido apresentam a melhor razão capacidade/preço. Estas baterias são as mais usuais em sistemas fotovoltaicos isolados de produção de energia elétrica.

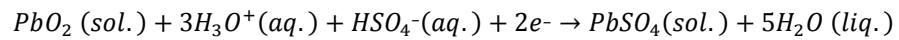
A célula das baterias de chumbo-ácido é constituída por placas de chumbo, negativas e positivas de composições distintas, suspensas numa solução de ácido sulfúrico designado eletrólito. Quando as células descarregam, as moléculas de enxofre da ligação do eletrólito com as placas de chumbo libertam eletrões. Por outro lado, quando a célula é recarregada, o excesso de eletrões retorna ao eletrólito.

As baterias tanto fornecem como armazenam energia elétrica por intermédio das reações químicas *redox*, ou seja, de oxidação-redução, que se desenrolam internamente na bateria. Isto é, as baterias convertem a energia elétrica em energia química durante a fase de carregamento e por outro lado, transformam essa energia química em energia elétrica quando a bateria é descarregada. Neste tipo de baterias existe a possibilidade do dito procedimento ser reversível, ao invés do que acontece nas pilhas não recarregáveis cuja reação química apenas se dá num sentido - durante a descarga da mesma.

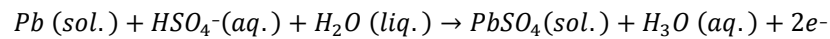
Ao longo do processo de carregamento, ocorre um aumento da diferença de potencial presente nos terminais da bateria. Por outras palavras, externamente a corrente elétrica resulta da movimentação dos eletrões ao passo que no interior da bateria a corrente provém do movimento de iões de um eléctrodo para outro. Simultaneamente, nesta fase os elementos esgotam-se gradualmente fazendo com que a reação abrande até ao ponto que a bateria se apresente impossibilitada de fornecer os eléctrodos - a bateria está descarregada. Ao inverter o sentido da corrente, a reação química também se inverte e, deste modo, carrega-se de novo a bateria.

Nas baterias de chumbo-ácido, o eletrólito é o ácido sulfúrico e os elétrodos, ou seja, as placas, são de chumbo [20]. As reações químicas que ocorrem no interior da bateria são:

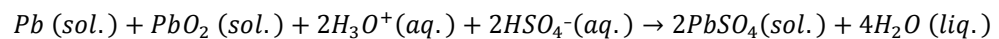
- Cátodo:



- Ânodo:



- Reação completa:



Numa típica bateria de chumbo-ácido, o valor da tensão é, aproximadamente, 2V por célula independentemente do seu tamanho.

Estas reações estão representadas nas Figura 4.5 e 4.6. De salientar que a água produzida na fase de descarregamento dilui o ácido na bateria.

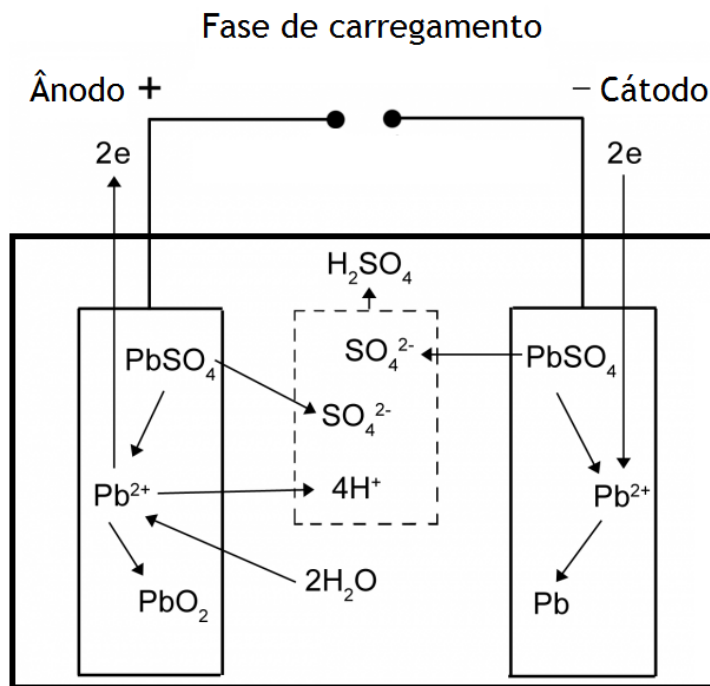


Figura 4.5 - Fase de carregamento em que o óxido de chumbo é formado no ânodo, no cátodo é formado chumbo puro e o ácido sulfúrico é libertado para o eletrólito. (adaptado de [36]).

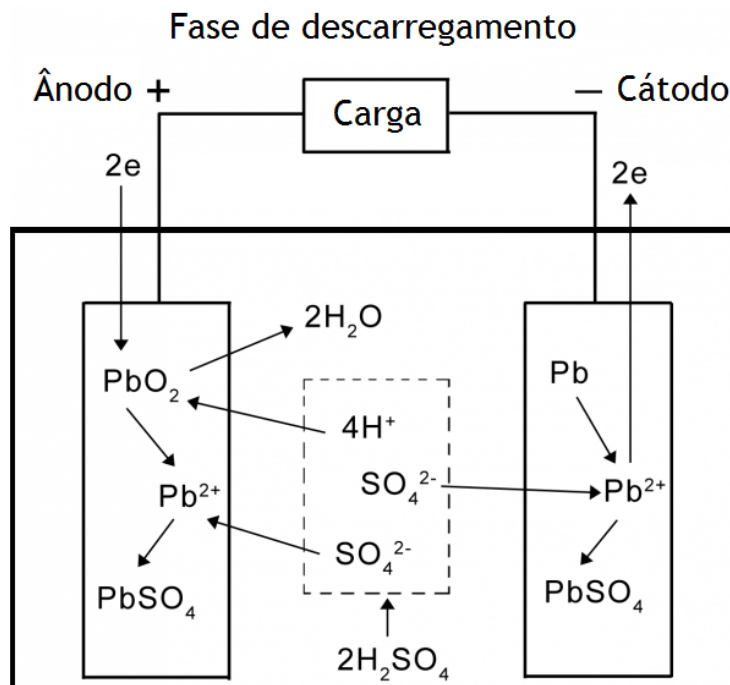


Figura 4.6 - Fase de descarregamento em que o sulfato de chumbo é formado em ambos os elétrodos e o ácido sulfúrico é removido do eletrólito (adaptado de [36]).

As baterias caracterizam-se por uma miríade de parâmetros elétricos com os quais se diferenciam umas das outras. A capacidade representa a parcela de carga que se obtém da bateria num número de horas definido, em STC, e até que o valor da tensão nos bornes atinja 1,85V por vaso. Por sua vez, a profundidade de descarga designada por DOD (*Deep of Discharge*) indica o valor máximo recomendado para a descarga da bateria. A DOD das baterias tem uma grande influência na vida útil das mesmas em relação ao número de ciclos carga/descarga, tal como representa a Figura 4.7.

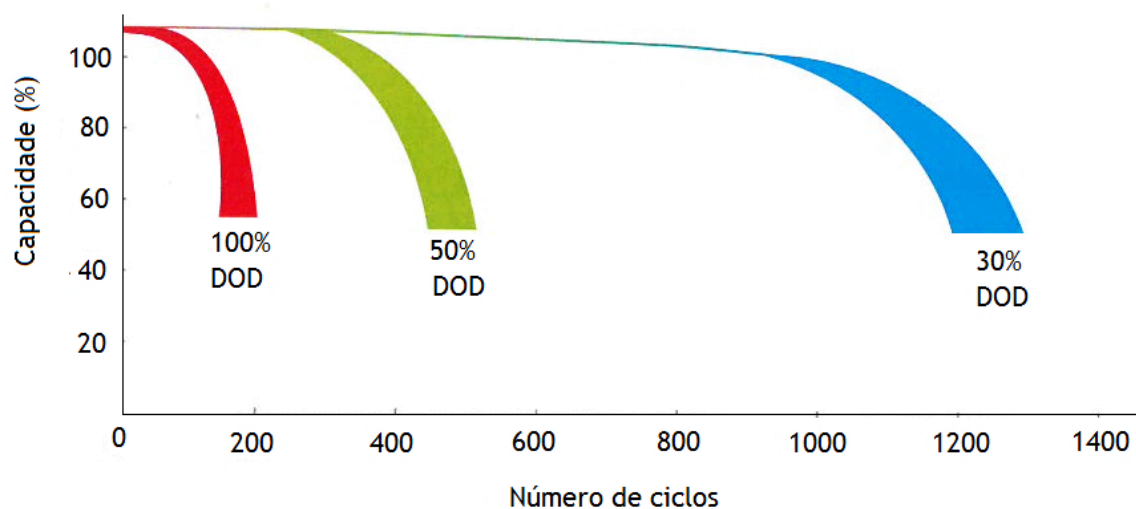


Figura 4.7 - Capacidade da bateria em função do número de ciclos de carga (adaptado de [20]).

Os ciclos de vida de uma bateria referem-se ao número de ciclos de carga/descarga completos que esta é capaz de suportar durante a sua vida útil. Assim, considera-se o ciclo de vida acabado no momento em que a bateria não demonstra uma carga acima de 80% da sua carga nominal.

O valor da capacidade total da bateria obtém-se pela seguinte equação:

$$C_p = \frac{W_d \times F}{U_n \times P_d} \quad (4.4)$$

Em que,

W_d - Consumo diário (Wh);

F - Dias de autonomia;

U_n - Tensão da bateria (V);

P_d - Profundidade de descarga.

A autodescarga refere-se à capacidade elétrica que é perdida quando não há qualquer ligação entre os eléctrodos. Esta autodescarga é causada por processos eletroquímicos no interior da

célula e é equivalente à aplicação de uma pequena carga externa. O seu valor, em percentagem e por mês, varia consoante o tipo de bateria e da temperatura a que está sujeita.

A bateria selecionada para o sistema fotovoltaico foi a Victron Gel Deep Cycle de 12V e 60Ah de capacidade, representada na Figura 4.8.



Figura 4.8 - Bateria de 12V e 60Ah utilizada [36].

Este tipo de bateria chumbo-ácido estanque designada por VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*) é selada, ou seja, o gás apenas poderá sair pelas válvulas de segurança.

As tecnologias utilizadas neste tipo de baterias VRLA dividem-se em:

- Baterias AGM (*Absorbent Glass Material*) caracterizadas por um separador peculiar de microfibras de vidro bastante poroso que absorve uma grande quantidade do eletrólito;
- Baterias de gel em que o eletrólito é um gel proveniente de uma mistura de sílica e ácido sulfúrico.

Destas duas tecnologias, as baterias de gel demonstram-se mais resistentes e por sua vez mais vantajosas. A bateria utilizada apresenta esta tecnologia. Pelo facto de não existir nenhum tipo de eletrólito líquido, não há qualquer vazamento para o exterior da bateria se esta for inclinada.

Tabela 4.3 - Características da bateria utilizada [36].

Parâmetro	Valor
Capacidade	60Ah
Tensão	12V
Dimensões	229×138×227mm ³
Peso	20kg
CCA @ 0°F	300
RES CAP @ 80°F	80

Como ilustrado a vermelho no gráfico da Figura 4.9, o tipo de bateria utilizada apresenta, em geral, 500 ciclos a 80% de descarga, 750 a 50% e 1800 ciclos a 30% de descarga.

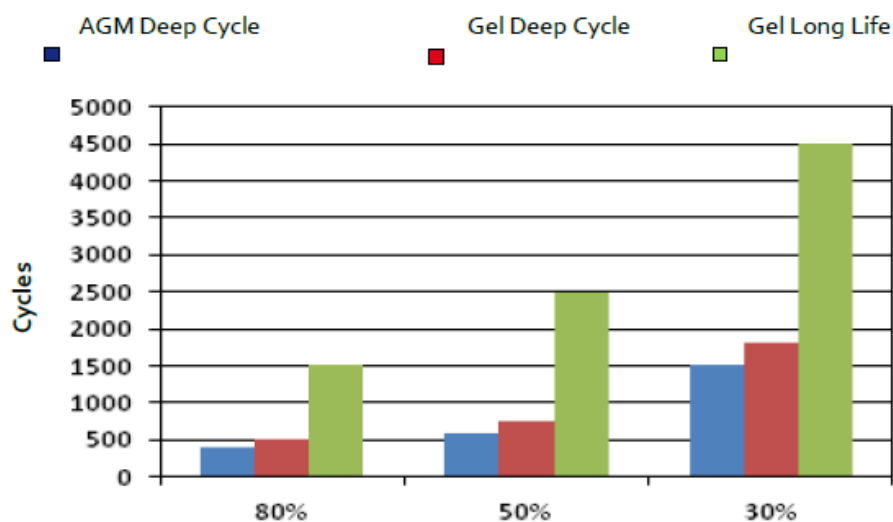


Figura 4.9- Vida útil das baterias consoante os ciclos de carga [36].

O parâmetro CCA (*Cold Cranking Amps*), exibido na Tabela 4.3, indica a corrente máxima que a bateria pode fornecer de início. Este valor é obtido com a bateria num ambiente frio de 0°F, ou seja, -18°C. É medida a descarga total, em ampere, que uma bateria totalmente carregada fornece por trinta segundos, mantendo o valor da tensão terminal igual ou superior a 1,20V por célula.

Por sua vez, o parâmetro RES CAP representa a capacidade de reserva da bateria, isto é, o número de minutos que a bateria mantém uma tensão eficaz sob uma descarga de 25A. Quanto maior for a dita classificação, maior é a capacidade da bateria para alimentar a carga. Este parâmetro é mais realista que a capacidade em ampere-hora ou o CCA, visto que é uma medida da capacidade da bateria em ciclo profundo. As baterias com elevados índices de CCA são

facilmente construídas e comercializadas a um preço acessível. No entanto a sua capacidade de reserva, RES CAP, do ciclo de vida útil da bateria é bastante desvalida.

Com a panóplia de parâmetros referentes às baterias, estas exigem proteções apropriadas e cuidados de modo a prolongar a respectiva vida útil. Os ciclos de carga e descarga das baterias, em sistemas fotovoltaicos isolados assimilam-se ao gráfico da Figura 4.10.

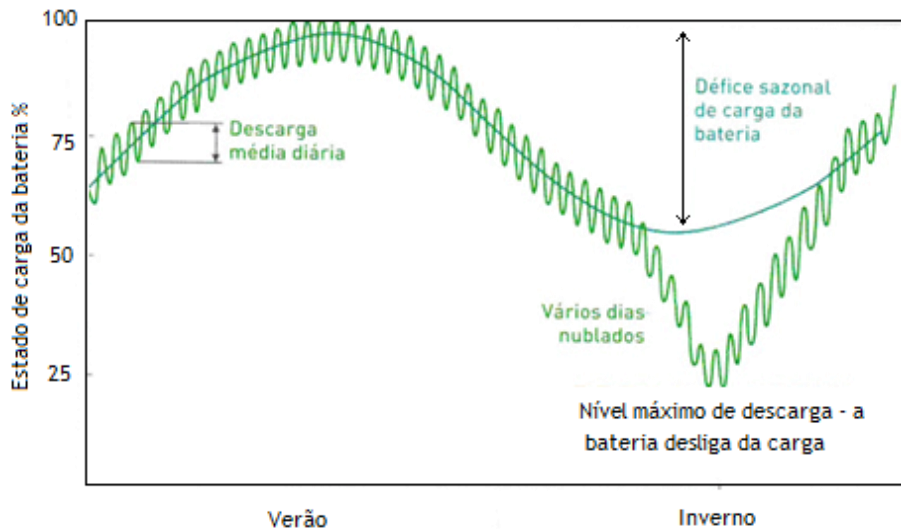


Figura 4.10 - Ciclos de carga de descarga em sistemas fotovoltaicos isolados (adaptado de [20]).

Com o intuito de evitar que as baterias se descarreguem completamente utilizam-se reguladores de carga peculiares que se encarregam da respectiva função de controlo.

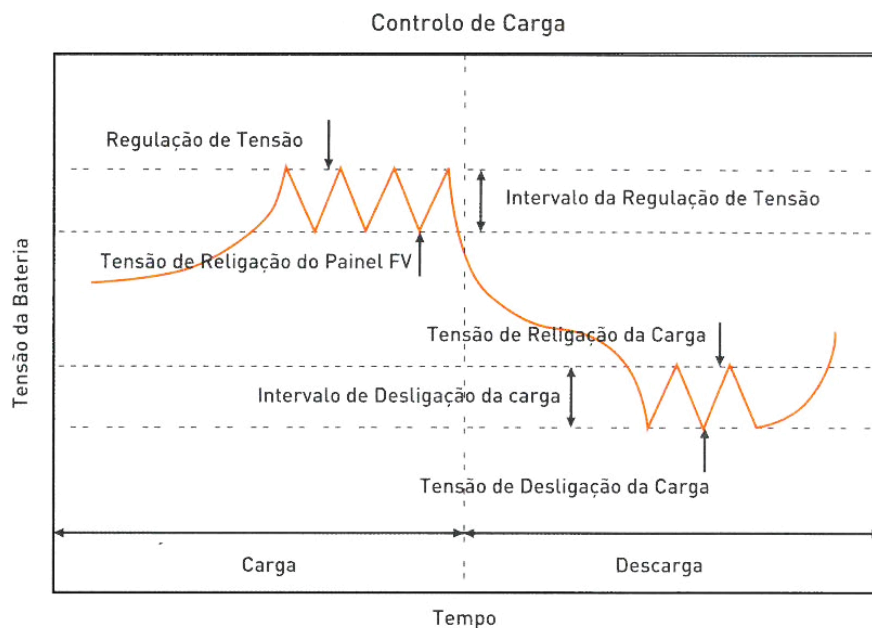


Figura 4.11 - Controlo de carga e descarga de uma bateria [20].

4.1.3 Regulador de carga

O regulador de carga constitui um componente essencial em qualquer sistema de produção de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos com uma bateria acoplada. O dito elemento controla o fluxo de corrente de e para as baterias uma vez que o ponto máximo ou mínimo de carga e descarga for atingido. Desta forma, o regulador tem o papel importante de impedir que as baterias sofram uma descarga excessiva ou um sobrecarregamento.

Como a maioria das baterias dificilmente se recuperam após exceder a DOD, a integração de reguladores de carga em sistemas fotovoltaicos é imprescindível impedindo essa casualidade e, desta forma, prolongando a vida das baterias.

Os dois tipos de reguladores de carga mais utilizados em sistemas de energia solar fotovoltaica são os de *Pulse Width Modulation (PWM)* e os *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*. Os dois tipos de reguladores distinguem-se, essencialmente, pelo modo como procuram o ponto de potência máxima do módulo fotovoltaico. Sem descurar as questões relacionadas com a gestão da carga da bateria, os reguladores de carga são essenciais para otimizar a potência de saída do módulo [37].

Se a otimização da capacidade de carga fosse o único fator a ter em conta na escolha do regulador de carga, o predileto seria o regulador de carga MPPT. No entanto, as duas tecnologias são diferentes e cada uma apresenta as suas próprias vantagens. A decisão depende de diversas variáveis, como as condições do local, os componentes do sistema, as características do painel e da carga e, finalmente, o custo do sistema em geral [31].

Os reguladores de carga de Modulação por Largura de Pulso são caracterizados pelo seu método de carregamento flutuador, ou seja, ao invés de uma saída contínua do regulador, é transmitida uma sequência de pulsos curtos de carregamento para a bateria. Essencialmente os reguladores PWM funcionam como um *switch on-off* bastante rápido. Este tipo de reguladores de carga averigua incessantemente o estado da bateria para *à posteriori* definir o quão rápido é necessário transferir pulsos - daí se designar Modulação por Largura de Pulso. O regulador de carga PWM apura o estado de carga da bateria entre os ditos pulsos e ajusta-se gradualmente [28].

Este tipo de ajuste, que reduz o valor da tensão proveniente do painel fotovoltaico para um valor semelhante ao da bateria, resulta numa diminuição da eficiência do sistema. Com os reguladores de carga PWM, o painel fotovoltaico não carrega a bateria no seu ponto de potência máxima (MPP) e devido a esse fato o sistema desperdiça energia. No gráfico seguinte da Figura 4.12, observa-se que a área do MPPT de cor azulada, que é o resultado do produto de U_{mpp} com I_{mpp} , é cerca de 30% maior que a área do PWM, resultante da multiplicação de U_{bat} com I_{sc} .



Figura 4.12 - Comparação entre os dois tipos de reguladores de carga [38].

No entanto, o regulador MPPT é mais sofisticado e conseqüentemente mais oneroso. O dito regulador de carga ajusta a respectiva tensão de entrada para recolher a energia máxima oriunda do painel fotovoltaico e, em seguida, monitoriza automaticamente essa energia com o propósito de carregar a bateria de acordo com o algoritmo do regulador. Essencialmente separa a tensão do painel e a tensão da bateria de modo a que uma bateria de 12V possa estar ligada ao regulador de carga MPPT e simultaneamente ao painel a produzir 36V, tal como apresentado na Figura 4.13.

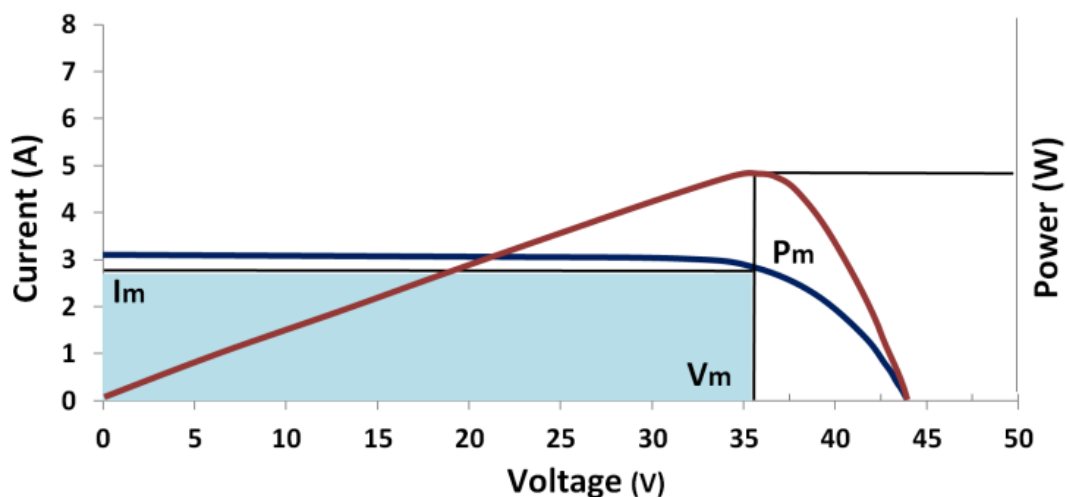


Figura 4.13 - Corrente e tensão de saída do painel fotovoltaico utilizado (adaptado de [38]).

Portanto, o regulador MPPT é um conversor eletrônico DC-DC que otimiza a relação da tensão do painel fotovoltaico e da bateria; converte a tensão de saída mais elevada DC proveniente do painel fotovoltaico para uma tensão mais reduzida necessária para carregar as baterias.

Como o parâmetro mais importante no carregamento das baterias é a corrente, o algoritmo do regulador converte a tensão do painel para um valor ótimo obtendo o máximo de corrente adequada para a bateria, Figura 4.14.

O referido controlo da carga ocorre através de um microcontrolador programado para regularmente proceder à medição e leitura destes valores de corrente e tensão através de um algoritmo designado *Hill Climbing*. Este algoritmo persegue o ponto máximo de potência da respectiva curva do gráfico da corrente em função da tensão do painel fotovoltaico, como está ilustrado na Figura 4.15.

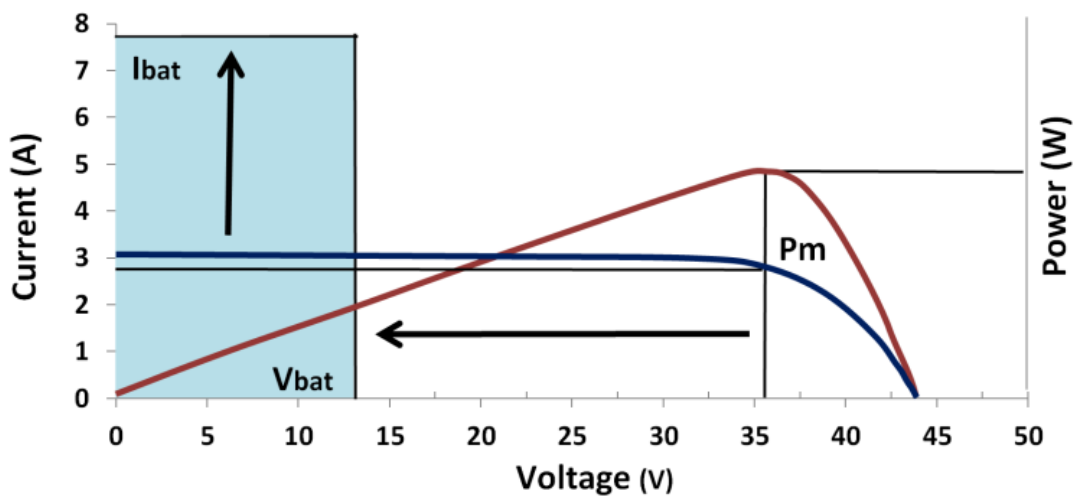


Figura 4.14 - Corrente e tensão de saída do regulador de carga MPPT (adaptado de [38]).

Tendo em conta que a bateria utilizada é de 12V, o regulador de carga recebe 17,6V com uma corrente de 7,4A e transforma-a. Deste modo, a bateria recebe 10,8A a 12V. Idealmente, para uma conversão de energia a 100% obter-se-ia aproximadamente 11,3A a 11,5V, mas para tal seria necessário fornecer à bateria uma tensão mais elevada para forçar a corrente.

Da linha representada na Figura 4.15 observa-se um pico no canto superior direito que representa o ponto máximo de potência. De facto, esse ponto move-se continuamente ao longo do tempo e em torno das mudanças da radiação solar.

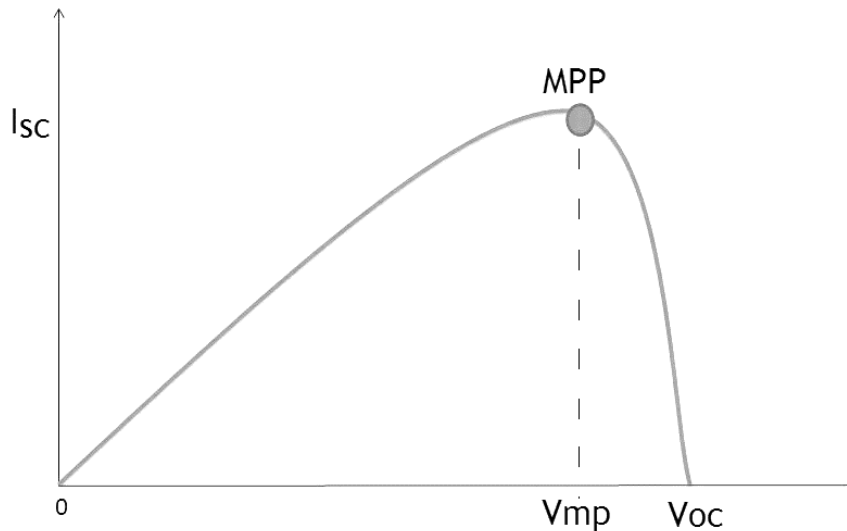


Figura 4.15 - Representação do ponto máximo de potência determinado pelo regulador de carga MPPT (adaptado de [31]).

Os reguladores de carga MPPT apresentam um rendimento bastante alto, a rondar os 93-97% na conversão. Geralmente, obtém-se um ganho de 20 a 45% de energia no inverno e 10-15% no verão. No entanto, este ganho depende de vários fatores como as condições meteorológicas, a temperatura, o estado de carga da bateria, *etc.* [37].

Consoante as características já conhecidas dos componentes a utilizar, é possível, através de cálculos numéricos, comparar os dois tipos de reguladores de carga. Sabendo que o painel fotovoltaico utilizado é caracterizado por:

$$P_m = U_{mpp} \times I_{mpp} = 30,56 \times 8,21 = 250,89 \text{ W} \quad (4.5)$$

E a bateria por:

$$\text{Tensão} = 12\text{V} \quad (4.6)$$

$$\text{Capacidade} = 60\text{Ah} \quad (4.7)$$

O painel fotovoltaico, no respectivo pico de potência, apresenta-se capaz de fornecer 30,56V com 8,21A, ou seja, 251W.

Ao multiplicar a tensão da bateria pela sua capacidade, obtém-se 720Wh e ao dividir esse valor por 251W conclui-se que em, aproximadamente, 3 horas com radiação equivalente a 1000 W/m² a bateria estaria carregada.

No entanto, o regulador de carga PWM reduz a tensão do painel para 13,7V mantendo o valor da corrente em 8,21A. Portanto, o produto desses dois valores resulta em 112,47W o que

significa que, dividindo 720Wh por 112,47W, o tempo necessário para carregar a bateria seria mais de 6 horas.

Distintamente dos reguladores de carga PWM, os do tipo MPPT utilizam a tensão máxima fornecida pelo painel fotovoltaico e ajustam a sua carga de saída consoante a tensão da bateria do sistema, ou seja, entrega à bateria uma corrente de 18,31A:

$$\frac{205,89W}{13,7V} = 18,31A \quad (25)$$

Sendo assim vem:

$$\frac{720Wh}{18,31A \times 13,7V} = 2,87 \text{ horas} \quad (4.9)$$

Com o regulador de carga MPPT, a bateria estaria carregada em, aproximadamente, 3 horas. Estas grandezas não são propriamente exatas, pois foram considerados valores de potência plena e as perdas do sistema foram também desprezadas.

Posto isto, o regulador de carga empregue foi o BlueSolar Charger MPPT 75|15 produzido pela Victron Energy, apresentado na Figura 4.16. O dito regulador de carga suporta uma tensão máxima de circuito aberto do painel fotovoltaico de 75V e um *output* máximo de 15A, Tabela 4.4. Ademais, reconhece automaticamente a tensão das baterias de 12V ou 24V [38].



Figura 4.16 - Regulador de carga utilizado - BlueSolar Charger MPPT 75|15 [38].

Tabela 4.4 - Características do regulador de carga utilizado [38].

Parâmetro	Valor
Tensão da bateria	Seleciona automaticamente 12/24V
Corrente de carga nominal	15A
Potência máxima do PV	400W
Desconexão automática da carga	Sim, carga máxima de 15A
Rendimento máximo	98%
Consumo do regulador de carga	10mA
Algoritmo do carregamento	3 distintos

Por defeito, o algoritmo utilizado pelo dito regulador de carga designa-se *Battery Life Algorithm*. No entanto, há mais dois algoritmos com *set-points on/off* já pré-definidos que podem ser escolhidos com um *jumper* entre os *pins*. Caso se pretenda alterar esses valores *on/off* há ainda a possibilidade de conectar o regulador de carga ao computador e criar o algoritmo personalizado com níveis *switch on* e *switch off* programáveis.

Caso o regulador de carga não seja capaz de recarregar totalmente a bateria num dia, vai-se repetir continuamente o ciclo entre os estados *partially charged* e o estado *end of discharge*. Este *modus operandi* destrói a bateria de chumbo-ácido dentro de semanas. O dito algoritmo, *Battery Life Algorithm*, monitoriza o estado de carga da bateria e, se necessário, aumenta diariamente e ligeiramente o nível de carga de desconexão, *i.e.* desconecta a carga mais cedo até que a energia solar recolhida seja suficiente para recarregar a bateria a 100%. Desse ponto em diante, o nível de desconexão da carga vai ser modulado de modo a que uma recarga de quase 100% seja alcançada uma vez todas as semanas.

Quanto à escolha do regulador de carga a utilizar, a tensão em circuito aberto e a corrente do painel fotovoltaico, quando multiplicado por fatores de 1,2 e 1,25, respectivamente, não podem ser superiores à tensão e à corrente máxima do regulador [39], ou seja:

$$U_{OC} \times 1,2 = 37,84 \times 1,2 = 45,408 \text{ V} \quad (4.10)$$

$$I_{SC} \times 1,25 = 8,85 \times 1,25 = 11,0625 \text{ A} \quad (4.11)$$

Para o painel fotovoltaico utilizado, com $U_{OC} = 37,84V$ e $I_{SC} = 8,85A$, o regulador de carga deverá suportar, aproximadamente, 45V e 11A. Ao analisar o *datasheet* do regulador de carga retira-se que:

- Valor máximo da tensão: $75V > 45V$
- Valor máximo da corrente: $15A > 11A$

Segundo o *datasheet* do regulador de carga empregue, o valor I_{SC} do painel deve ser no mínimo 125% da potência nominal do regulador [37]. Portanto, para o dito regulador de 15A, o valor máximo do parâmetro I_{SC} deverá ser 12A:

$$12A \times 1,25 = 15A \quad (4.12)$$

Logo, comprova-se que este regulador de carga pode ser utilizado com o painel fotovoltaico, visto que o valor I_{SC} do painel utilizado é de $8,85A < 12A$.

Ou seja, para um regulador de carga de 30A, a corrente I_{SC} máxima permitida será 24A ($24A \times 1,25 = 30A$). Quanto ao valor U_{mpp} , este deve ser superior, mas próximo, à tensão máxima da bateria.

4.1.4 Inversor

O inversor é um componente essencial num sistema fotovoltaico, visto que é o elemento responsável pela conversão efetiva da saída em DC dos painéis fotovoltaicos para AC sinusoidal com a frequência necessária de 50 ou 60Hz. O dimensionamento ótimo de um inversor depende da saída do painel fotovoltaico que, por sua vez, varia conforme o clima local, a orientação da superfície e a inclinação do painel.

Uma redução na intensidade da radiação que atinge a superfície do painel reduz a sua potência de *output* para um valor inferior à sua capacidade nominal. Assim, o inversor opera em condições de carga parcial com uma eficiência do sistema reduzida se o inversor não for adequadamente dimensionado. Para um melhor desempenho do sistema fotovoltaico, a capacidade nominal do inversor deve ser maior que a capacidade nominal do sistema, com o intuito de impedir possíveis sobrecargas [40].

Os inversores autocontrolados, fundamentados na tecnologia eletrônica dos transístores MOSFET, IGBT e nos tirístores GTO são os mais apropriados para sistemas fotovoltaicos isolados, Figura 4.17.

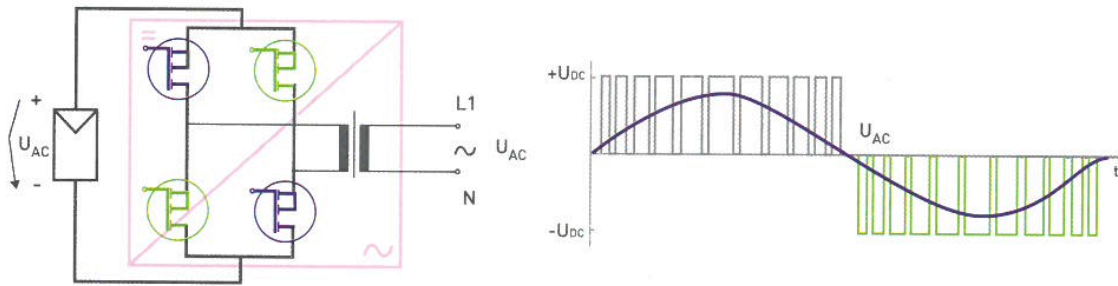


Figura 4.17 - Inversor com transformador autocontrolado [20]

Pela relação da potência de entrada com a potência à saída do inversor obtém-se o rendimento da conversão DC-AC pela fórmula:

$$\eta = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (4.13)$$

Em que,

η - Rendimento (%);

P_{AC} - Potência de saída efetiva (W);

P_{DC} - Potência de entrada efetiva (W).

Conforme representado na Tabela 4.5, o valor habitual do rendimento dos inversores para sistemas isolados situa-se entre 86 e 95%. A seleção do inversor depende das suas características ótimas tal como o rendimento, a regulação da frequência, baixas perdas de *standby*, o fator de correção de energia, a facilidade de manutenção, o custo e a fiabilidade. Uma característica distinta do inversor de alta produtividade é a sua capacidade de se reconfigurar automaticamente para produzir energia contínua no caso de alguma eventualidade. No nível mais baixo de radiação solar, o inversor redimensiona automaticamente a sua solução modular para coincidir com a potência dos painéis fotovoltaicos [40].

Tabela 4.5 - Características do inversor utilizado [40].

Parâmetro	Valor
Potência contínua AC a 25°C	180VA
Potência contínua a 25°C/40°C	175W/150W
Potência máxima	350W
Tensão de saída AC/ Frequência	110VAC ou 230VAC/50Hz ou 60Hz
Tensão de entrada	10,5-15,5/21-31/42-62V DC
Potência zero na carga	2,6W
Rendimento	87%

Na Figura 4.18 está ilustrado o inversor de 12V e 180VA utilizado.



Figura 4.18 - Inversor de 12V e 180VA utilizado [40].

4.2 Protótipo

Para a construção do secador solar foi necessário ter em conta alguns fatores. Fatores estes que condicionaram a construção do mesmo e limitaram também a sua dimensão. O secador solar foi dimensionado com o propósito de ser utilizado maioritariamente pelos produtores agrícolas da região. Em relação ao painel, a posição em que convém ser instalado é bastante importante para qualquer sistema fotovoltaico. Este posicionamento deve ser feito de modo a aproveitar o máximo da exposição direta à radiação solar durante todo o ano.

A cidade da Covilhã localiza-se numa latitude de 40,37°. Daí o painel fotovoltaico utilizado estar inclinado a 32° e orientado a sul para um maior aproveitamento da radiação solar, segundo o site PVGIS. Ao evitar possíveis sombreamentos, acumulação de sujidade e porventura acumulação de neve na superfície do painel fotovoltaico aumenta-se, substancialmente, a eficiência de todo o sistema [29].

Outro aspeto que se tomou em consideração foi a mobilidade do mesmo. O secador solar foi então dimensionado por módulos e sistemas de encaixe. Deste modo é possível ajustar a secção de entrada do ar, como representa a Figura 4.19, alterando a altura do painel.

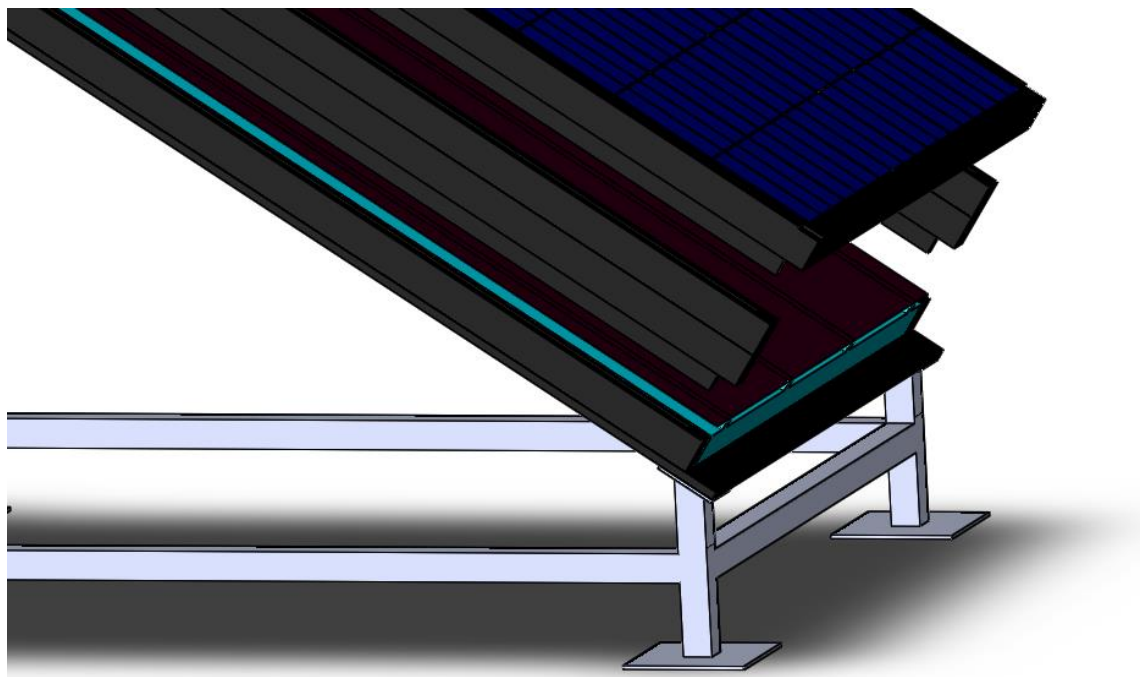


Figura 4.19 - Detalhe do sistema de encaixe utilizado no secador solar representado em SolidWorks™.

Apesar de parecer lógico e racional a construção de secadores solares de grandes dimensões, de imediato se repara na impossibilidade e impraticabilidade do mesmo. Um dos maiores impedimentos dessa medida é a complexidade que o seu transporte acarreta e a instalação de tais sistemas [23]. Por conseguinte, o secador dimensionado foi construído a partir de material de tamanhos pré-estabelecidos pela indústria, o que constitui desde logo um critério decisivo nas dimensões máximas do presente secador. O projeto teve em conta as proporções que permitiram a utilização desses materiais com o mínimo de perdas possíveis, baseado, portanto, nas dimensões máximas padronizadas dos fabricantes de materiais isolantes, placas de MDF, perfis, painel fotovoltaico, etc.

Todos os elementos expostos à radiação proveniente do Sol aquecem ao absorver a energia incidente. O dito processo de aquecimento será tão rápido quanto menos reflexiva se

apresentar a superfície do corpo exposto à radiação solar. Posteriormente, a estrutura foi pintada de preto para absorver o máximo de radiação, como representado na Figura 4.20. De todas as cores, a cor preta fosca é caracterizada por absorver grande quantidade de energia [23].

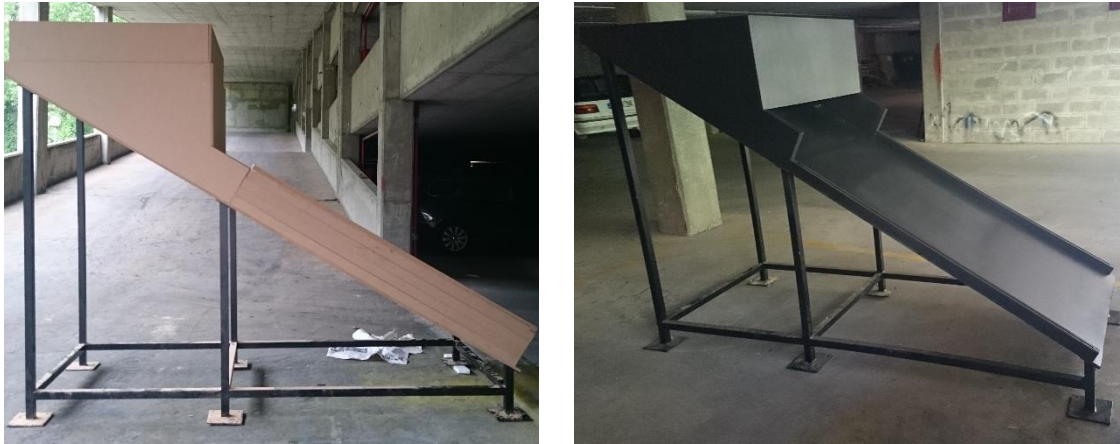


Figura 4.20 - Secador solar antes e após a aplicação da tinta.

Para a construção do secador foram utilizados inúmeras porcas, anilhas e cerca de 292 parafusos de diversos tipos desde parafusos de cabeça estrela a parafusos de cabeça escareada com sextavado interno.

Após uma meticulosa análise da variedade dos protótipos dimensionados em diversos locais do mundo, projetou-se e construiu-se o secador solar apresentado na Figura 4.21.

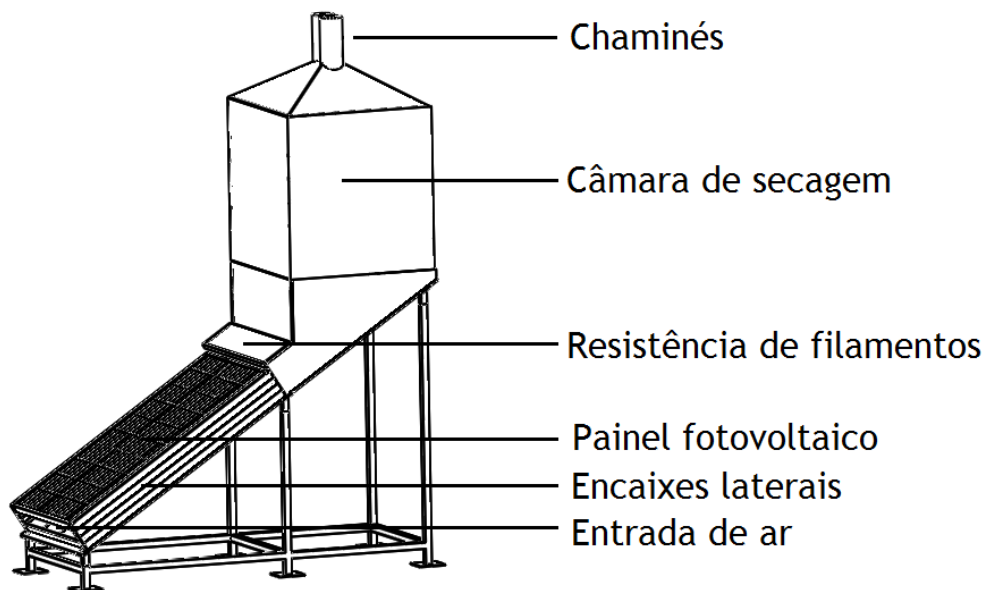


Figura 4.21 - Protótipo do secador solar desenvolvido.

O presente secador solar fotovoltaico mostra-se peculiar no aquecimento do ar circulante. O ar que entra no secador é aquecido através do calor libertado pela resistência de filamentos posicionada a meio do percurso. Por sua vez, a resistência é alimentada pelo painel fotovoltaico de células de silício policristalino de 250W.

Este projeto apresenta ainda algumas particularidades comparativamente com outros secadores solares similares. Quanto ao seu tamanho, o secador foi projetado e construído com 2,5 metros de comprimento, 1 metro de largura e 3,5 metros de altura. No topo é caracterizado por possuir duas chaminés de forma circular com 120 milímetros de diâmetro que diferem de acordo com o modo de secagem que se pretende empregar. Caso se pretenda secar produtos agroalimentares por convecção natural utiliza-se a chaminé com a válvula borboleta de modo a regular o caudal de saída do ar circulante. Por outro lado, a restante chaminé possui um ventilador acoplado para a sua utilização em convecção forçada.



Figura 4.22 - Detalhe das chaminés em tubo PVC.

O atual secador solar foi concebido com o intento de operar, apenas e só, com o recurso à energia solar, num esquema de convecção natural ou forçada consoante a utilização da respectiva chaminé.

A secagem dos produtos é efetuada à sombra evitando deste modo variações indesejáveis provenientes da radiação solar para que se obtenha um produto final com qualidade. De maneira a que o secador solar consiga operar de acordo com os níveis térmicos pretendidos, é essencial evitar as trocas de calor com o exterior. Para diminuir ao máximo as perdas térmicas, a utilização de materiais de construção de baixa condutibilidade térmica é crucial. O isolante térmico utilizado no secador solar foi poliestireno extrudido, designado por *roofmate*, com 5 cm de espessura.

A câmara de secagem constitui o elemento essencial respetivamente ao sistema de secagem dos produtos agroalimentares. Para a sua construção existe uma panóplia de materiais possíveis. O material escolhido para a estrutura foi o MDF (*Medium Density Fiberboard*) de 12

milímetros de espessura. O MDF demonstrou ser um produto ideal devido à sua resistência, estabilidade e uniformidade proporcionada pela distribuição homogênea das respectivas fibras. O MDF permitiu ainda obter excelentes acabamentos após a aplicação de tapa-poros, selando, desta maneira, os poros da madeira e ainda regularizou a absorção do verniz e da tinta na superfície. A escolha do material foi também direcionada para a questão do custo do mesmo e a respectiva disponibilidade. No entanto, teve-se ainda em conta a baixa condutibilidade térmica que apresenta, já que esse fato ajuda na redução de perdas térmicas.

Na construção da câmara de secagem pretendeu-se manter a superfície superior da caixa o mais regular possível, facilitando assim a fixação das cantoneiras em aço no seu interior. Estes perfis leves, utilizados na construção do telhado do secador, foram fixos segundo as diagonais do interior da caixa para suprimir a tendência de flexão lateral aquando do transporte da mesma [23].



Figura 4.23 - Construção da parte superior do secador solar.

As chaminés promovem um aquecimento uniforme no interior da zona de secagem já que encaminham o ar ascendente desta zona para o exterior conseguindo, desta maneira, uma renovação do ar bastante eficaz. As chaminés ao serem forradas interiormente por uma espuma de poliuretano expandido e, exteriormente por silicone de cor negra com o intuito de selar todo o sistema, reduzem qualquer tipo de perdas térmicas.

A câmara de secagem é fechada em três lados por uma camada tripla de MDF com 36 milímetros de espessura no sistema de encaixe. A restante área lateral é fechada por uma porta do mesmo material de apenas 12 milímetros de espessura, suspensa por três dobradiças. A câmara de secagem comporta seis tabuleiros de 1m² sobrepostos e espaçados por 15 cm. Aí colocam-se os produtos que se pretende secar, totalizando uma área útil de 6m² como está representado na Figura 4.24. A estrutura dos tabuleiros de 95×97cm² é composta por aço inoxidável e a rede é de alumínio com malha de 1cm².



Figura 4.25 - Disposição dos tabuleiros no interior da câmara de secagem.

O conector de derivação solar é o dispositivo de conexão do sistema de produção de energia solar. Este cabo é do tipo *cross linking* de feixe de eletrões em que a respectiva temperatura nominal é de 120°C. Portanto, os componentes representados na Figura 4.25 não apresentam apenas uma boa adaptabilidade ao ambiente, mas também uma forte capacidade de resistência à carga mecânica [41].



Figura 4.24 - Fichas de ligação de 4mm² do tipo Tyco-Solarlok[®] utilizado no painel fotovoltaico [41].

Actualmente existe uma panóplia de mais de trinta fabricantes de conectores na indústria fotovoltaica. No entanto, a ficha de ligação Tyco MC4 (*Multi Contact with 4mm² Connector*) é o sistema de bloqueio padrão na indústria fotovoltaica.

As cablagens exigem o correto dimensionamento do sistema elétrico e têm como objetivo fechar o circuito, de maneira a que os componentes que integram a unidade fotovoltaica operem como um todo. Na instalação dos cabos há que ter em atenção a ligação apropriada

dos elementos, já que um erro de ligação pode prejudicar o funcionamento regular dos restantes componentes.

No presente sistema fotovoltaico foram empregues cabos unifilares de 6 mm² de secção caracterizados por uma resistência de 0,0031Ω por metro, como indicado na Tabela 4.6. A utilização destes cabos, em toda a instalação, consente na instalação separada das polaridades distintas corretamente caracterizadas pelo código de cores alusivo às mesmas. Deste modo, evitam-se curto-circuitos no caso de sobrecargas devido à incapacidade do isolante.

Tabela 4.6 - Resistência elétrica dos cabos condutores [20].

Secção do condutor (mm ²)	Resistência (Ω/m)
2,5	0,0074
4	0,0046
6	0,0031
10	0,0018
16	0,0012
25	0,00073
35	0,00049

As estruturas utilizadas em sistemas de produção fotovoltaica requerem um bom dimensionamento de modo a possibilitar a inclinação adequada para o painel e a estabilidade ideal conferindo um bom desempenho ao painel fotovoltaico. Posto isto, os suportes carecem de várias características: resistentes, leves, de montagem fácil e estáveis. O suporte utilizado de tubagem de aço com 40×40mm² com 3 milímetros de espessura finaliza o secador solar ilustrado na Figura 4.26.

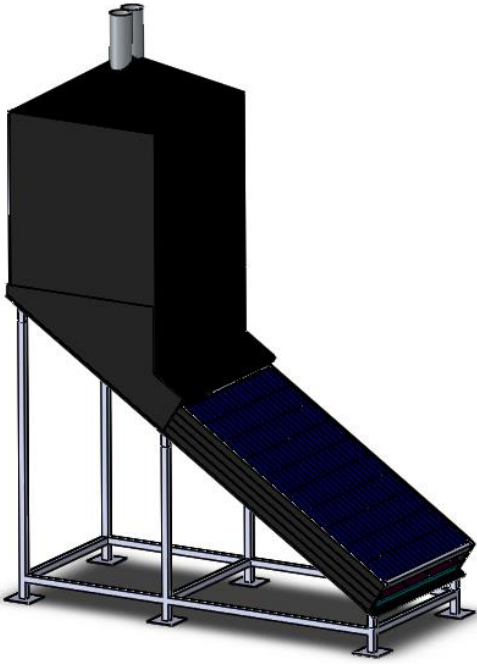


Figura 4.26 - Conceito dimensionado em SolidWorks™ e o projeto final do secador solar.

Capítulo 5

5 Ensaio experimental

Depois de abordada a descrição e o respectivo funcionamento dos componentes de sistemas fotovoltaicos indicados no capítulo anterior, os procedimentos da instalação relativos aos constituintes essenciais, particularmente o painel fotovoltaico, a bateria, o regulador de carga e o inversor, revestem-se de grande simplicidade.

O presente capítulo é dedicado à apresentação, descrição e análise dos resultados do estudo experimental concretizado. Neste quinto capítulo enceta-se uma caracterização da instalação experimental empregue no âmbito de quatro ensaios que diferem na potência imposta à carga. À *posteriori*, debatem-se os respectivos resultados obtidos consoante todas as variáveis que influenciaram os ensaios.

O escopo do estudo experimental é a realização de ensaios com diferentes potências na carga com o intuito de entender o comportamento e a influência de diferentes valores fornecidos à resistência elétrica de filamentos e o papel da mesma no aquecimento do ar que circula no interior do secador solar. Deste modo, pretende-se aprimorar o protótipo desenvolvido mediante um variado leque de condições de funcionamento e caracterizar o comportamento energético do secador.

5.1 Descrição da instalação

Com o intento de avaliar o comportamento da resistência elétrica consoante as potências fornecidas foram realizados quatro tipos de ensaios distintos, designados por:

- Ensaio 1 - 170W, sem restrições na carga;
- Ensaio 2 - 100W;
- Ensaio 3 - 125W;
- Ensaio 4 - 150W.

Para tal foi utilizada uma fonte de tensão de modo a regular a tensão fornecida à carga e para executar as instalações foi necessário o auxílio de utensílios simples, tais como chaves de estrela e de fendas de tamanho médio, alicates universais e de corte, chaves de bocas e ferramentas semelhantes.

A resistência elétrica de filamentos utilizada, de 295Ω , foi suspensa num suporte em aço inoxidável como apresenta a Figura 5.1.



Figura 5.1 - Resistência elétrica de filamentos utilizada com o respectivo suporte.

A resistência foi acoplada ao sistema com a finalidade de transformar energia elétrica em energia térmica por meio do Efeito de Joule limitando assim a corrente elétrica do circuito. A corrente elétrica que entra num terminal da resistência é exatamente a mesma que sai pelo outro, porém há uma queda de tensão.

O filamento da resistência dilata ao ser alimentado e com isso o valor da respectiva resistência aumenta. Daí resulta o aproveitamento do calor produzido para aquecer o ar circulante. Com o intuito de evitar o sobreaquecimento do suporte de aço, utilizou-se anilhas de sílica entre a resistência e o suporte. O suporte foi colocado no tampo acima do painel fotovoltaico visível na Figura 4.26 do capítulo anterior.

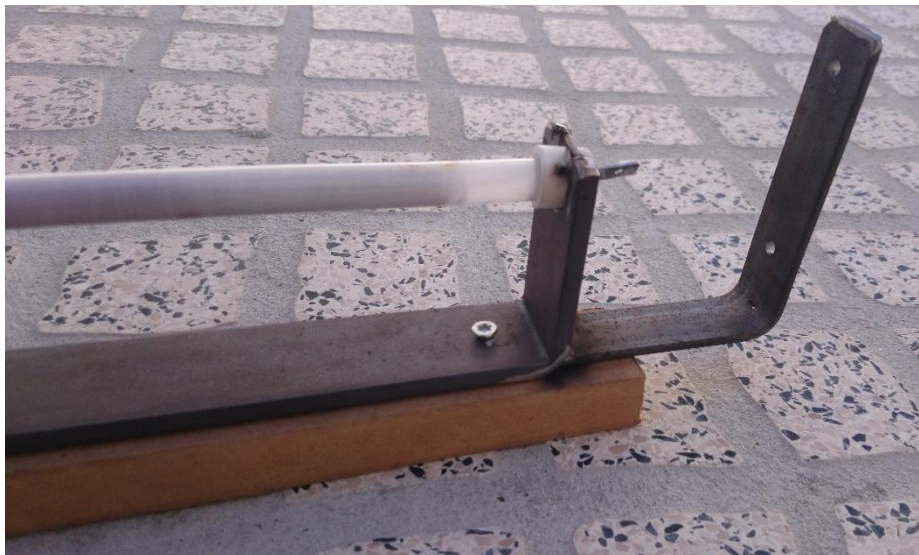


Figura 5.2 - Pormenor do suporte da resistência elétrica.

O suporte foi preparado para utilizar roofmate nas laterais com o intuito de isolar ainda mais o sistema; esse pormenor é observável na Figura 5.2.

A interligação entre o painel fotovoltaico, o regulador de carga e os restantes constituintes do sistema foi efetuada com a cablagem apropriada com o intuito de evitar perdas excessivas. Deste modo, procedeu-se ao corte do cabo necessário, descarnou-se com o alicate o extremo de cada fio e, respeitando a polaridade, interligou-se todos os elementos do circuito, como representado na Figura 5.3.

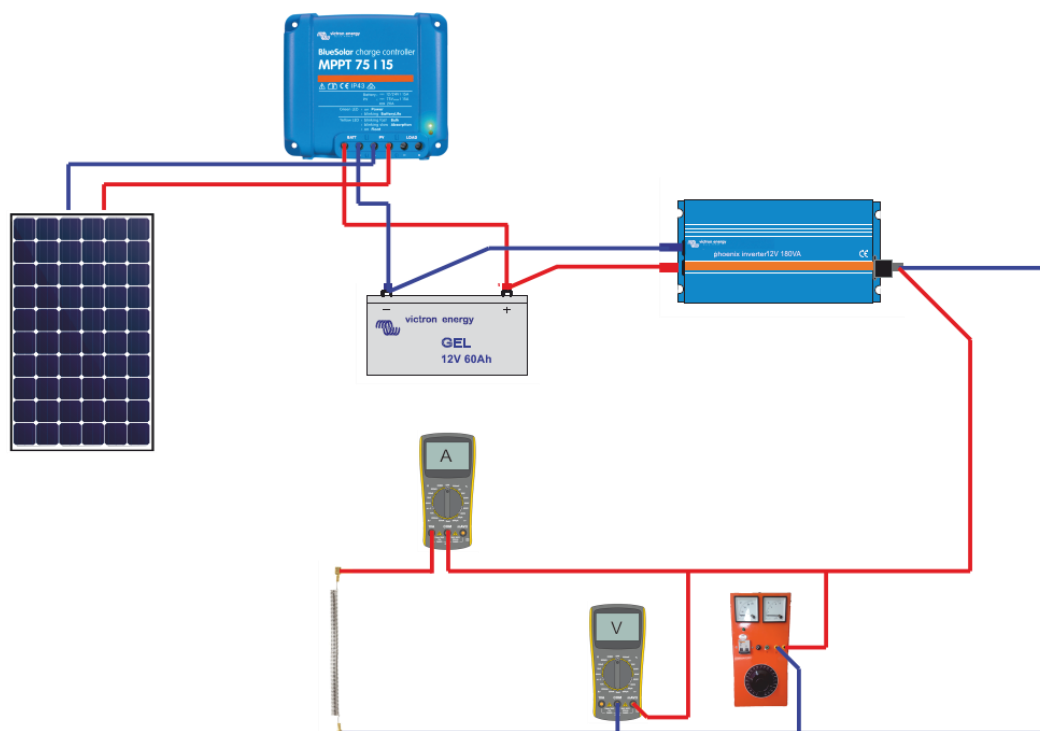


Figura 5.3 - Esquema representativo do circuito elétrico.

Mediante prováveis anomalias na instalação elétrica, o multímetro é o aparelho adequado para identificar o elemento responsável. O multímetro não se demonstra indispensável apenas na referida função, sendo também imprescindível na medição da tensão de saída do painel fotovoltaico, na tensão da bateria e na tensão e corrente da carga. Através do multímetro e de outros aparelhos de medida obtiveram-se os dados dos ensaios experimentais.

Os restantes valores foram conseguidos através da utilização de *data loggers* da Lascar Electronics representados na Figura 5.4. Como apresentam uma interface via USB, os respectivos dados foram recolhidos pelo respectivo programa do aparelho, designado EasyLog Software.



Figura 5.4 - Data loggers utilizados [35].

Para as medições das temperaturas foram então utilizados sete data loggers, em que seis deles foram colocados no interior da câmara de secagem com a disposição apresentada na Figura 5.5. O restante foi utilizado no exterior para registar a temperatura ambiente aquando da realização dos ensaios experimentais.



Figura 5.5 - Disposição dos seis data loggers no interior da câmara de secagem.

5.2 Ensaios realizados

Um dos objetivos em relação aos ensaios experimentais realizados foi iniciá-los com condições climáticas semelhantes em relação à temperatura ambiente, radiação solar e velocidade do ar. Por acréscimo, também seria ideal iniciar os ensaios com o mesmo valor da tensão na bateria para que todos os testes se apresentassem mais credíveis, tornando possível uma melhor comparação entre os resultados obtidos dos diferentes ensaios. No entanto, o mesmo não foi possível pois nem sempre se registaram valores análogos nos terminais da bateria.

O período pretendido para os ensaios era de doze horas com o intuito de se aproveitar ao máximo a radiação solar disponível. Porém, o mesmo não foi possível visto que a bateria atingia um ponto em que interrompia o fornecimento de energia ao inversor. As interrupções nos ensaios decorreram com uma duração de quarenta e cinco minutos entre as 12h45m e as

13h30m. Sendo um dos objectivos dos ensaios estudar o comportamento da bateria em função do sistema com situações de baixa radiação, o intervalo escolhido foi o ideal devido ao pico da radiação solar diário decorrer neste período de tempo.

Sucintamente, os ensaios 1, 2, 3 e 4 foram realizados nos dias 9, 10, 11 e 12 de agosto respetivamente. A partir dos *data loggers* distribuídos uniformemente nos tabuleiros, como descrito anteriormente, é possível analisar a variação da temperatura no interior da câmara de secagem.

Inicialmente, procedeu-se à montagem do circuito elétrico como referido no subcapítulo anterior e, após a verificação cautelosa de todos os elementos do sistema, iniciaram-se os ensaios experimentais registando de 15 em 15 minutos os valores apresentados de seguida.

Dentro da variedade de dados recolhidos, são apenas exibidos e analisados os mais relevantes e pertinentes de se apresentar. Nomeadamente a temperatura ambiente, a temperatura no interior da câmara de secagem, a tensão da bateria para os diferentes ensaios, a potência na carga e a radiação solar estimada no local. Os dados atrás referenciados são os que demonstram uma maior preponderância e os que influenciam diretamente o comportamento da secagem solar de produtos agroalimentares.

Na Figura 5.6 apresenta-se a variação da temperatura ambiente ao longo dos ensaios realizados.

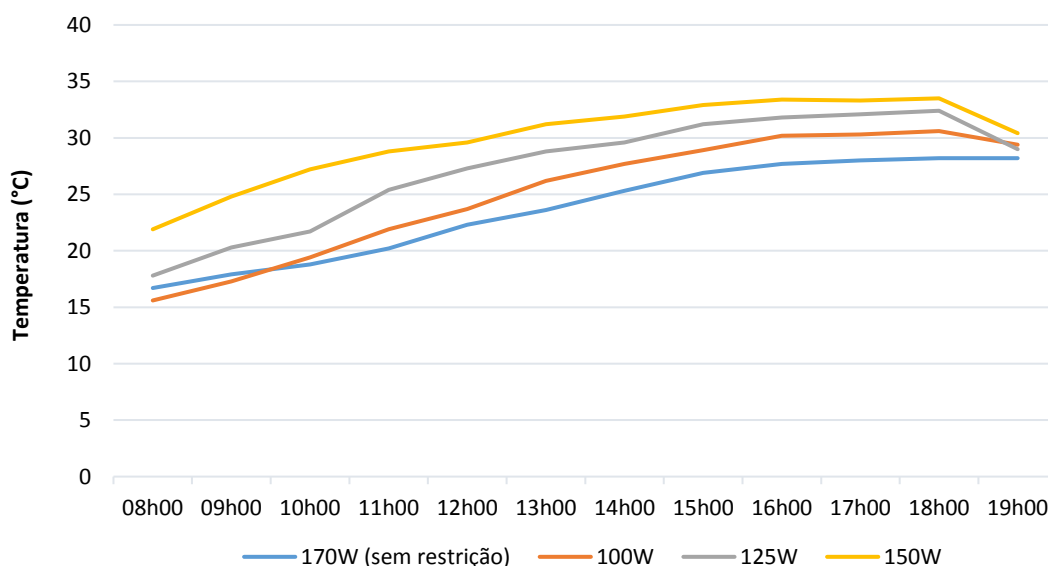


Figura 5.6 - Gráfico alusivo aos valores da temperatura ambiente.

No último ensaio, relativo ao valor de 150W de potência na carga, registou-se uma média superior da temperatura ambiente de 29,9°C. Comparativamente aos restantes dias houve uma pequena variação de 6°C na média dos restantes valores de temperatura apontados. O valor máximo da temperatura ambiente obtido foi de 33,5°C às 18h00m no último ensaio.

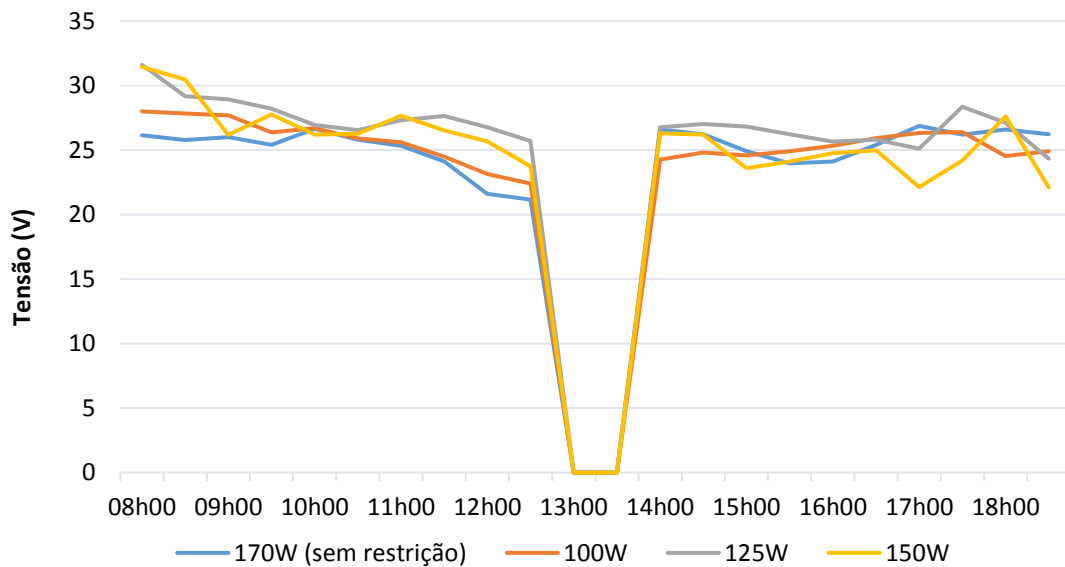


Figura 5.7 - Gráfico referente aos valores da tensão do painel fotovoltaico.

Ao comparar a Figura 5.6 com a Figura 5.7 é notório a diferença do rendimento do painel fotovoltaico no ensaio com 150W no mesmo dia cuja média dos valores de temperatura ambiente registada foi a maior. Posto isto, confirma-se a influência do aumento da temperatura no rendimento dos painéis fotovoltaicos, tal como a importância do respectivo parâmetro na escolha do painel fotovoltaico indicado para cada instalação. O valor do coeficiente térmico para a potência do painel fotovoltaico utilizado no sistema é de $-0,405\%/K$ o que indica que, para cada grau acima de $25^{\circ}C$, a potência máxima do painel é reduzida em $0,405\%$.

Os valores da tensão do painel representados no gráfico da Figura 5.7 demonstram-se, por vezes, inconstantes. Esta instabilidade deve-se ao facto do encobrimento das nuvens que faz com que se registre um valor mais reduzido da tensão do painel fotovoltaico.

O secador solar apresenta diferentes comportamentos consoante os valores da temperatura do interior da câmara de secagem. Para analisar essa disparidade foram obtidos os seguintes dados representados na Figura 5.8

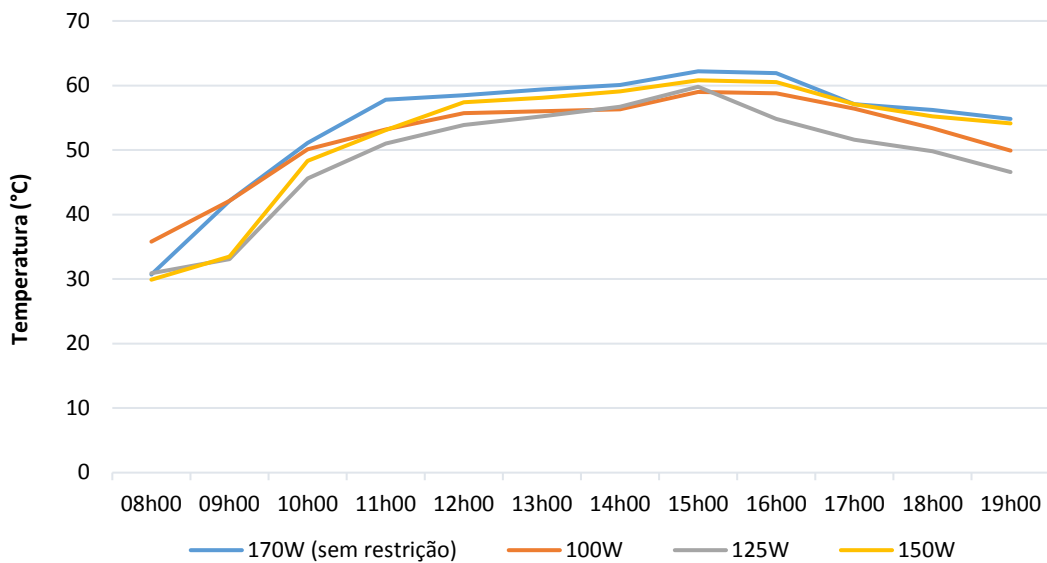


Figura 5.8 - Gráfico relativo aos valores da temperatura no interior da câmara de secagem.

Do gráfico da Figura 5.8 é perceptível que a temperatura mais elevada foi registada no primeiro ensaio em que não houve restrição à resistência elétrica, atingindo um valor de 63°C.

O comportamento das temperaturas no interior da câmara de secagem apresenta-se regular e ascendente atingindo o máximo entre as 15h00m e as 16h30m. Nas últimas duas horas dos ensaios registaram-se decréscimos nas temperaturas de todos os ensaios.

De seguida são comparados três parâmetros simultaneamente para cada um dos quatro ensaios realizados. Para tal, foram criados gráficos de três eixos com os valores da radiação solar, da temperatura ambiente e da temperatura no interior da câmara de secagem ao longo da duração dos ensaios.

Em todos os ensaios observa-se um período sem leituras, precisamente no intervalo de quarenta e cinco minutos relativo à pausa de almoço que decorreu entre as 12h45m e as 13h30m.

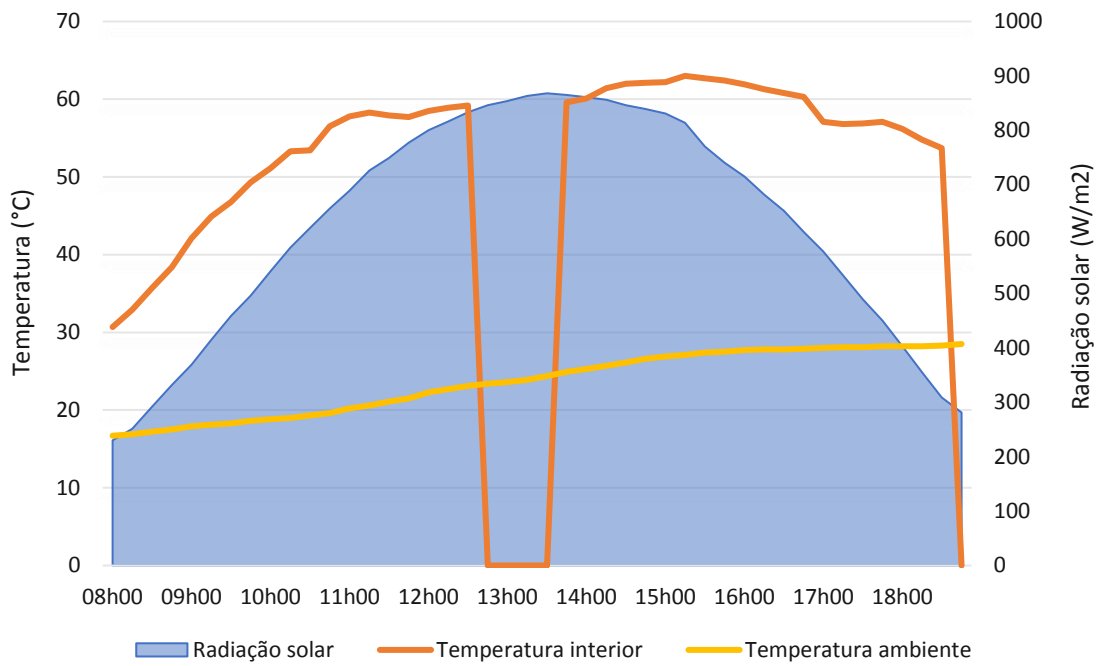


Figura 5.9 - Comparação entre a temperatura ambiente, a radiação solar no local e a temperatura no interior da câmara de secagem relativos ao Ensaio 1.

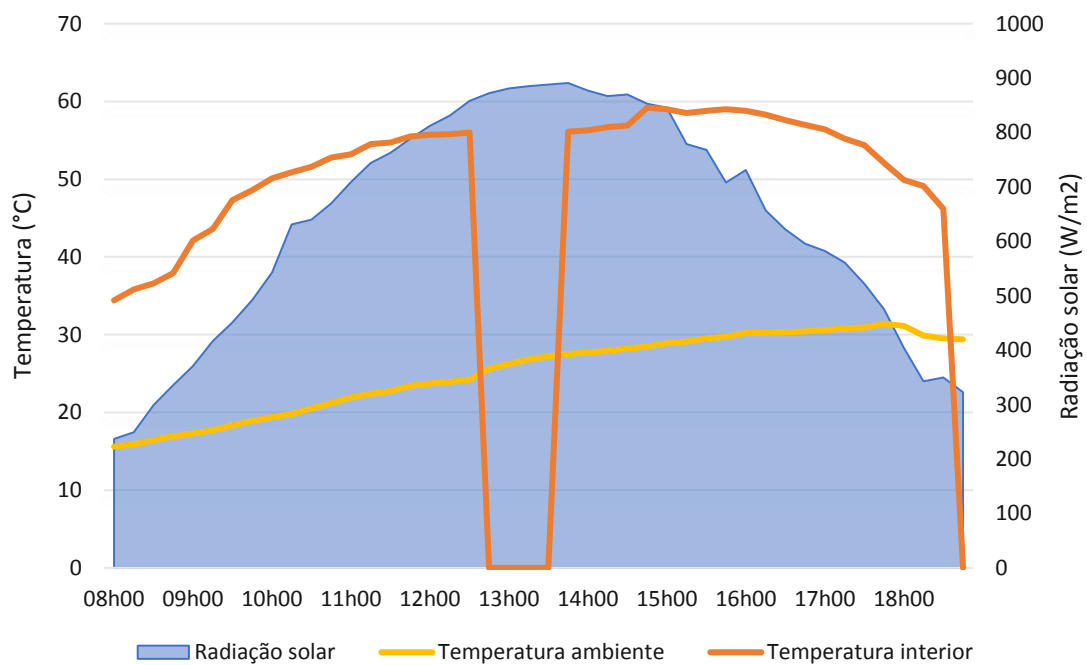


Figura 5.10 - Comparação entre a temperatura ambiente, a radiação solar no local e a temperatura no interior da câmara de secagem relativos ao Ensaio 2.

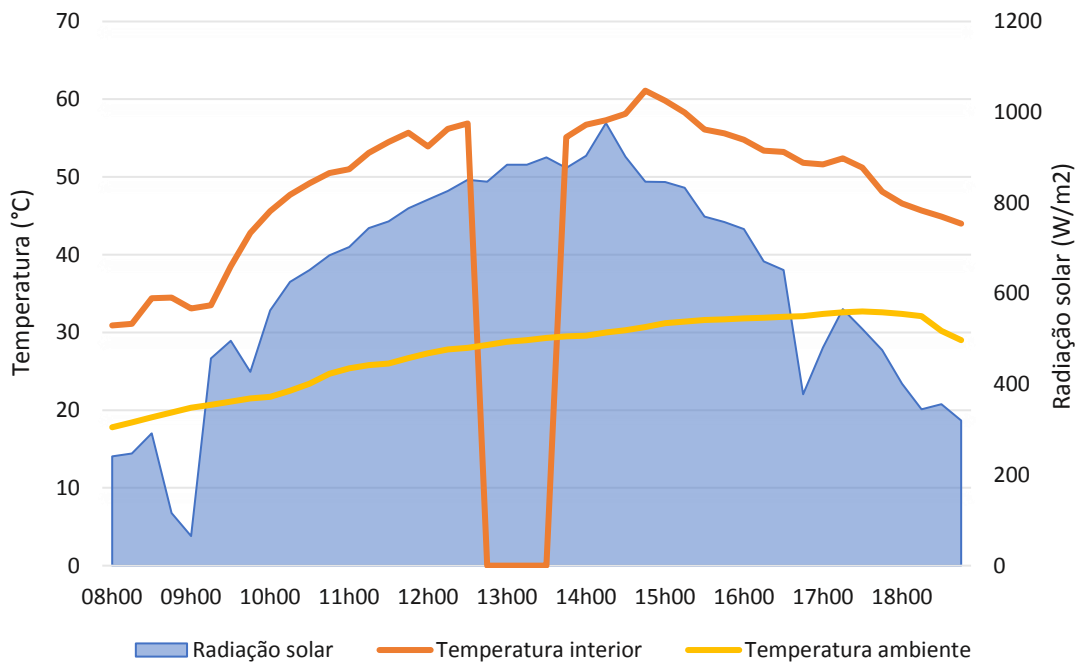


Figura 5.12 - Comparação entre a temperatura ambiente, a radiação solar no local e a temperatura no interior da câmara de secagem relativos ao Ensaio 3.

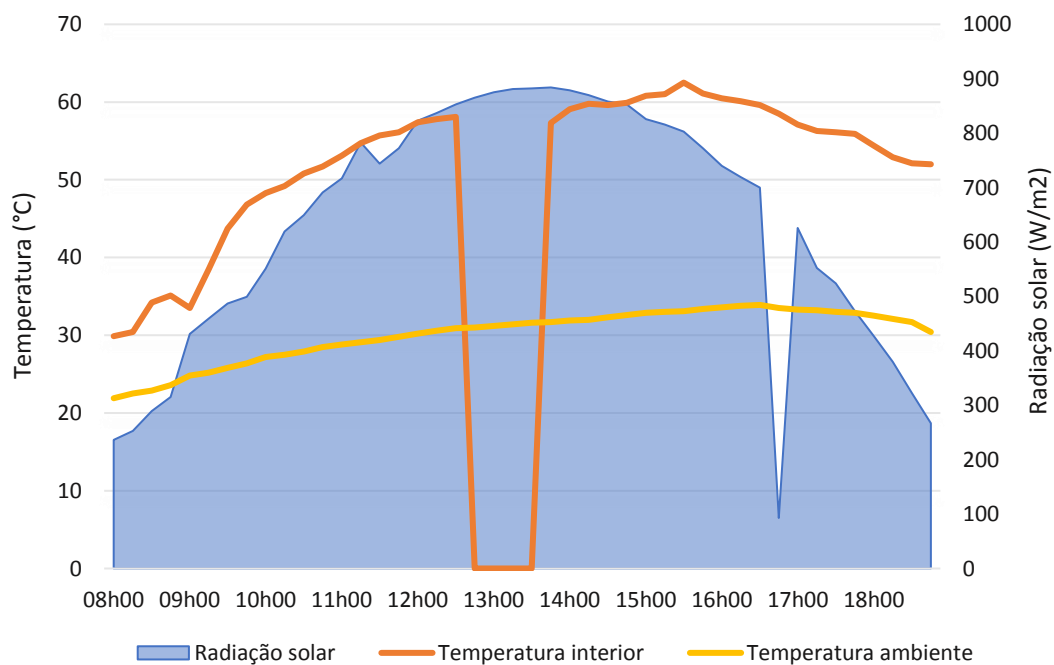


Figura 5.11 - Comparação entre a temperatura ambiente, a radiação solar no local e a temperatura no interior da câmara de secagem relativos ao Ensaio 4.

Quanto ao primeiro ensaio verifica-se que o pico da radiação solar decorre entre as 12h00m e as 15h00m atingindo um valor máximo de $868\text{W}/\text{m}^2$ às 13h30m. A temperatura ambiente que varia de $16,7$ até $28,5^\circ\text{C}$ atinge este máximo às 17h45m. Consequentemente, a temperatura no interior da câmara de secagem ascende também gradualmente durante o dia e atinge 63°C às 15h15m.

Verifica-se na Figura 5.10 que relativamente à radiação solar, esta atinge um máximo às 13h45m, atingindo um valor de $891\text{W}/\text{m}^2$ que coincide com o topo da respectiva curva. A temperatura ambiente variou de $15,6^\circ\text{C}$ até $31,4^\circ\text{C}$. De notar que foi às 17h45m o momento em que se registou essa máxima de temperatura ambiente. Neste instante, a radiação solar incidente apresenta um valor de $475\text{W}/\text{m}^2$ e consequentemente a temperatura começa a decrescer.

Em relação ao terceiro ensaio, referente a 125W de potência na carga, verifica-se que a temperatura máxima atingida no interior da câmara de secagem foi de $61,1^\circ\text{C}$ às 14h45m. Quanto à radiação solar, esta atinge um valor máximo às 14h15m de $976\text{W}/\text{m}^2$. Às 09h00m é perceptível, através do gráfico ilustrado na Figura 5.11, que a radiação solar decresceu até um valor de $65\text{W}/\text{m}^2$ causado por nebulosidade.

No quarto e último ensaio verifica-se também que o pico da radiação solar decorre entre as 12h00m e as 15h00m cujo valor máximo foi de $884\text{W}/\text{m}^2$ às 13h45m. A temperatura no interior da câmara de secagem atinge $62,5^\circ\text{C}$ às 15h30m e a temperatura ambiente alcança o valor máximo de $33,9^\circ\text{C}$ às 16h30m. Tal como no terceiro ensaio, o céu nublado durante o dia do respectivo ensaio influenciou os dados obtidos relativamente à intensidade da radiação solar. Este parâmetro atingiu um valor mínimo de $93\text{W}/\text{m}^2$ às 16h45m.

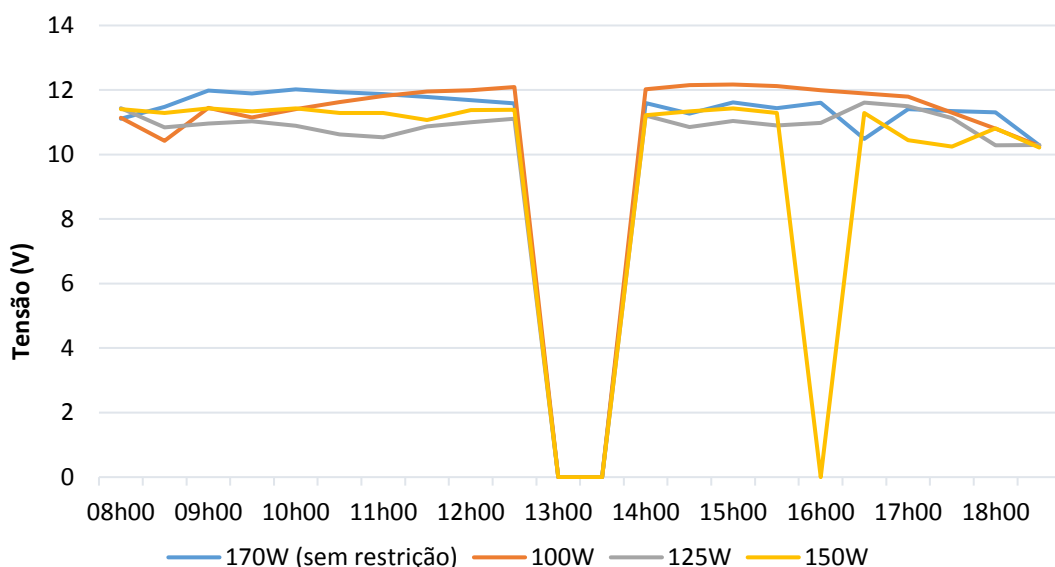


Figura 5.13 - Tensão da bateria registada nos diferentes ensaios.

Os valores recolhidos referentes à tensão da bateria foram obtidos em intervalos de quinze em quinze minutos com o auxílio de um voltímetro. Da Figura 5.13 apura-se que nem sempre foi possível manter um valor de tensão constante nos terminais da bateria.

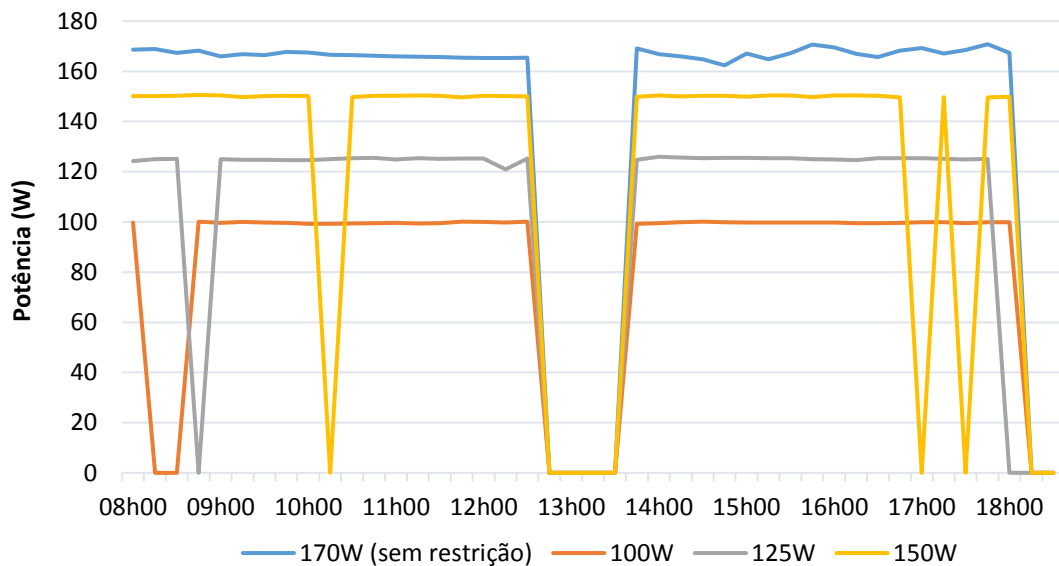


Figura 5.14 - Potência na carga referente aos diferentes ensaios.

Quanto à Figura 5.14 referente à potência registada nos quatro ensaios, denota-se que os valores que se pretenderam aplicar à carga nem sempre se apresentaram constantes. A potência obtida resulta do produto da tensão com a corrente na carga. Os défices que se destacam na figura devem-se ao facto de a bateria nesses instantes não dispor de um valor de tensão suficientemente alto para alimentar o circuito. Sem restrição à carga, a média das potências é de 167W.

A concretização dos ensaios anteriormente descritos consentiu reunir um conjunto de informação experimental cuja discussão e análise se faz de seguida.

5.3 Análise de resultados

A análise de resultados que se segue visa dar a entender o comportamento do secador solar consoante vários valores de potência na carga. O secador solar foi assim testado sob uma vasta gama de condições exteriores. Após a execução dos diversos ensaios, não se poderá deixar de verificar as discrepâncias presentes nos resultados obtidos.

Devido ao facto de a partir das 18h15m, no mês de agosto, o edifício junto ao secador solar obstruir a luz solar que incide no painel fotovoltaico e após 15 minutos, às 18h30m, cerca de 50% do painel já se encontra à sombra.

Tal como foi referido anteriormente, o *output* de uma célula solar diminui proporcionalmente à quantidade de sombreamento. As células no painel fotovoltaico estão ligadas em série e, portanto, o sombreamento de apenas uma célula faz com que a corrente no ramo das células, designado *string*, decresça para o valor da corrente da célula sombreada. Daí, o facto de se incorporar uma bateria ao sistema mostra-se vantajoso. No entanto, pela análise dos dados registados em todos os ensaios, com este componente não foi possível prolongar o período dos ensaios para doze horas, ou seja, das 08h00m às 20h00m.

Porém, foi possível proceder com os ensaios experimentais visto que se registaram condições climáticas com uma mínima discrepância tolerável. Em relação aos valores registados da tensão no painel fotovoltaico durante os ensaios, é notório a desigualdade do rendimento do painel no ensaio de 150W, no mesmo dia cuja média dos valores de temperatura ambiente registada foi a maior. Desta forma, confirma-se a influência do aumento da temperatura no rendimento dos painéis fotovoltaicos. Assim como noutros materiais semicondutores, as células fotovoltaicas são sensíveis à temperatura. De facto, a temperatura afecta o modo do fluxo da electricidade no circuito eléctrico, alterando a velocidade em que os eletrões se movimentam.

Quanto à temperatura ambiente, a mesma se demonstrou regular destacando a média superior dos respectivos valores no último dia relativo ao ensaio de 150W. No entanto, foi no ensaio sem restrição que se registou a temperatura mais elevada no interior da câmara de secagem, verificando-se mais uma vez a supremacia do primeiro ensaio em termos de valores mais altos de temperatura interior e relativamente aos valores obtidos da potência na carga que se mostraram mais regulares.

Os ensaios realizados em dias distintos implicaram condições atmosféricas distintas e daí resultam diferentes padrões de temperatura. Como seria de esperar, a média do valor da temperatura durante o dia dos ensaios manteve-se dentro do esperado para o mês de agosto na cidade da Covilhã.

A dita contrariedade obtida relativamente à temperatura no interior da câmara de secagem foi resultado dos diferentes valores impostos à resistência eléctrica e, essa inconstância é mais evidenciada no primeiro dia do ensaio em que se registou um valor máximo de temperatura de 63°C no interior da câmara de secagem às 15h15m. De facto, é de notar também que a média da radiação solar incidente no local é superior nesse mesmo ensaio quando comparada com os restantes dias.

No último ensaio, relativo ao valor de 170W de potência na carga, em que a média da temperatura exterior assumiu o valor mais baixo de todos os ensaios, obtiveram-se valores consideravelmente elevados referentes à temperatura no interior da câmara de secagem.

Como seria de esperar, à medida que se aumenta a potência fornecida à carga é evidente um aumento da temperatura no interior da câmara de secagem. De salientar que, sem restrições à carga registou-se uma temperatura máxima de 63°C, com 100W obteve-se 59,2°C, com 125W conseguiu-se 61,1°C e, finalmente, com 150W atingiu-se uma temperatura de 62,5°C.

A conceção do protótipo visa a secagem de produtos agroalimentares da região, mais propriamente a cereja. Este fruto apresenta uma humidade inicial de 80% em que a temperatura máxima aconselhada na sua secagem é de 65°C.

Segundo a análise da fundamentação e ensaios relatados na literatura científica relacionada com o presente tema, chega-se à conclusão que, consoante as condições obtidas em todos os ensaios experimentais realizados, foram as do primeiro ensaio que se demonstraram ideais para proceder com a secagem solar, e.g. da cereja.

Capítulo 6

6 Conclusão

Após vários anos de desenvolvimento e, por conseguinte, de inovação, a indústria fotovoltaica a nível europeu apresenta-se numa época de incertezas muito devido ao facto da inconstante mudança no respectivo mercado. Esta inconsistência relaciona-se com as mudanças legislativas no sector condicionando deste modo possíveis investimentos no mercado fotovoltaico. Todavia, nos restantes países desenvolvidos exteriores ao continente europeu, denota-se um crescimento da tecnologia fotovoltaica o que faz com que o mercado global não se ressinta por causa do abrandamento da UE [20].

No mesmo contexto, este cenário em Portugal apresentou um apreciável progresso na última década estimulado pelas políticas de incentivo implementadas até então. Porém, esta alteração a nível legislativo - a mudança dos regimes bonificados para o regime de autoconsumo - levou a uma paralisação do setor. Posto isto, é de esperar que depois de uma época de incertezas, o setor deva recuperar o respetivo rumo e prossiga com o seu desenvolvimento.

A tecnologia fotovoltaica é fiável e relativamente simples de instalar. Porém é facilmente perceptível o motivo desta tecnologia não desempenhar um papel mais relevante. Uma das principais razões é o facto da energia elétrica proveniente de painéis fotovoltaicos se demonstrar demasiado onerosa para competir em Portugal devido aos preços reduzidos dos combustíveis fósseis.

O dimensionamento e construção de um secador solar peculiar e eficaz representa o âmbito deste projeto. Para reinventar os conceitos já referidos, foi necessário atravessar fronteiras conceptuais e para tal optou-se, deliberadamente, pela caracterização o mais abrangente possível de noções e conceitos de maneira a realçar o ponto de vista multidisciplinar que este trabalho visa.

As baterias já se encontram numa variedade de aplicações solares, mas a curto prazo, é provável que os sistemas fotovoltaicos residenciais irão fornecer a maior parte desta procura. Cada vez mais, em sistemas fotovoltaicos isolados, a eletricidade produzida a partir de painéis solares é menos onerosa que a eletricidade comprada à rede. Isto, naturalmente, faz com que seja mais vantajoso consumir o máximo possível da eletricidade que o sistema produz.

Apesar das reduções de custos visíveis no sector fotovoltaico e da contribuição significativa para a redução da pegada ecológica global, o problema com a tecnologia em sistemas isolados é claro. Os painéis fotovoltaicos fornecem eletricidade durante o dia a preços competitivos, mas a maior procura interna de eletricidade é geralmente à noite. Daí que o facto de existir acumulação de energia elétrica em detrimento do consumo instantâneo da energia elétrica produzida se apresente como uma vantagem para o sistema implementado - faz com que a bateria descarregue a eletricidade armazenada, fornecendo ao sistema eletricidade produzida sem nenhum custo adicional.

A presente dissertação fundamenta-se na correlação de todas as ideias e conceitos apresentados nos capítulos anteriores. Na literatura abundam tópicos acerca da criatividade e inovação de projetos semelhantes, caracterizados por diferenças subtis entre os aperfeiçoamentos tanto científicos como tecnológicos.

Os distintos estudos de casos efetuados através das diferentes metodologias, permitiram avaliar as diferenças entre os mesmos, de modo a otimizar ao máximo o processo da secagem solar. Porém, os diferentes ensaios realizados demonstram a mesma conclusão: atualmente não está implícito um modelo de secador solar que não apresente desvantagens relativamente ao tipo de secagem pretendido.

Feita esta premissa, foi proposto, dimensionado e construído um secador solar. Pretendeu-se aprimorar o protótipo desenvolvido mediante um variado leque de condições de funcionamento e caracterizar o comportamento energético do secador. Através deste trabalho foi possível estudar as estratégias distintas para a optimização da secagem de alimentos a partir da energia solar. Com a finalidade de beneficiar o máximo da energia produzida, e assim diminuir o desperdício, foram apontadas certas medidas que fomentam a utilização correta de painéis solares na secagem de produtos agrícolas.

Em relação aos tipos de reguladores de carga, mediante os cálculos realizados no subcapítulo 4.1.3, é perceptível que os do tipo PWM devem ser utilizados em sistemas cuja tensão do painel fotovoltaico seja similar com a tensão das baterias. Contudo, o mesmo não se verifica para o painel fotovoltaico utilizado e daí o regulador de carga MPPT ter sido o escolhido. O dito regulador é mais sofisticado e conseqüentemente mais dispendioso. Os dois tipos de reguladores distinguem-se pelo modo como procuram o ponto de potência máxima do módulo fotovoltaico. O regulador de carga MPPT fá-lo de maneira diferente: a respectiva tensão de entrada é ajustada para recolher a energia máxima proveniente do painel fotovoltaico e, de seguida, essa energia é monitorizada automaticamente com o propósito de carregar a bateria conforme o algoritmo do regulador. Essencialmente separa a tensão do painel da tensão da bateria de modo a que uma bateria de 12V possa estar ligada ao regulador de carga MPPT e simultaneamente ao painel a produzir 36V.

Como foi perceptível dos dados obtidos que relacionam o desempenho do painel fotovoltaico com o aumento da temperatura, a escolha do painel ideal para o sistema que se pretenda dimensionar deve ser considerada com atenção. Para tal, existe um conjunto de fatores e, o coeficiente de temperatura é deveras importante.

Mediante o tipo de painel fotovoltaico, quer de células de silício monocristalino, policristalino ou células de silício amorfo o valor deste parâmetro difere. Os painéis solares baseados em células de silício monocristalino e policristalino apresentam um coeficiente de temperatura, P_{mpp} , a rondar os $-0,37$ e $-0,44\%/K$, respetivamente. Entre estes dois tipos, o monocristalino demonstra ser o mais eficiente. Quanto menor o coeficiente de temperatura melhor será o desempenho do painel fotovoltaico. Por sua vez, as células de silício amorfo destacam-se ainda mais com um coeficiente de temperatura de $-0,34\%$, o que significa que para cada grau acima de $25^{\circ}C$, a potência máxima do painel é reduzida em $0,34\%$.

Em todos os cenários, a produção de energia elétrica através do Sol continuará a aumentar. O aumento do consumo de energia a nível mundial leva à imprescindibilidade de cimentar o recurso às energias renováveis. O aproveitamento das tecnologias relacionadas com energias renováveis contribui para a produção de eletricidade limpa, segura e acessível. A necessidade de atingir metas de redução de emissões impostas pelos acordos internacionais e o aumento das preocupações ambientais deve catapultar esta tecnologia para que se torne mais assente e se estabeleça como um produto comercializável e economicamente viável. De notar que, em julho de 2016 o preço dos painéis fotovoltaicos considerados *mainstream* - módulos tipicamente com 60 células, quadro de alumínio e com valores de potência entre 245 e 270Wp - voltou a decrescer, registando um valor de $0,50\text{€/Wp}$ [42].

O armazenamento de energia será também um fator cada vez mais a ter em conta com o desenvolvimento do mercado fotovoltaico. Neste aspeto denota-se um notável progresso relativamente às capacidades de armazenamento em baterias de chumbo-ácido fornecendo entre 20 e 40 Wh/kg, enquanto a tecnologia de lítio introduzida no início dos anos noventa é capaz de fornecer entre 70 a 200Wh/kg de capacidade. Posto isto, são descritas de seguida algumas medidas que possam potenciar o projeto desenvolvido.

Relativamente aos resultados obtidos dos ensaios realizados, como seria de esperar, obteve-se diferentes valores consoante as condições climáticas diárias e conforme o valor da potência fornecida à carga. Ao analisar os ditos resultados chega-se à conclusão que as condições relativas ao primeiro ensaio se demonstram ideais e mais adequadas para, por exemplo, da secagem solar da cereja, visto que neste ensaio sem restrições à carga registou-se uma temperatura máxima de $63^{\circ}C$ no interior da câmara de secagem.

6.1 Trabalhos futuros

O presente conceito do secador solar quanto à sua construção apresenta-se finalizado. Porém, a nível prático de experimentação mostra-se ainda incompleto e exige, portanto, um aprofundamento prático nesse nível. Após o dimensionamento e construção deste secador averiguou-se que certos aspetos relativos com a temática em análise ficaram ainda por aprofundar. Posto isto, são então propostos alguns temas de trabalhos possíveis de desenvolver no futuro e que promovem a continuidade deste projeto.

Uma das possíveis medidas que otimiza o secador solar é a aplicação de um refletor na fachada da câmara de secagem direcionada para o painel fotovoltaico. Uma vez que este aspeto não foi implementado propõe-se o respectivo estudo com o intuito de aumentar o nível da radiação solar incidente no painel.

A secagem solar depende de diversos fatores como por exemplo a renovação do ar circulante na câmara de secagem. Visto que as chaminés se encontram a 3,5 metros de altura, a regulação da válvula borboleta demonstra-se uma tarefa árdua e de difícil acesso. Desta forma, propõe-se a utilização de controladores com o objetivo de regular a válvula borboleta acoplada à chaminé.

Uma alternativa ao facto do painel fotovoltaico se apresentar fixo, seria implementar uma plataforma giratória para acompanhar o percurso do Sol ao longo do dia. Este método de seguimento solar seria implementado com o intuito de melhorar a eficiência do painel fotovoltaico. Porém, há que salientar que este melhoramento encarece bastante o custo total do sistema elevando-o para um patamar bastante dispendioso.

Referências

- [1] T. P. Benito, *Práticas de Energia Solar Fotovoltaica*. Porto: Engebook.
- [2] “Microorganisms and food.” [Online]. Available: http://www.epralima.com/infoodquality/English_materials/Manuais/3.Microorganisms.pdf. [Accessed: 16-Feb-2016].
- [3] “Produção e Comercialização da Cereja em Portugal,” 2010. [Online]. Available: <http://www.confagri.pt/Noticias/Pages/noticia31649.aspx>. [Accessed: 02-Feb-2016].
- [4] “Cereja - Gabinete da Agricultura,” 2007. [Online]. Available: <http://www.gpp.pt/pbl/diagnosticos/SubFileiras/Cereja.pdf>. [Accessed: 05-Feb-2016].
- [5] “Agricultura e mercados na Beira Interior,” 2003. [Online]. Available: <http://jlcs.no.sapo.pt/docs/AgBiologicaBeiraInterior.pdf>. [Accessed: 05-Feb-2016].
- [6] “Relatório de Execução - Medida AGRIS.” [Online]. Available: http://www.drapc.min-agricultura.pt/base/documentos/relatorio_agris_produtos_qualidade_bi.pdf. [Accessed: 05-Feb-2016].
- [7] A. Ferreira and M. Candeias, “Secagem solar de frutos e plantas aromáticas,” *Rev. Ciências Agrárias*, p. 370, 2005.
- [8] D. Jain and P. Tewari, “Performance of indirect through pass natural convective solar crop dryer with phase change thermal energy storage,” *Renew. Energy*, vol. 80, pp. 244-250, 2015.
- [9] P. Barnwal and G. N. Tiwari, “Grape drying by using hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) greenhouse dryer: An experimental study,” *Sol. Energy*, vol. 82, no. 12, pp. 1131-1144, 2008.
- [10] B. O. Bolaji and A. P. Olalusi, “Performance Evaluation of a Mixed-Mode Solar Dryer,” *AU J. Technol.*, vol. 11, no. 4, pp. 225-231, 2008.
- [11] M. A. Hossain and B. K. Bala, “Drying of hot chilli using solar tunnel drier,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 1, pp. 85-92, 2007.
- [12] H. H. Chen, C. E. Hernandez, and T. C. Huang, “A study of the drying effect on lemon

- slices using a closed-type solar dryer,” *Sol. Energy*, vol. 78, no. 1, pp. 97-103, 2005.
- [13] S. Vijayavenkataraman, S. Iniyan, and R. Goic, “A review of solar drying technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 2652-2670, 2012.
- [14] A. Sharma, C. R. Chen, and N. Vu Lan, “Solar-energy drying systems: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 6-7, pp. 1185-1210, 2009.
- [15] A. A. Gatea, “Performance evaluation of a mixed-mode solar dryer for evaporating moisture in beans,” *J. Agric. Biotechnol. Sustain. Dev.*, vol. 3, no. April, pp. 65-71, 2011.
- [16] G. Duran, M. Condorí, and F. Altobelli, “Simulation of a passive solar dryer to charqui production using temperature and pressure networks,” *Sol. Energy*, vol. 119, pp. 310-318, 2015.
- [17] A. R. Celma and F. Cuadros, “Energy and exergy analyses of OMW solar drying process,” *Renew. Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 660-666, 2009.
- [18] İ. Doymaz and O. İsmail, “Drying characteristics of sweet cherry,” *Food Bioprod. Process.*, vol. 89, no. 1, pp. 31-38, 2011.
- [19] V. N. Hegde, V. S. Hosur, S. K. Rathod, P. A. Harsoor, and K. B. Narayana, “Design, fabrication and performance evaluation of solar dryer for banana,” *Energy. Sustain. Soc.*, vol. 5, no. 1, p. 23, 2015.
- [20] J. Morais, *Sistemas Fotovoltaicos da Teoria à Prática*. Porto: Engebook, 2009.
- [21] “Agricultura e Ambiente - O Futuro,” 2002. [Online]. Available: http://www.drapc.min-agricultura.pt/base/documentos/agricultura_ambiente.htm. [Accessed: 25-Feb-2016].
- [22] “Guia das Explorações de Agricultura (Projecto GABI),” 2007. [Online]. Available: <http://www.fcsh.unl.pt/gabi/BeiraInterior/BeiraInterior.html>. [Accessed: 25-Feb-2016].
- [23] A. Bezerra, *Aplicações Práticas da Energia Solar*. Brasil, 1990.
- [24] “The Price of Solar Is Declining to Unprecedented Lows.” [Online]. Available: <http://blogs.scientificamerican.com/plugged-in/the-price-of-solar-is-declining-to-unprecedented-lows/>. [Accessed: 06-Aug-2016].
- [25] “Radiação de um corpo negro.” [Online]. Available:

- https://docs.kde.org/trunk5/pt_BR/kdeedu/kstars/ai-blackbody.html. [Accessed: 04-Jun-2016].
- [26] “The Sun As A Source Of Energy.” [Online]. Available: <http://www.itacanet.org/the-sun-as-a-source-of-energy/part-2-solar-energy-reaching-the-earths-surface/>. [Accessed: 09-Aug-2016].
- [27] “Solar Declination.” [Online]. Available: <http://www.reuk.co.uk/wordpress/solar/solar-declination/>. [Accessed: 18-Jul-2016].
- [28] Vitalchama, “Sistemas Fotovoltaicos,” 2016. [Online]. Available: <http://www.vitalchama.pt/#!/paineis-solares-/c1pgb>. [Accessed: 02-May-2016].
- [29] “Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS).” [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>. [Accessed: 03-Feb-2016].
- [30] “Effect of Temperature in Solar Cells.” [Online]. Available: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature>. [Accessed: 19-May-2016].
- [31] “Solar Electricity.” [Online]. Available: http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/solar_electricity/index.htm. [Accessed: 15-Aug-2016].
- [32] A. Kumar, S. C. Moses, and K. Khan, “A Survey on the Design, Fabrication and Utilization of Different Types of Foods and Vegetables Dryer,” *IOSR J. Agric. Vet. Sci. Ver. 1*, vol. 8, no. 8, pp. 2319-2372, 2015.
- [33] V. Belessiotis and E. Delyannis, “Solar drying,” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 8, pp. 1665-1691, 2011.
- [34] A. R. Eswara and M. Ramakrishnarao, “Solar energy in food processing—a critical appraisal,” *J. Food Sci. Technol.*, vol. 50, no. April, pp. 209-227, 2012.
- [35] Kioto, “Solar Module Types - Datasheet,” 2013.
- [36] A. G. M. Battery and A. G. E. L. Opzv, “Gel and AGM Batteries,” pp. 68-71.
- [37] BlueSolar, “Charge Controller MPPT,” vol. 31, no. 0.
- [38] “Victron Energy.” [Online]. Available: <https://www.victronenergy.com/blog/2014/03/28/matching-victron-energy-solar->

modules-to-the-new-mppt-charge-regulators/. [Accessed: 02-Apr-2016].

- [39] “Sizing Charge Controllers.” [Online]. Available: <https://www.altestore.com/howto/sizing-pwm-solar-charge-controllers-a91/>. [Accessed: 29-Aug-2016].
- [40] V. Energy, “Phoenix Inverters.”
- [41] Q. Solar, “Photovoltaic Cable.” [Online]. Available: <http://www.qc-solar.com/doc/technology.html>. [Accessed: 21-Jul-2016].
- [42] “PV Module Price Index.” [Online]. Available: <http://www.pv-magazine.com/investors/module-price-index/>. [Accessed: 28-Aug-2016].
- [43] L. Nevener, “Renewable Energy World,” 2015. [Online]. Available: <http://www.renewableenergyworld.com/solar-energy/tech/solarpv.html>. [Accessed: 03-Jun-2016].
- [44] “Multijunction Solar Cells.” [Online]. Available: <http://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/4317>. [Accessed: 16-Apr-2016].
- [45] M. A. Leon, S. Kumar, and S. C. Bhattacharya, “A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers,” vol. 6, pp. 367-393, 2002.