

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



O Impacto Do Soiling Nos Painéis Fotovoltaicos

Carolina Alexandra Cipriano Duarte

Mestrado Integrado Em Engenharia Da Energia E Do Ambiente

Dissertação orientada por:
Miguel C. Brito

2022

Agradecimentos

Não foi fácil chegar até aqui, foram muitas batalhas, noites sem dormir a estudar, exames e trabalhos dentro e fora das paredes da faculdade, mas no final valeu a pena todo o esforço feito. Mas nada se faz só e a conclusão deste curso representa a dedicação de várias pessoas que estiveram a meu lado e citando Clarice Lispector: “Quem caminha sozinho pode até chegar mais rápido, mas aquele que vai acompanhado, com certeza vai mais longe”. É na reflexão desta frase que verifico que é tão importante agradecer a todos que marcaram positivamente a minha passagem pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e que me ajudaram no desenvolvimento desta tese de mestrado. No entanto, na impossibilidade de agradecer a todos, deixo aqui o meu agradecimento àqueles que merecem um destaque especial:

Começo pelo professor Miguel Brito, a quem dirijo o meu sincero agradecimento por todo o conhecimento transmitido não só nesta fase final como também durante todo o curso, pela orientação nesta tese, pela compreensão e disponibilidade dispensada ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Agradecer ao Técnico Superior Dmitri Boutov pela ajuda e paciência que teve para comigo em laboratório e no Campus Solar durante uma fase experimental desta tese.

Não esquecendo os amigos que a faculdade me proporcionou, a Zé, o Yan, a Joana, o Tiago, o David, a Adriana e a Rita, quero agradecer-lhes as horas de estudo no IDL, os trabalhos de grupo, os apoios que me deram, as tardes que passamos juntos, as noites mal dormidas e todo o companheirismo vivido ao longo destes anos.

Agradeço de coração ao Lázaro, por ser o melhor companheiro para estar a meu lado. Por todo o amor, carinho e compreensão que tem para comigo. Por motivar, por acreditar sempre em mim e no meu potencial e por tornar as minhas lutas em nossas lutas. Por estar a meu lado neste, e em todos, os momentos – sempre! Este esforço também é dele.

Por último, o agradecimento mais especial, à minha família: Pai, Mãe, Mana, Marcelinho, Marcelo Pai e Avós. Este curso também é vosso. É também resultado da dedicação deles, da lealdade e por me darem a oportunidade de estudar. Sem a nossa estrutura familiar, sem a prontidão que demonstram sempre em ajudar-me em todos os momentos da vida, que me apoiaram e me impulsionaram a conquistar o sonho.

A todos o meu Muito Obrigado!

Resumo

Cada vez mais o setor da energia tem enfrentado problemas relacionados com o aumento do consumo de energia elétrica, sendo esta ainda muito produzida através de combustíveis fósseis. Os problemas ambientais (como a poluição e o aquecimento global), o aumento do custo e a escassez de combustíveis fósseis faz com exista uma grande procura por fontes de energias limpas e sustentáveis. É devido a estas causas que existe interesse crescente no uso da energia solar para a produção de energia renovável, através do uso de tecnologias fotovoltaicas. No entanto a eficiência destas tecnologias ainda não é satisfatória. Assim sendo, vários estudos pelo mundo têm sido realizados ao longo dos anos sobre os parâmetros que possam diminuir a eficiência desta produção, sendo a acumulação de *soiling* sobre os módulos fotovoltaicos um desses parâmetros. A acumulação de *soiling* sobre as superfícies dos painéis solares é um fenómeno transversal a todas as tecnologias fotovoltaicas. Em Portugal, este ainda é um tema pouco explorado e também um pouco ignorado aquando da preparação de projetos fotovoltaicos. Através da análise de vários trabalhos publicados sobre o tema, esta dissertação tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre o impacto do *soiling* na eficiência fotovoltaica, as causas da deposição, quais as metodologias de deteção de *soiling* sobre os módulos e como diminuir o seu impacto.

Palavras-Chaves: Energia Solar, Sistemas Fotovoltaicos, Perdas Fotovoltaicas, *Soiling*,

Abstrat

The energy sector has been facing increasing problems regarding the exacerbation of the demand and lack of insufficient generation of electric energy, which has still been strongly produced through fossil fuels. The environmental issues, such as pollution and global warming, their rising costs and the scarcity of fossil fuels enhance together the strong demand for cleaner and more sustainable energy sources. Due to these issues, there is an increasing interest on solar energy use with the aim to produce renewable energy through photovoltaic technology. However, the efficiency of these technologies is not quite satisfactory yet. Therefore, wide studies have been produced over the last years related with the parameters that can decrease the production efficiency, being the soiling accumulation over photovoltaic modules one of these parameters. Soiling accumulation over the solar panel's surface is a phenomenon transversal to all the photovoltaic technologies. In Portugal, this topic is still poorly explored, as well as often ignored when photovoltaic projects are produced. Relying on the analysis of several published studies related with the topic, this dissertation aims to perform a bibliographic revision regarding the soiling impacts on photovoltaic efficiency and the deposition causes, as well as the methodologies used for soiling detection over the modules and how it is possible to reduce its impact.

Keywords: Solar Energy, Photovoltaic Systems, Photovoltaic Losses, *Soiling*

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO À DISSERTAÇÃO	1
1.1 Contexto	1
1.2 Estrutura Da Dissertação	2
CAPÍTULO 2 - FUNCIONAMENTO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	3
2.1 Princípios De Funcionamento	3
2.2 Constituintes Dos Sistemas Fotovoltaicos	3
2.3 Células Fotovoltaicas.....	3
2.3.1 Associações De Módulos Fotovoltaicos.....	4
2.4 Componentes E Estrutura Dos Módulos Fotovoltaicos	6
2.5 Sombreamento De Módulos Fotovoltaicos.....	7
2.5.1 Sombreamento Segundo A Posição Vertical Ou Horizontal Do Módulo.....	9
2.6 Curvas Características De Funcionamento	10
2.6.1 Parâmetros De Funcionamento De Uma Célula Fotovoltaica.....	11
2.6.1.1 Corrente De Curto Circuito, I_{sc}	11
2.6.1.2 Tensão De Circuito Aberto, V_{oc}	11
2.6.1.3 Potência Máxima, P_{MAX}	12
2.6.1.4 Fator De Forma, FF	12
2.6.1.5 Eficiência, η	12
2.6.2 Fatores Que Afetam As Características Elétricas Dos Módulos.....	13
2.6.2.1 Efeito da irradiância	13
2.6.1.2 Efeito da temperatura	14
CAPÍTULO 3 – SOILING	15
3.1 Definição.....	15
3.2 Causas Para A Presença De <i>Soiling</i> Nos Sistemas Fotovoltaicos	16
3.2.1 Fatores ambientais	16
3.2.1.2 Intensidade Das Chuvas.....	16
3.2.1.3 Humidade.....	18
3.2.1.4 Temperatura	18
3.2.1.5 Excrementos De Pássaros	19
3.2.2 Propriedades do solo	19
3.2.2.1 Características Das Partículas De <i>Soiling</i>	19
3.2.3 Características da instalação.....	20
3.2.3.1 Ângulo De Inclinação E Orientação Do Módulo	20

3.2.3.2	Altura Da Instalação	20
3.2.3.3	Tipo De Superfície Do Painel Fotovoltaico	20
3.2.4	Impacto Da Poluição Na Produção Fotovoltaica	21
3.2.4.1	Impacto Da Covid-19 Na Produção Fotovoltaica E Na Deposição De <i>Soiling</i>	21
3.3	Seletividade Espectral Devido Ao <i>Soiling</i>	22
3.4	Metodologia De Medição Do <i>Soiling</i>	23
3.4.1	Por Comparação De Módulos	23
3.4.2	Acumulação De Massa	25
3.4.3	Transmissividade Dos Vidros	26
3.4.4	Acumulação De Massa E A Transmissividade Dos Vidros Em Simultâneo	27
3.5	O Que Estava Programado Nesta Dissertação	28
3.5.1	Estudo Do <i>Soiling</i> Através Da Produção De Energia	29
3.5.2	Estudo Do <i>Soiling</i> Em Placas De Vidro	29
3.5.3	Modelos De Detecção De <i>Soiling</i>	29
Modelo 1	.....	30
Modelo 2	.....	30
Modelo 3	.....	31
Modelo 4	.....	31
3.6	Estudos Feitos Sobre O <i>Soiling</i>	32
3.6.1	Estudos Nacionais Feitos Para Avaliar O Impacto <i>Soiling</i>	32
3.6.2	Estudo Internacionais Feitos Para Avaliar O Impacto <i>Soiling</i>	33
3.6.3	Análise Geral Dos Estudos Abordados	34
3.7	Efeito Do <i>Soiling</i> Na Eficiência Dos Módulos	35
CAPÍTULO 4 - DIMINUIÇÃO DO EFEITO DO SOILING		36
4.1	Diminuição Do Efeito Do <i>Soiling</i>	36
4.2	Métodos De Limpeza Dos Painéis Fotovoltaicos	36
4.2.1	Métodos De Limpeza Naturais	37
4.2.2	Métodos De Limpeza Artificiais	38
Autolimpeza	.....	39
Métodos De Limpeza Ativa	.....	39
Métodos De Limpeza Mecânica	.....	40
Sistemas Motorizados De Limpeza De Painéis Solares Com Máquinas Ligeira	.....	40
Sistemas De Limpeza De Parques Solares Com Maquinaria Pesada	.....	41
Métodos De Remoção Eletrostática	.....	42
Métodos Robóticos	.....	42
Métodos De Limpeza Passiva	.....	43

Revestimentos Sobre A Superfície Dos Módulos	43
4.5 Efeito Da Deposição Do <i>Soiling</i> No Aspeto Económico	45
CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	47
5.1 Perspetivas De Futuro No Estudo Do <i>Soiling</i>	47
5.2 Conclusão	47

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1- Célula Fotovoltaica de Silício Monocristalino [10].</i>	4
<i>Figura 2- Célula, Módulo e Painel Fotovoltaico [11].</i>	4
<i>Figura 3- Gráfico da relação entre a tensão e a corrente de módulos fotovoltaicos associados em série [78].</i>	5
<i>Figura 4- Gráfico da relação entre a tensão e a corrente de módulos fotovoltaicos associados em paralelo [78].</i>	6
<i>Figura 5- Constituintes do Módulo Fotovoltaico [18].</i>	7
<i>Figura 6- Ligação em série de células fotovoltaicas [14].</i>	8
<i>Figura 7- Ligação em série de células fotovoltaicas onde uma está sombreada [14].</i>	8
<i>Figura 8- Células fotovoltaicas unidas por um diodo bypass [14].</i>	8
<i>Figura 9- Um módulo fotovoltaico limpo e dois módulos fotovoltaicos sujos com orientações diferentes.</i>	9
<i>Figura 10- Curva característica I-V e curva de potência P-V para um módulo fotovoltaico [19].</i>	11
<i>Figura 11- Curvas I-V para as mesmas condições de temperatura, mas com irradiâncias diferentes [19].</i>	13
<i>Figura 12- Curva I-V de uma célula fotovoltaica para diferentes valores de temperatura de funcionamento com a irradiância constante [23].</i>	14
<i>Figura 13- Gráfico que relaciona a taxa das perdas por soiling leve com a precipitação ocorrida em cada mês [26].</i>	17
<i>Figura 14- Gráfico que relaciona a força capilar com a humidade relativa (%) [30].</i>	18
<i>Figura 15- Espectro da radiação Solar [44].</i>	23
<i>Figura 16- Fotografia da glass tree presente na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.</i>	26
<i>Figura 17- Elementos necessários para o desenvolvimento dos modelos de deteção de soiling.</i>	30
<i>Figura 18- Projeto do modelo 1.</i>	30
<i>Figura 19- Projeto do modelo 2 com o led.</i>	31
<i>Figura 20- Projeto do modelo 2 com o sol.</i>	31
<i>Figura 21- Projeto do modelo 3.</i>	31
<i>Figura 22 - Projeto do modelo 4.</i>	32
<i>Figura 23- Esquema organizado dos métodos de limpeza de painéis fotovoltaicos.</i>	37
<i>Figura 24- Operador a efetuar a limpeza manual [75].</i>	39

<i>Figura 25- Sistemas Motorizados De Limpeza De Painéis Solares Com Máquinas Ligeira [81].....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 26 - Representação do sistema de limpeza de parques solares com maquinaria pesada [79].....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 27- Robot de limpeza de módulos fotovoltaicos da Escovacs Robotics [80].....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 28-- Ângulos de contacto criado nas diferentes superfícies [62].....</i>	<i>44</i>

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO À DISSERTAÇÃO

1.1 Contexto

Cada vez mais o setor da energia tem enfrentado problemas, sobretudo relacionados com o aumento do consumo de energia elétrica, sendo que esta ainda é muito produzida através de combustíveis fósseis. Os problemas ambientais, o aumento do custo e a escassez de combustíveis fósseis faz com exista uma grande procura por fontes de energias limpas e sustentáveis. Uma das alternativas mais promissoras é a energia solar.

Podemos considerar que o Sol é uma fonte de energia inesgotável. Através das reações nucleares que se produzem no seu interior, o Sol irradia energia sob a forma de luz e calor para o espaço. Devido a efeitos de absorção e reflexão na atmosfera, a variação da humidade, presença de nuvens, da latitude do local e até a estação do ano, nem toda esta energia chega ao à Terra. Aliás, apenas uma pequena parte dela atinge a superfície terrestre, mesmo assim estima-se que em média, a superfície da Terra receberá anualmente $1,5 \times 10^8$ kWh de energia solar, o que corresponde a cerca de 10 000 vezes o consumo mundial atual de energia nesse mesmo período, o que justifica o contínuo estudo no desenvolvimento de painéis fotovoltaicos para a produção de energia e a sua implementação em massa [1].

A descoberta da tecnologia fotovoltaica deu-se a partir da pesquisa de um físico francês chamado Alexandre Edmond Becquerel, em 1839, que descobriu o efeito fotovoltaico. Desde então que muito se tem estudado sobre esta tecnologia, embora tenha sido apenas em 1958 que se deu o início às utilizações dos painéis fotovoltaicos com um painel de 1 W anexado ao satélite *Vanguard I*, que foi enviado ao espaço, para alimentar o rádio na viagem; a partir daí foram instalados os primeiros sistemas fotovoltaicos para consumo elétrico, prática que se tornou cada vez mais comum [68]. Tanto que, em maio de 2022, a energia produzida através da tecnologia fotovoltaica tornou-se na segunda fonte de energia renovável mais utilizada no mundo, alcançando 1TW de capacidade instalada, apenas ficando atrás da produção hidroelétrica [3].

Existem diversos motivos pela qual os painéis fotovoltaicos sofrem perdas e baixam a sua eficiência, podemos salientar as perdas devido à orientação e inclinação dos módulos, os sombreamentos e sombreamentos parciais, a acumulação de *soiling* na superfície, perdas associadas à temperatura dos módulos e até degradação dos próprios módulos [4].

O *soiling* pode ser caracterizado genericamente como a acumulação de partículas na superfície de painéis solares e que tem como principal consequência a redução da eficiência fotovoltaica, pois reduz a radiação de entrada da célula, podendo refletindo-a de volta para a

atmosfera ou pode absorvê-la [5]. O rendimento dos painéis fotovoltaicos sujos pode cair até 20%, em comparação com um painel solar que foi previamente limpo [53].

A quantidade de *soiling* e a forma como este se espalha sobre a superfície fotovoltaica, depende da geografia e do clima do local onde se encontra a instalação. Assim sendo, é fácil entender que diferentes locais com climas diferentes e sujeitos a condições meteorológicas diferentes irão ter condições também diferentes para a aderência de partículas na superfície fotovoltaica [5]. Devido a isto, para qualquer projeto fotovoltaico, deveria ser feito um estudo do impacto do *soiling*.

Este trabalho tem como objectivo analisar o impacto do *soiling* sobre as tecnologias fotovoltaicas, verificando as causas para a presença do *soiling* sobre as superfícies (sejam causas ambientais, das propriedades do solo e/ou das características da instalação), a seletividade espectral devido à presença de *soiling*, as metodologias de deteção da sua presença nas superfícies, como é que afecta a eficiência fotovoltaica, e para finalizar, o efeito económico da deposição. Também neste trabalho, foram brevemente analisados apenas cinco estudos sobre o *soiling* pelo mundo, sendo apenas um em Portugal.

1.2 Estrutura Da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, sendo o presente onde se encontra o primeiro capítulo. Neste, para além de ser explicado a motivação para a realização desta dissertação, também é feita uma pequena introdução e contextualização do que é a produção fotovoltaica e de que maneira o *soiling* a pode afetar.

No segundo capítulo é descreve-se o funcionamento de um módulo fotovoltaico e um estudo teórico sobre a curva característica dos módulos, necessária para analisar o impacto do *soiling* no desempenho de módulos fotovoltaicos.

É no terceiro capítulo que se começa a falar de *soiling*, das suas causas, dos estudos desenvolvidos sobre o tema pelo mundo e como o podemos medir.

O quarto capítulo diz respeito à forma como podemos diminuir o impacto do *soiling* sobre os módulos fotovoltaicos e o impacto deste economicamente.

Por fim, no quinto capítulo são apresentadas algumas perspetivas de futuro no estudo do *soiling* e as conclusões relativas ao trabalho desenvolvido.

CAPÍTULO 2 - FUNCIONAMENTO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.1 Princípios De Funcionamento

A tecnologia fotovoltaica permite que exista um aproveitamento da energia proveniente do Sol, convertendo-a em energia elétrica para que possa ser consumida. Esse processo ocorre devido ao efeito fotovoltaico. Este efeito consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de um material semicondutor, normalmente o que é utilizado é o silício, produzida pela absorção da luz [6]. Os materiais semicondutores possuem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução, onde a diferença energética entre estas duas bandas em materiais é da ordem dos 1eV. Fótons na faixa da luz visível, com energia superior a essa diferença energética podem excitar elétrons presentes na banda de valência para a banda de condução [6].

2.2 Constituintes Dos Sistemas Fotovoltaicos

Dependendo da sua configuração e do tipo de consumidor, um sistema fotovoltaico poderá incorporar os seguintes componentes [9]:

- *Módulos fotovoltaicos* que são responsáveis pela conversão da radiação solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico;
- *Baterias de acumuladores*, que armazenam a energia produzida, assegurando o abastecimento nos períodos em que a energia solar não é suficiente para o consumo elétrico.
- *Regulador de carga*, que controla a carga da bateria através dos níveis de tensão da mesma e interrompe o funcionamento às cargas externas quando é atingida a carga mínima da bateria. Também estão presentes onde se inserem as baterias.
- *Inversor*, necessário para transformar a corrente contínua (DC) produzida pelo sistema em corrente alternada (AC), que é a forma como a energia é frequentemente consumida pelo utilizador.

2.3 Células Fotovoltaicas

A célula solar é o dispositivo elétrico que é responsável por converter a energia proveniente da luz solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Para isso, as células

fotovoltaicas são produzidas a partir de materiais semicondutores, e atualmente o mais utilizado é o silício. Dentro do silício, as células podem ser de diferentes tipos: células de silício policristalino, células de silício monocristalino e células de silício amorfo [9].



Figura 1- Célula Fotovoltaica de Silício Monocristalino [10].

2.3.1 Associações De Módulos Fotovoltaicos

Normalmente a potência de uma única célula fotovoltaica é bastante baixa, nunca excedendo os 2 W. É por esse motivo as células são agrupadas em módulos fotovoltaicos, e por sua vez estes agrupam-se em painéis, compostos por múltiplos módulos como se pode verificar na figura 2 [Figura 2][6].

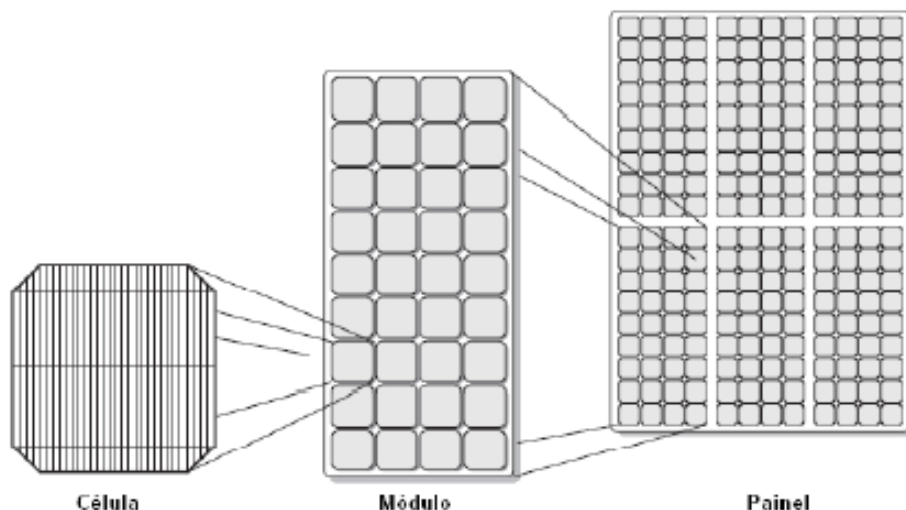


Figura 2- Célula, Módulo e Painel Fotovoltaico [11].

A ligação de módulos do mesmo tipo pode ser feita em série, paralelo ou mista, o permite obter diferentes valores de corrente ou tensão, conforme o tipo de ligação, oferecendo vantagens do ponto de vista do controle de funcionamento do painel e da sua produção de energia. Nas mesmas condições, enquanto a associação de módulos em série permite obter maiores tensões, com o mesmo valor de corrente [Figura 3], na associação em paralelo consegue-se obter maiores valores de corrente, mas mantém-se a tensão [Figura 4]. É de se notar que em ambos os casos, a potência do conjunto é a mesma [9]. O mesmo acontece com a associação células fotovoltaicas.

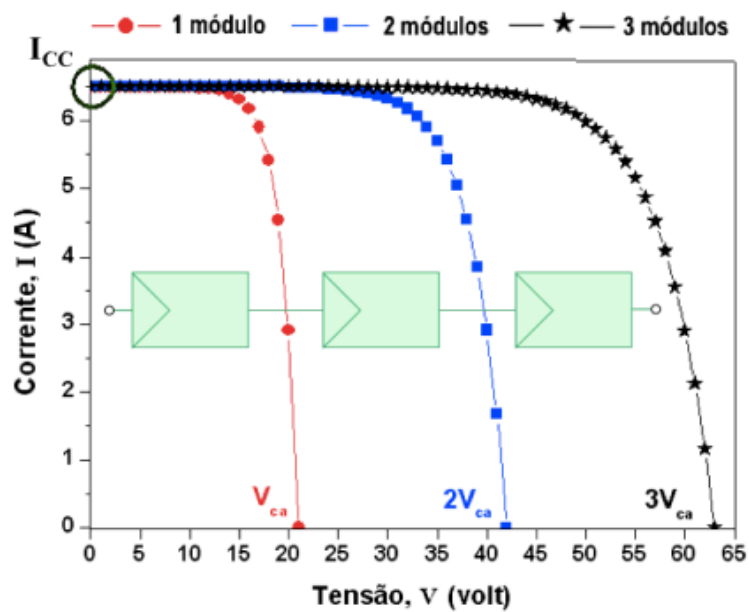


Figura 3- Gráfico da relação entre a tensão e a corrente de módulos fotovoltaicos associados em série [78].

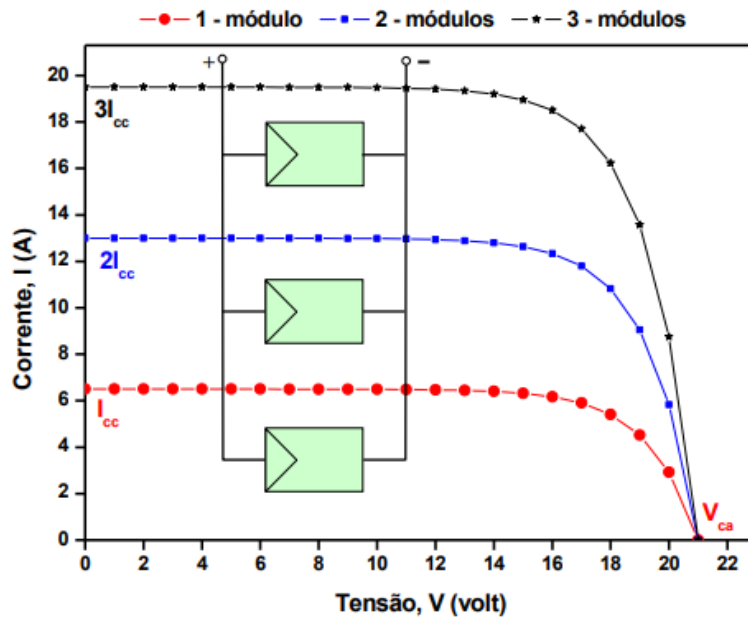


Figura 4- Gráfico da relação entre a tensão e a corrente de módulos fotovoltaicos associados em paralelo [78].

2.4 Componentes E Estrutura Dos Módulos Fotovoltaicos

Como já referido neste trabalho, os módulos fotovoltaicos são compostos por várias células fotovoltaicas, estas são sem dúvida o componente mais importante do módulo, por serem responsáveis pela produção elétrica. No entanto, é necessário um conjunto de componentes que tem como função proteger, dar resistência e funcionalidade ao módulo [Figura 5].

A capa frontal do módulo fotovoltaico, é constituída por vidro, tem a função de lhe fornecer condições que permitam resistir às condições atmosféricas adversas dos locais onde pode ser instalado. Este material oferece uma boa proteção contra impactos e é um bom transmissor de radiação solar.

O módulo é composto por duas camadas encapsuladas, que estão localizadas por cima e por baixo das células solares, e são responsáveis por proteger as células solares e os seus contactos, amortecendo as vibrações e eventuais impactos. O material normalmente utilizado é o Etileno Acetato de Vinilo (EVA) que proporciona uma ótima transmissão à radiação solar, que sofre uma degradação praticamente nula à radiação solar, atua também como isolante térmico e isolante de humidade.

De forma a proteger as células, a garantir orientação e a inclinação do módulo ideal ao aproveitamento da luz solar, os módulos são compostos por uma estrutura de suporte. Essa estrutura confere uma resistência a todo o conjunto dos constituintes do módulo. As estruturas

mais comuns no mercado são feitas de alumínio, embora também possam ser feitas de outros materiais, desde que o material seja resistente a diferentes condições climáticas e que promova a dissipação de calor.

A *backsheet* é um componente, habitualmente de cor branca, tem como cargo a proteção traseira do módulo, exercendo uma barreira contra a humidade.

As correntes elétricas contínuas que são geradas pelas células fotovoltaicas são conduzidas para a caixa de junção. Essa caixa é constituída por dois fios a sair de si com uma diferença de potencial; poderá incluir um terceiro, no caso de instalações de alta potência, para realizar uma ligação à terra [17].

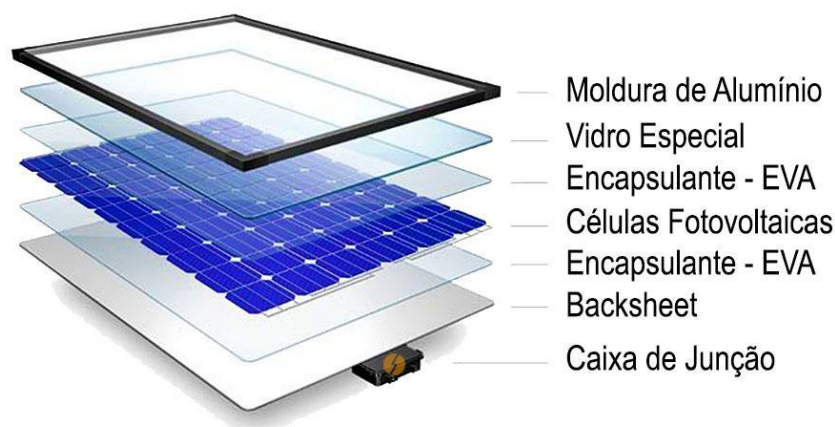


Figura 5- Constituintes do Módulo Fotovoltaico [18].

2.5 Sombreamento De Módulos Fotovoltaicos

Um módulo fotovoltaico é um arranjo de células fotovoltaicas ligadas entre si em série e paralelo. Aquando instalado, um módulo fotovoltaico está preparado para receber radiação solar em toda a sua extensão de forma a produzir energia elétrica. No entanto, devido ao efeito do sombreamento a produção elétrica pode estar condicionada [12].

As células fotovoltaicas funcionam como fotodiodos que, quando recebem radiação solar, produzem corrente elétrica [13]. Mas ao serem ligadas em série [Figura 7], implica que quando uma célula é sombreada, afete todo o sistema de produção elétrica, pois a fonte de corrente extingue-se, e este elemento passa a comportar-se como uma resistência que é atravessada pela corrente produzida pelas outras células [15], ficando sujeito a uma tensão inversa e provocando o

seu aquecimento, também chamado de *hot-spots*, que em casos extremos podem até destruir o módulo [12].

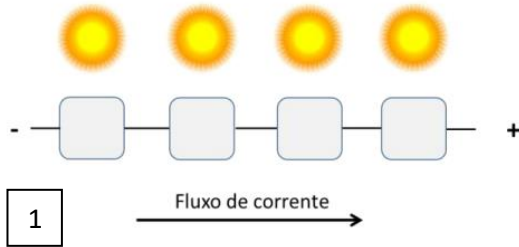


Figura 6- Ligação em série de células fotovoltaicas [14].

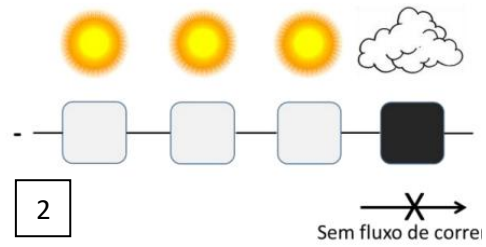


Figura 7- Ligação em série de células fotovoltaicas onde uma está sombreada [14].

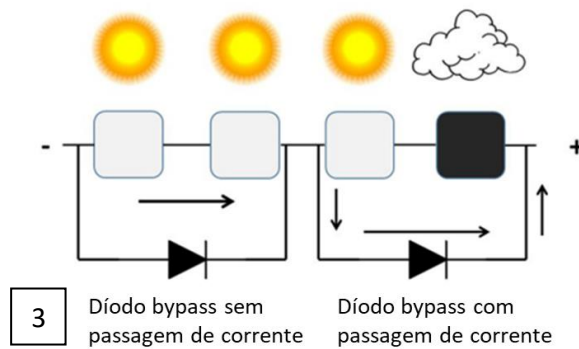


Figura 8- Células fotovoltaicas unidas por um diodo bypass [14].

Para a resolução do problema pode-se utilizar um diodo em paralelo com uma célula, ou um conjunto de células, para que este desvie a corrente da célula sombreada [Figura 8]. Este diodo, também chamado de diodo de *bypass*, é responsável em não permitir que todo o módulo seja afetado pelo sombreamento de uma única célula, além de proteger o módulo contra tensões muito altas que poderiam causar o aparecimento de *hot-spots* [12].

Os diodos *bypass* ao serem utilizados nos módulos fotovoltaicos que estejam sombreados numa célula, ou num conjunto de células, oferecem um caminho alternativo para a corrente, e assim limitando a dissipação de potência nesse conjunto de células sombreadas [12].

Os módulos fotovoltaicos atualmente produzidos são maioritariamente formados por células ligadas em série e, para os proteger dos efeitos do sombreamento, são ligados também alguns diodos *bypass* a grupos de células.

No entanto com a utilização dos diodos *bypass*, um terço da energia do módulo será perdida para proteger o próprio módulo. Uma das soluções para evitar esse problema e aumentar

a eficiência do módulo em condição de sombreamento parcial é cortar as células ao meio e alterar as configurações do módulo. Enquanto a corrente gerada pelas células é proporcional à área da própria célula, ao cortar as células pela metade, reduz-se a corrente gerada pela metade. As perdas devido à resistência em série dos conectores das células em um módulo estão relacionadas ao quadrado da corrente que passa pelos conectores, portanto, cortar as correntes pela metade reduz essas perdas para um quarto. É importante considerar que os módulos de meia-célula possuem o dobro de células e isso exige repensar o layout do módulo [72].

O sombreamento de uma célula fotovoltaica ou de um módulo, pode ter diversas origens, entre as quais o *soiling*.

2.5.1 Sombreamento Segundo A Posição Vertical Ou Horizontal Do Módulo

Em condições ideais, livres de sombreamentos, a produção fotovoltaica é exatamente a mesma independentemente se o módulo se encontra posicionado na horizontal ou na vertical. No entanto, na presença de sombreamentos na parte inferior do módulo, como por exemplo, devido a *soiling* acumulado, a posição do módulo pode ser fatal para o mesmo.

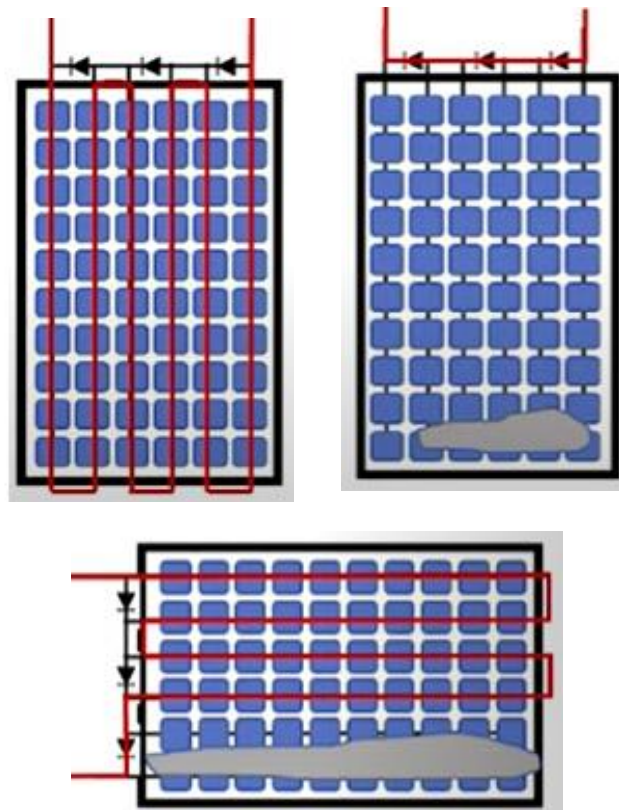


Figura 9- Um módulo fotovoltaico limpo e dois módulos fotovoltaicos sujos com orientações diferentes.

Enquanto num módulo fotovoltaico que esteja posicionado na vertical, o *soiling* acumulado na parte inferior do módulo pode ativar o funcionamento de todos os díodos *bypass* existentes, o que irá fazer com que o módulo deixe de produzir completamente. Num módulo fotovoltaico que esteja posicionado na horizontal, o *soiling* acumulado na parte inferior do módulo, apenas poderá ativar o funcionamento de um único díodo *bypass*, continuando as restantes fileiras do painel a produzir energia [16].

Ambas as posições são corretas na instalação dos módulos fotovoltaicos e, aquando da escolha do posicionamento, para além do sombreamento sobre a parte inferior do módulo, é necessário também ter em conta o espaço disponível para a instalação, se existe alguma possibilidade de sombreamento lateral do módulo ou, simplesmente, a estética da instalação.

2.6 Curvas Características De Funcionamento

Uma das formas de determinar as características elétricas de um módulo fotovoltaico é através do gráfico da sua curva I-V. Para cada ponto na curva I-V, o produto corrente-tensão representa a potência gerada para aquela condição de operação. É importante observar que, existe um ponto onde o produto entre a corrente (I_{MAX}) e a tensão (V_{MAX}) resulta no ponto de potencia máxima (P_{MAX}) que representa o ponto ótimo de funcionamento para um uso mais eficiente do módulo. Outros dos pontos importantes representados na curva, são o da tensão de circuito-aberto (V_{OC}) e a sua corrente de curto-circuito (I_{SC}). A tensão de circuito aberto define-se como a máxima tensão que o módulo pode atingir quando a corrente é zero (sem corrente no circuito); por sua vez a corrente de curto-circuito é a máxima corrente que se pode extrair do módulo, que acontece quando a carga tem tensão zero, isto é, está em curto-circuito. Os pontos mencionados, I_{MAX} , V_{MAX} , P_{MAX} , V_{OC} , I_{SC} , são os cinco parâmetros que especificam o módulo sob certas condições de irradiação e temperatura [19] [20].

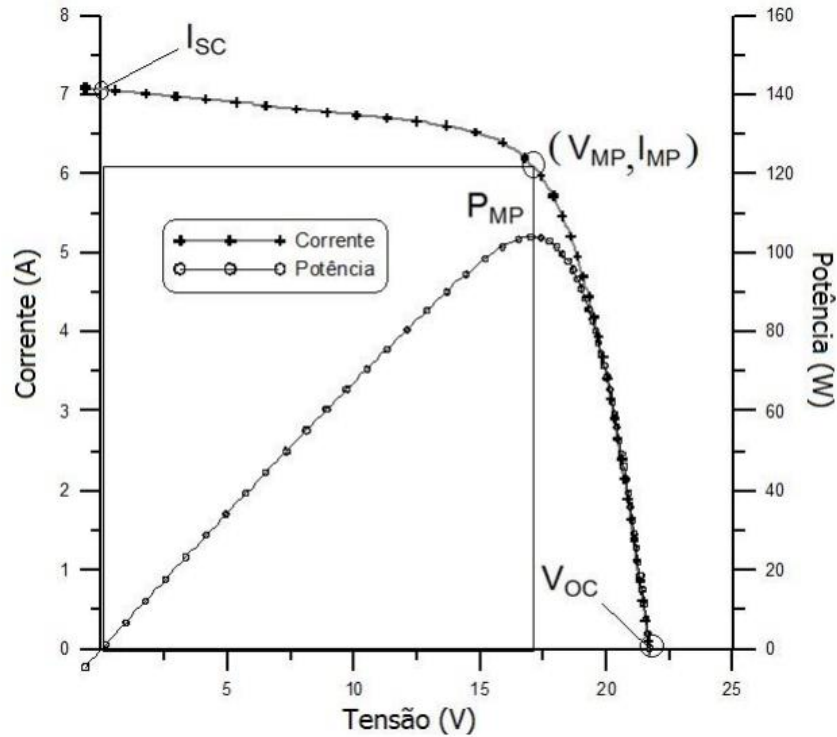


Figura 10- Curva característica I-V e curva de potência P-V para um módulo fotovoltaico [19].

Para além de um exemplo de uma curva I-V, a figura [Figura 10] também apresenta um gráfico de potência em função da tensão, onde nos é possível observar o ponto máximo da potência do módulo.

2.6.1 Parâmetros De Funcionamento De Uma Célula Fotovoltaica

2.6.1.1 Corrente De Curto Circuito, I_{sc}

A corrente de curto-circuito, I_{sc} , corresponde à corrente máxima que o módulo atinge, atendendo sempre aos valores de temperatura do módulo e de radiação incidente, correspondendo a uma tensão nula nos terminais [21].

2.6.1.2 Tensão De Circuito Aberto, V_{oc}

A tensão de circuito aberto, V_{oc} , é o valor máximo de tensão que a célula produz, atendendo aos valores de temperatura do módulo e de radiação incidente, tendo como correspondência um valor de corrente igual a zero [21].

2.6.1.3 Potência Máxima, P_{MAX}

A potência máxima, tal como o nome indica, é o valor máximo de potência que a célula fotovoltaica consegue produzir. Os pontos de tensão e de corrente no ponto de potencia máxima denominados, respetivamente, de tensão de potência máxima, V_{MAX} , e de intensidade de corrente de potência máxima, I_{MAX} [21]. O valor de P_{MAX} , pode ser obtido por:

$$P_{MAX} = I_{MAX} \times V_{MAX} \quad [2.1]$$

2.6.1.4 Fator De Forma, FF

O fator de forma corresponde ao valor do quociente entre a potência máxima da célula fotovoltaica e o produto da intensidade de corrente em curto-circuito pela tensão em circuito aberto. Podemos também traduzir este fator como sendo o quociente entre a potência máxima produzida pela potência que consideraríamos ser a ideal de produção, permitindo assim avaliar a qualidade da célula fotovoltaica [21].

$$FF = \frac{V_{MAX} \times I_{MAX}}{V_{OC} \times I_{SC}} = \frac{P_{MAX}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad [2.2]$$

2.6.1.5 Eficiência, η

A eficiência das células fotovoltaicas, também denominada por rendimento, é o parâmetro mais utilizado quando pretendemos comparar células fotovoltaicas ou quando queremos avaliar o desempenho de conversão da energia solar em energia elétrica da própria célula. Pode ser calculado pela seguinte forma:

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{G * A_M} * 100 \quad [\%] \quad [2.3]$$

onde P_{MAX} é o valor da potência máxima do módulo em W, G é o valor da irradiância em W/m^2 e A_M é a área do módulo em m^2 [22].

2.6.2 Fatores Que Afetam As Características Elétricas Dos Módulos

Num cenário de utilização dos módulos fotovoltaicos, estes estão sujeitos a condições ambientais diversas. Como consequência, os parâmetros de funcionamento das células fotovoltaicas poderão alterar-se devido a dois fatores: a radiação solar que incide sobre a célula e a temperatura a que esta se encontra.

Atendendo à curva I-V, podemos analisar como é que cada um destes fatores interfere com os parâmetros de funcionamento da célula.

2.6.2.1 Efeito da irradiância

A produção de energia elétrica através de produção fotovoltaica está diretamente relacionada com a irradiância que atinge o módulo. Assim sendo, como podemos observar na figura abaixo apresentada [Figura 11], para a mesma temperatura de operação e temperatura do ambiente constante, ao aumentarmos a intensidade da irradiância que atinge o módulo, a corrente elétrica gerada também aumentará, o que levará a valores mais altos para a potencia máxima do módulo [19].

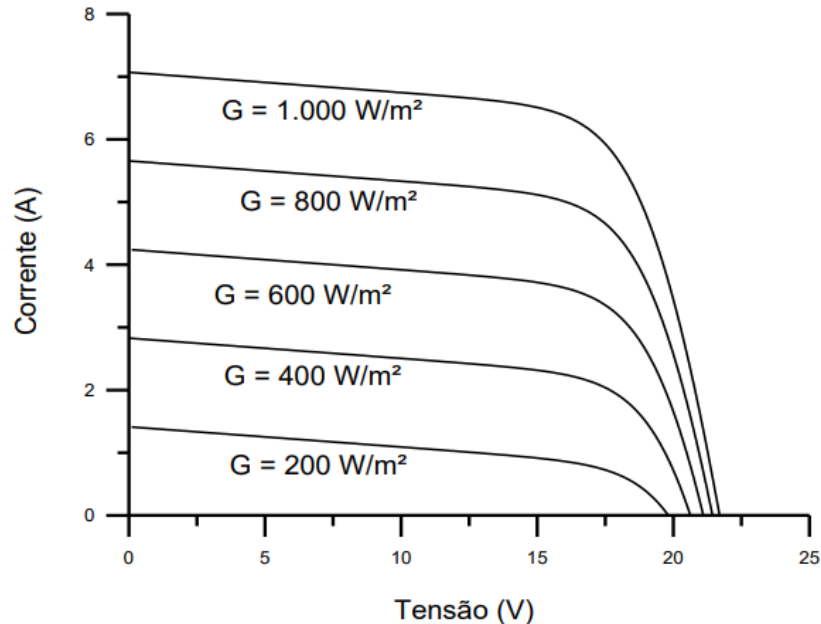


Figura 11- Curvas I-V para as mesmas condições de temperatura, mas com irradiâncias diferentes [19].

Se com a presença de sujidade na superfície do módulo fotovoltaico a luz solar pode ser absorvida, refletida, e/ou dispersada pois sofre um desvio no seu ângulo de incidência sobre o

mesmo, o que nos permite concluir que a irradiância que o atinge é menor do que aquela que seria de esperar no mesmo contexto, mas com o módulo limpo. Portanto, os valores de potência máxima do módulo também serão menores na presença de interferências na irradiância [19].

Atendendo ao modo como a eficiência de um módulo fotovoltaico é calculada [Equação 3], podemos verificar que com a potência máxima e com a irradiância a atingir valores menores, a eficiência do módulo também será menor do que aquela que seria de esperar nas mesmas condições, mas com o módulo limpo [19].

2.6.1.2 Efeito da temperatura

As variações da radiação incidente que se fazem sentir à superfície terrestre, assim como as variações da temperatura ambiente, afetam diretamente a temperatura a que célula fotovoltaica se encontra, refletindo-se na eficiência do módulo.

Na figura [Figura 12] podemos verificar como a curva I-V se comporta com o aumento da temperatura e podemos concluir que com o aumento da temperatura, o valor de tensão em circuito aberto diminui drasticamente, sendo que a corrente em curto-circuito aumenta ligeiramente. O valor de potência máxima também diminui ao longo que a temperatura da célula aumenta, logo atendendo à equação [Equação 3], podemos concluir que a eficiência do módulo diminui [19].

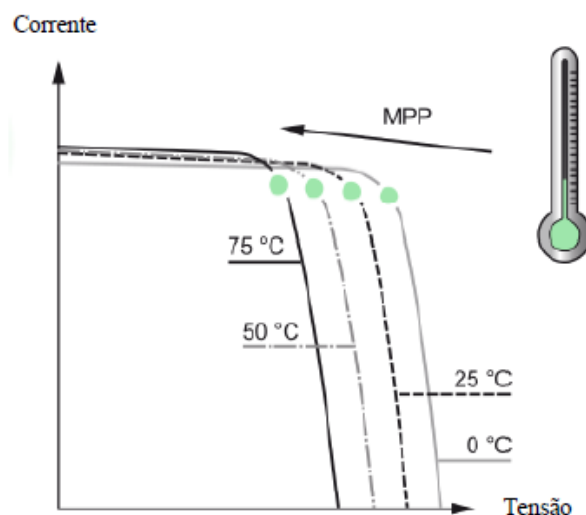


Figura 12- Curva I-V de uma célula fotovoltaica para diferentes valores de temperatura de funcionamento com a irradiância constante [23].

Em suma, com o aumento da temperatura, os valores da tensão diminuem, assim como o valor da potência máxima e conseqüentemente, uma diminuição da eficiência da célula.

CAPÍTULO 3 – SOILING

3.1 Definição

O *soiling* define-se como o fenómeno de deposição e acumulação de partículas na superfície dos painéis fotovoltaicos (e de outras superfícies fotovoltaicas), o que leva à diminuição da luz solar que os atinge, que tem como consequência a redução da eficiência de conversão dos módulos [24].

As partículas depositadas não só fazem com que exista uma diminuição na irradiância solar de entrada do painel, como também um desvio no ângulo de incidência da radiação solar. Como a eficiência de um sistema fotovoltaico é proporcional à luz solar que lhe chega, com a presença de acumulação de *soiling* no sistema é de prever que o painel tenha uma eficiência abaixo do ideal. Com eficiência mais baixa iremos obter uma produção de energia menor [24].

Embora seja a atenuação da irradiância de entrada a principal consequência da presença de *soiling* sobre os módulos PV, como já falado, esta não é a única causa que levará à redução da produção de energia.

A avaliação do impacto do *soiling* num sistema fotovoltaico é um desafio verdadeiramente complexo devido aos diversos fatores influenciadores existentes. Esses fatores poderão ser ambientais (como a concentração de poeiras na atmosfera, a humidade, a temperatura ambiente, a velocidade e direção do vento ou a intensidade da chuva), devido às propriedades do módulo FV (como por exemplo as propriedades do vidro), às características do local e da respetiva instalação (ângulo de incidência e orientação), à ação do homem no meio, entre outros. Posto isto, será necessário fazer um estudo de impacto do *soiling* em cada instalação fotovoltaica para que seja avaliado o quanto prejudica a produção de eletricidade e se é necessário, ou não, realizar uma limpeza de modo a minimizar os impactos causados [25].

3.2 Causas Para A Presença De *Soiling* Nos Sistemas Fotovoltaicos

A taxa de deposição de partículas na superfície de um módulo fotovoltaico depende de fatores ambientais, de fatores das propriedades do solo e de fatores da instalação do sistema. Em todos eles a variação temporal também deve ser considerada.

3.2.1 Fatores ambientais

Os fatores ambientais definem que a taxa de contaminação da superfície do módulo solar está relacionada com a intensidade dos processos da natureza envolvente e a fenômenos meteorológicos. Podemos dizer que os fatores ambientais podem resultar de fontes naturais, como por exemplo os excrementos de pássaros, pólenes ou ventos intensos; ou de fontes humanas como partículas provenientes dos processos de combustão [24].

3.2.1.1 Velocidade e direção do vento

O vento pode ser visto como um agente transportador de poeiras, logo desempenha um papel importante tanto na deposição como na remoção das mesmas na superfície dos módulos fotovoltaicos. Enquanto os ventos com velocidades mais baixas, isto é, ventos fracos, são propícios a transportar poeiras até aos módulos e a depositá-las, os ventos com velocidades mais altas, também chamados de ventos fortes, podem ter a capacidade de limpar os módulos. Logo, é correto afirmar que a taxa de *soiling* está relacionada com a velocidade do vento no local e com a orientação dos painéis, uma vez que a taxa de deposição de poeira pode aumentar quando o painel está direcionado contra a direção do vento [25].

3.2.1.2 Intensidade Das Chuvas

A chuva afeta significativamente o processo de deposição de poeiras pois tanto podem agir no processo como agente de remoção e/ou como agente de deposição de *soiling* sobre os módulos fotovoltaicos [24].

Chuvas com baixa intensidade e frequência tendem a misturar-se com as partículas que estão suspensas na atmosfera, o que resulta numa deposição de *soiling* sobre os painéis fotovoltaicos. Quando ocorre com frequência e intensidade elevada, a chuva poderá ter a capacidade de lavar as partículas que estão sobre a superfície dos módulos fotovoltaicos, o que levará a uma maior transmitância do vidro da cobertura do painel [25].

Um estudo realizado por A. Kimber em 2006, intitulado por “*The Effect of Soiling on Large Grid-Connected Photovoltaic Systems in California and the Southwest Region of the United States*” concluiu que para limpar e remover com eficiência a totalidade de *soiling* presente nos módulos é necessário um mínimo de 20 mm de chuva [26]. Quando tal não acontece, a chuva não é suficiente para a limpeza natural, logo a poeira presente na parte superior do módulo é reinstalada na parte inferior o que leva a uma transmitância reduzida nessa área do módulo [25].

Também como já referido, a chuva com baixa intensidade pode promover a deposição de *soiling*, e perante um módulo com muita poeira, essas chuvas fazem com que exista uma melhor adesão do *soiling* à superfície do módulo e à possibilidade alta de transformar a poeira existente em lama, tornando a superfície do módulo mais opaca, reduzindo a transmitância do vidro [27].

Na figura [Figura 13], é possível observar a quantidade de chuva por mês, em milímetros, entre os meses de Novembro de 2010 e Março de 2012 e a percentagem de perdas devido à presença de *soiling*. Podemos verificar que, em regra geral, quando as quantidades de chuva no mês são superiores a 20 mm, a percentagem de *soiling* é baixa e, nos meses secos, onde a quantidade de chuva é menor que 20 mm, a percentagem de *soiling* é alta. É importante frisar que em Agosto de 2011, é quando ocorre um maior pico na percentagem de perdas devido ao *soiling*, pois foi quando existiu uma precipitação de 20 mm, o que foi suficiente para limpar a superfície, após meses secos.

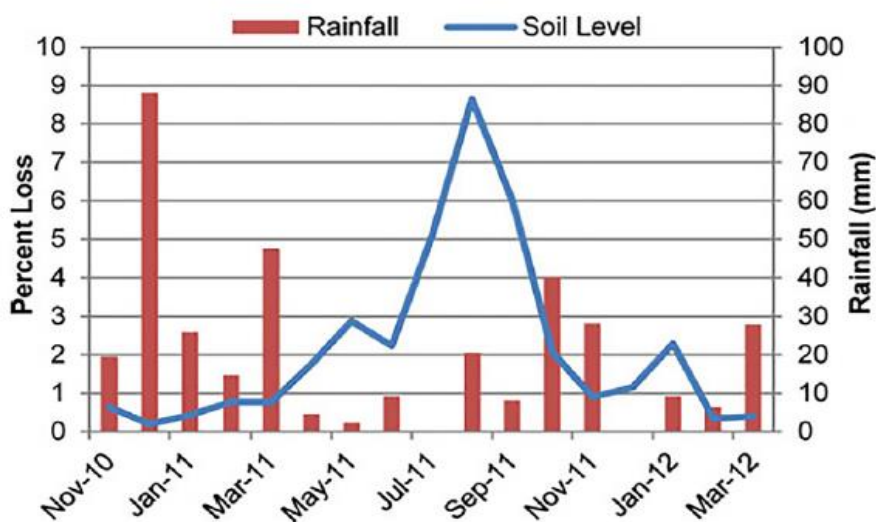


Figura 13- Gráfico que relaciona a taxa das perdas por soiling leve com a precipitação ocorrida em cada mês [26].

3.2.1.3 Humidade

A humidade determina a força de adesão entre as partículas de *soiling* e a superfície dos módulos fotovoltaicos. Em locais mais húmidos (normalmente países com proximidade ao oceano), verifica-se que existe um aumento de viscosidade nas partículas presentes na superfície dos módulos [29].

A presença de orvalho e posteriormente com a sua evaporação promove a formação rápida de aglomerados de sujidade mais densos.

É de notar que níveis mais altos de humidade conduzem a forças capilares mais altas, o que produz uma ponte de ligação entre a superfície e o contaminante, ampliando a adesão das partículas às superfícies [Figura 14]. Isso significa que quando há nevoeiro ou neblinas contaminadas de partículas, que entram em contato com a superfície do módulo, é mais provável que estas sejam depositadas nos módulos [30].

Podemos assim concluir que quanto maior a humidade relativa na atmosfera, maior é a aderência das partículas de *soiling* ao módulo.

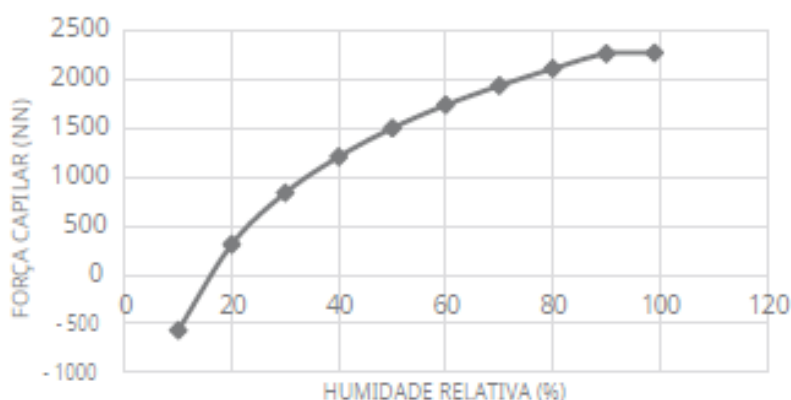


Figura 14- Gráfico que relaciona a força capilar com a humidade relativa (%) [30].

3.2.1.4 Temperatura

A temperatura ambiente está diretamente relacionada com a humidade. Quando a temperatura ambiente é alta, a humidade da área onde se encontra a instalação diminui, logo o clima local fica seco, e a poeira pode ser levantada facilmente pelo vento [29]. No deserto, clima árido, a temperatura é alta, e a taxa de deposição de poeira é também alta.

Perto do mar, onde a temperatura por norma é mais baixa, e a humidade, por sua vez, mais alta devido à presença de vapor no ar, a superfície do módulo fotovoltaico poderá ficar preenchida com gotas de água, tornando-se mais adesiva e pegajosa às partículas de poeira do ar [28].

3.2.1.5 Excrementos De Pássaros

No estudo do impacto de *soiling* num sistema fotovoltaico é bastante importante ter em conta os excrementos de pássaros. Estes, para além de aumentarem o acúmulo das partículas presentes na atmosfera na superfície do módulo também bloqueiam a passagem de luz solar para algumas células do módulo fotovoltaico [31]. No caso da ausência de díodos bypass, leva ao aquecimento das células, gerando “*hot spots*” no módulo fotovoltaico, o que poderá levar a danificar permanentemente o módulo fotovoltaico.

3.2.2 Propriedades do solo

As propriedades do solo onde o sistema está instalado determinam que as propriedades físicas e químicas das partículas são bastante relevantes para determinar o impacto do *soiling* na transmitância do vidro que se envolve a superfície do painel [24].

3.2.2.1 Características Das Partículas De *Soiling*

As características das partículas de *soiling* variam consoante o local onde está a ser realizado o estudo. Partículas de *soiling* com características diferentes tem uma adesão e remoção da superfície também diferente. Partículas mais finas proporcionam um maior sombreamento sobre os módulos, o que leva a maiores perdas na eficiência energética aquando comparadas a partículas mais grossas. No entanto, as partículas finas são depositadas uniformemente não gerando um sombreamento parcial do módulo [24] [35]. No entanto, seja qual for o tamanho das partículas, há uma correlação muito clara entre a acumulação de *soiling* e o desempenho fotovoltaico. Isso explica-se pelo facto de que o acúmulo de *soiling* reduz a transmitância do vidro do painel solar, que por sua vez, reduz o I_{SC} do sistema.

Assim como a transmissividade do vidro, o I_{SC} e a eficiência do painel diminuem à medida que a densidade de deposição de *soiling* aumenta. Esta taxa de degradação de I_{SC} é maior na deposição inicial até um certo nível, após o qual diminui apenas ligeiramente. No entanto, o tipo de painel e o tipo de *soiling* acumulado podem determinar o grau de redução de eficiência.

Além do tamanho e densidade, diferentes tipos de partículas apresentam características físicas diferentes, que determinam quanto tempo podem viajar na atmosfera, com que rapidez se depositam, com que facilidade são limpas e com graus de transparência diferentes [24].

Também a interação de limpeza e deposição de *soiling* devido a chuvas e vento tem influência consoante o tamanho das partículas. Isto é, enquanto a chuva tem um efeito de limpeza

limitado nas partículas pequenas quando comparadas às maiores [34], a eficiência de remoção de *soiling* pelo vento depende da força relativa da força de adesão entre superfície e partículas, no entanto a força de adesão é inversamente proporcional ao diâmetro da partícula [32] [33].

3.2.3 Características da instalação

Por fim, os fatores da instalação dizem respeito ao modo como os parâmetros de instalação do sistema afetam a acumulação de *soiling* na sua superfície [24].

3.2.3.1 Ângulo De Inclinação E Orientação Do Módulo

O ângulo de inclinação é um fator bastante importante no processo de deposição de *soiling*. Para uma superfície do módulo horizontal, com um ângulo de inclinação de 0°, a deposição de poeiras é maior devido à força gravitacional e à ausência de limpeza natural. Para uma superfície do módulo vertical (ângulo de inclinação 90), a taxa de deposição de poeira é baixa. Logo podemos afirmar que a taxa de *soiling* numa superfície horizontal é maior em comparação com as partículas que se depositam na superfície vertical [36].

Num módulo que esteja inclinado é verdadeiro afirmar que com a influência das forças gravitacionais, os componentes de *soiling* podem deslizar da parte superior do módulo fotovoltaico para a parte inferior à medida que o ângulo de inclinação aumenta [37].

A orientação do módulo fotovoltaico é um fator essencial na taxa de deposição de *soiling*, pois o módulo fotovoltaico que fica perpendicular a ventos fracos irá acumular mais poeiras [37].

3.2.3.2 Altitude Da Instalação

Por norma, quanto maior a altitude menor é concentração de poeiras no ar. Com esta afirmação é possível deduzir que para módulos fotovoltaicos instalados a grandes altitudes a deposição de poeiras será menor aquando comparando a módulos instalados perto do solo [36].

A velocidade do vento também aumenta com o aumento da altitude. Como já descrito, velocidades de vento mais proeminentes promovem a limpeza natural dos módulos fotovoltaicos.

3.2.3.3 Tipo De Superfície Do Painel Fotovoltaico

O tipo de material que constitui a superfície do painel fotovoltaico é também um fator muito importante no que diz respeito à deposição de *soiling* sobre si. Este deve ser liso, com a menor taxa de rugosidade possível, que seja isento que qualquer tipo de aderência sobre si e

transparente. Assim, se a superfície não for lisa, permitirá que mais *soiling* se acumule. Quanto mais áspera for a superfície, mais difícil será para o vento e a chuva limpá-lo de forma eficaz.

Vinay Gupta em “Comprehensive review on effect of dust on solar photovoltaic system and mitigation techniques” [25], menciona dois estudos, um feito por Garg [39], e outro por Nahar e Gupta [38] revelou que a deposição de poeira foi menor na superfície do vidro em comparação com o plástico PVC e a superfície acrílica.

Outro aspeto importante em relação à superfície dos painéis são os revestimentos. Existem vários tipos de revestimentos que fazem com que a superfície fique pegajosa e logo com mais tendência a acumular mais *soiling*, mesmo em superfícies lisas. A poeira depositada em cima destes revestimentos de superfície é menos provável de ser levada pelo vento [25].

Por outro lado, também podemos ter os revestimentos que podem reduzir a sujidade, permitindo que o painel se limpe de forma natural. Mais à frente neste trabalho será explicado melhor os tipos de revestimento das superfícies dos painéis fotovoltaicos para reduzir a sujidade.

3.2.4 Impacto Da Poluição Na Produção Fotovoltaica

A poluição do ar tem uma influência muito significativa na produção de energia solar fotovoltaica, pois os poluentes atmosféricos presentes no ar reduzem a radiação solar que atinge as superfícies fotovoltaicas.

A quantidade crescente de poluição com origem antropogénica diminui, claramente, a radiação solar que atinge o globo e por sua vez a que atinge as superfícies fotovoltaicas, por meio de reflexões, espelhamentos e absorções da luz solar [27].

3.2.4.1 Impacto Da Covid-19 Na Produção Fotovoltaica E Na Deposição De *Soiling*

Como é de conhecimento geral, desde o final do ano de 2019 que a COVID-19 se espalhou pelo mundo. Na tentativa de controlo da pandemia global, governos de todo o mundo implementaram medidas de confinamentos e quarentenas de forma a controlar a propagação. O que resultou com que várias atividades económicas, como por exemplo as associadas a mobilidade, transporte, turismo, agricultura, entre outras... estivessem praticamente sem laborar. Estas medidas de bloqueio trouxeram benefícios, a curto-prazo, para o meio ambiente e para a saúde, pois reduziram-se as emissões antrópicas de poluentes atmosféricos, melhorando a qualidade do ar e como consequência não só existiu uma melhora na transparência atmosférica, como se depositou menos *soiling* sob as tecnologias fotovoltaicas desta origem, o que permitiu

que mais radiação solar atingisse a superfície e assim aumentando a geração fotovoltaica de energia.

Em várias cidades de diferentes países, como por exemplo Londres em Inglaterra ou Dali na Índia, foi sentido que ao longo que o tempo de quarentena ia aumentando, a geração de energia solar também aumentava [40].

A produção fotovoltaica na Alemanha, no Reino Unido e em Espanha, atingiu recordes de produção de respetivamente 32,2 GW, 9,68 GW e 6,3 GW durante a primavera de 2020, e o principal motivo para tal foi o facto do ar mais limpo e mais livre de poluentes devido às medidas impostas pelos governos para o controlo da pandemia [41].

3.3 Seletividade Espectral Devido Ao *Soiling*

Um aspeto importante no estudo do impacto do *soiling* no desempenho de sistemas fotovoltaicos de todas as diferentes tecnologias (e não só em painéis), é na questão de como é que o *soiling* influencia na transmissão da irradiação solar incidente. Este efeito é explicado pela dispersão de Mie, que se aplica quando a partícula que está presente na superfície fotovoltaica que é responsável pela dispersão da luz apresenta diâmetro da mesma ordem de grandeza, ou ainda maior, que o comprimento de onda da luz incidente [42].

As partículas de *soiling* são na sua maioria constituídas por diversos tipos de poeiras, pólenes, argilas e grãos de areia, têm seu diâmetro na ordem de micrômetros (μm). Os comprimentos de onda perceptíveis pelas tecnologias fotovoltaicas começam na casa de 200 nanômetros (nm), que caracterizam o espectro do ultravioleta, chegando até 1,2 micrômetro (μm), responsável pelo espectro do infravermelho [Figura 15] [43].

Assim, se as partículas apresentarem um diâmetro da mesma ordem de grandeza, ou maior, que o comprimento de onda da luz incidente, irá impedir que a radiação atinga o módulo.



Figura 15- Espectro da radiação Solar [44].

3.4 Metodologia De Medição Do Soiling

3.4.1 Por Comparação De Módulos

Esta metodologia tem como objetivo observar a diminuição da eficiência devido ao *soiling* por comparação de dois painéis fotovoltaicos iguais. Ao colocar os dois painéis lado a lado, sujeitos às mesmas condições, mas com a diferença que um é limpo regularmente antes de cada medição da curva IV (dispositivo de controle), enquanto o outro permanece sempre sujo (dispositivo sujo) a não ser que seja limpo por forma natural. Comparando as suas produções conseguimos verificar como o acumular de *soiling* sob a superfície afeta a produção fotovoltaica.

É recomendável que as medições das curvas IV sejam feitas regularmente, sempre com a mesma periodicidade, e no mesmo período do dia (o recomendável é que seja próximo do meio-dia solar).

O índice da taxa de *soiling*/ *Soiling Ratio* para os dois painéis pode ser calculado através da corrente de curto-circuito (I_{SC}) ou através da potência máxima (P_{MAX}). No caso de estarmos perante painéis de silício, quando o *soiling* está sobre a superfície fotovoltaica de forma homogénea, ambas as formas de calcular o *Soiling Ratio* dão resultados semelhantes, mas quando o *soiling* não está de forma homogénea sob as superfícies, o resultado do *soiling ratio* quando calculado através da corrente de curto-circuito (SR_{ISC}) pode resultar num valor subestimado ou superestimado quando comparado com o *soiling ratio* calculado pela potência máxima ($SR_{P_{MAX}}$). A razão para tal é o facto de a presença não homogénea do *soiling* sob a superfície, poder distorcer a curva I-V de tal forma que em alguns casos muda consideravelmente o ponto de potência máxima na curva [64].

Em termos matemáticos o SR_{ISC} [3.4] e o $SR_{P_{MAX}}$ [3.5] podem ser calculados por:

$$SR_{ISC} = \frac{I_{SC}^{SUJO}}{I_{SC}^{SUJO0} [1 + \alpha (T_{SUJO} - T_0)] \left(\frac{G}{G_0}\right)} \quad [3.4]$$

onde I_{SC}^{SUJO} é a corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico sujo, o I_{SC}^{SUJO0} é a corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico sujo, mas limpo em condições STC, α é o coeficiente de temperatura de curto-circuito, T_{SUJO} é a temperatura do painel sujo no dia da medição, T_0 é a temperatura em condições de referência (25°), G é a irradiância medida no dia do experimento no painel e G_0 é a irradiância em condições STC (1000 W/m²) [64].

$$SR_{P_{MAX}} = \frac{P_{MAX}^{SUJO}}{P_{MAX}^{SUJO0} [1 + \gamma (T_{SUJO} - T_0)] \left(\frac{G}{G_0}\right)} \quad [3.5]$$

sendo P_{MAX}^{SUJO} o valor da potência máxima do painel sujo, P_{MAX}^{SUJO0} , é a potencia máxima do painel sujo, quando limpo, γ é o coeficiente de temperatura para a potência.

Para calcular a irradiância que incide no painel limpo, G [3.6]:

$$G = G_0 \frac{I_{SC}^{LIMPO} [1 - \alpha (T_{LIMPO} - T_0)]}{I_{SC}^{LIMPO0}} \quad [3.6]$$

Tendo em conta que I_{SC}^{LIMPO} é a corrente de curto-circuito do painel limpo no dia do experimento, I_{SC}^{LIMPO0} é a corrente de curto-circuito do painel limpo em condições STC e por fim T_{LIMPO} diz respeito à temperatura do painel limpo no dia do experimento.

No entanto, quando os painéis fotovoltaicos não são de silício, mas sim de outro material semiconductor, como por exemplo o Telureto de Cádmiu, CdTe, o *soiling ratio* pode ser calculado das seguintes formas [3.7] [3.8] [65]:

$$SR_{ISC} = \left(\frac{I_{sc}^{sujo}}{I_{sc}^{limpo}} \right) \quad [3.7]$$

$$SR_{P_{MAX}} = \left(\frac{P_{MAX\text{sujo}}}{P_{MAX\text{limpo}}} \right) \quad [3.8]$$

Após a determinação da *soiling ratio*, esta deve ser comparada com a variação da precipitação diária para o período em estudo, atendendo aos dados de estações meteorológicas instaladas próximas da instalação do experimento, com o objetivo de analisar o comportamento das perdas ao longo de períodos secos e calcular a relação de *soiling* para esse local [65].

3.4.2 Acumulação De Massa

Para caracterizar a acumulação de massa de *soiling* é necessário instalar uma *glass tree* [Figura 16] - que se trata de uma estrutura, montada perto dos painéis fotovoltaicos, que posiciona os vidros em diferentes ângulos de inclinação e com orientações também distintas de forma que seja possível analisar como é que a direção do vento favorece, ou não, a acumulação de *soiling*; uma balança precisa, pois, o peso do *soiling* acumulado atinge valores bastante baixos e vários vidros semelhantes.

Todas amostras de vidro tem uma área de superfície semelhante, e são expostas as condições ambientais contínuas (idealmente durante períodos secos). Cada uma das amostras é mantida sempre com a mesma orientação e inclinação [5] [47].

O procedimento inicia-se sendo cada amostra pesada, previamente limpa, assim marcando o dia zero da experiência. Em seguida, as amostras devem ser posicionadas na *glass tree*, cada uma na sua posição. Depois, com uma regularidade fixa, que normalmente é semanalmente, torna-se a pesar os vidros, mas desta vez já com toda a acumulação de *soiling* [5].

De forma a minimizar erros de pesagem, é importante que as condições de pesagem sejam mantidas constantes, sendo sempre usada a mesma balança em todas as medições e que sejam realizadas três medições de pesagem para cada amostra. O peso das amostras deve ser definido como resultado da média dessas três medições [47].

A massa acumulada, $m_a(t)$, irá ser calculada como na equação apresentada [3.9], onde $m(t)$ e $m(0)$ dizem respeito, respetivamente, à massa pesada em determinado dia experimental e à massa quando o vidro está limpo:

$$m_a(t) = massa(t) - massa(0) \quad [g] \quad [3.9]$$

É importante referir que a não ser para a primeira pesagem, durante esta metodologia, em nenhuma das placas de vidro será realizada uma ação de limpeza por parte humana. Caso exista uma redução de massa, será devido à limpeza por fatores ambientais, como o vento, a chuva ou o orvalho [5].



Figura 16- Fotografia da glass tree presente na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

3.4.3 Transmissividade Dos Vidros

A acumulação de partículas na superfície dos painéis fotovoltaicos faz com que a transmitância das suas superfícies diminua, o que tem impacto a nível das perdas óticas do painel, assim diminuindo a sua eficiência [47].

Para quantificar como o *soiling* presente prejudica, podemos fazer uma análise da transmitância dos vidros. Assim é necessário instalar uma *glass tree* perto dos painéis fotovoltaicos e vários vidros semelhantes.

Para além do que já mencionado, para realizar a parte laboratorial deste experimento é essencial usar um espectrómetro, uma esfera integradora, fonte de luz, um vidro limpo e um computador com um programa para análise, que poderá ser o *SpectraSuite* (programa usado nos laboratórios da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa).

Inicialmente, começa-se por montar o sistema de medição, ligando o espectrómetro ao computador e à esfera integradora, e esta por sua vez é ligada à fonte de luz.

Após se iniciar o programa, por exemplo o *SpectraSuite*, com uma nova medição de transmitância e de se calibrar o sistema, mediu-se a transmitância do ar e a do vidro limpo (que foi previamente guardado no laboratório de forma a não ficar sujeito a *soiling* e assim prevenindo que as suas características de transmitância sejam alteradas acidentalmente).

Para uma gama de comprimento de onda, λ , entre os 400 e os 900 [nm], mede-se a transmitância em quatro zonas diferentes (duas para os locais de maior e menor concentração de partículas) de cada vidro da *glass tree*. No final, voltamos a medir a transmitância do vidro limpo, de forma a garantir que as condições das medições das diversas transmitâncias não se alteraram.

A perda de transmitância do vidro com *soiling* é obtida aplicando a seguinte equação [3.10] [47]:

$$T(\lambda) = \frac{T_{\text{vidro}}}{T_{\text{vidro limpo}}} \quad [3.10]$$

Devido à enorme quantidade de dados obtidos em cada medição da transmitância de cada vidro, para se chegar a um resultado dos valores de $T(\lambda)$, é necessário aprofundar os conhecimentos em Python e desenvolver um código para correr todos os dados de forma mais rápida e eficaz.

3.4.4 Acumulação De Massa E A Transmissividade Dos Vidros Em Simultâneo

Frequentemente as duas metodologias anteriores são estudadas em simultâneo. O que vai promover a conseguirmos calcular a taxa de *soiling* (SRatio).

Os valores obtidos das pesagens, massa (t), durante o procedimento da acumulação de massa, foram usados para definir a densidade gravimétrica (ω), que alcançada pela divisão da média de peso das três pesagens do vidro pela área da placa [47].

A taxa de *soiling* (SRatio) pode ser então calculada a partir da metodologia proposta por Coello e Boyle [45]. Assim, a perda de transmitância é correlacionada com a densidade gravimétrica através da equação [3.11]:

$$\left(1 - \frac{T_{\text{vidro}}}{T_{\text{vidro limpo}}}\right) \% = 34,37 \operatorname{erf}(0,17\omega^{0,8473}) \quad [3.11]$$

onde $\frac{T_{\text{vidro}}}{T_{\text{vidro limpo}}}$ diz respeito à perda de transmitância, ω é a densidade gravimétrica dada em (g/m²) e erf é a função de erro de Gauss.

A perda de transmitância varia de 0 a 100%, sendo que, para condições ideais de operação de um módulo fotovoltaico, a perda de transmitância deve ser igual a 0%, enquanto a taxa de *soiling* será igual a 1 ou 100% (condição de ausência de deposição de sujidade). Assim, a taxa de sujidade pode ser obtida subtraindo uma condição ideal ($SRatio = 100\%$) pela perda de transmitância [46]:

$$(SRatio)\% = 100\% - 34,37 \operatorname{erf}(0,17\omega^{0,8473}) \quad [3.12]$$

3.5 O Que Estava Programado Nesta Dissertação

Como já visto ao longo desta tese, o sombreamento de células solares devido ao *soiling* é um dos motivos que pode originar perdas de potência na produção de energia elétrica. Contudo, em ambiente urbano, os sistemas fotovoltaicos são instalados locais altos e muitas vezes com difícil acesso, o que faz com que o processo de deteção e remoção do *soiling* seja complicado e, conseqüentemente, descorado. Assim, o que inicialmente estava programado estudar neste trabalho era o efeito do *soiling* nos painéis fotovoltaicos instalados no Campus Solar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, a melhor forma para o detetar e projetar um protótipo que indicaria quando é que seria necessário fazer a limpeza ao painel. Este trabalho teria de ser desenvolvido de forma contínua semanalmente, mas devido ao *lockdown* causado pela pandemia COVID-19, não foi possível desenvolver o estudo, sendo que os dados que foram obtidos são insuficientes para tirar conclusões assertivas. No entanto, na minha opinião, é importante referir todo o trabalho desenvolvido até à pandemia.

Assim o objetivo inicial deste trabalho seria verificar o efeito do *soiling* e encontrar o melhor protótipo que identificaria quando é que este começa a ser prejudicial para a eficiência do painel fotovoltaico, ou seja, que nos indica quando é que deve ser limpo. Assim, inclui as medições da acumulação de massa e os registos da transmitância dos vidros, a comparação do rendimento entre painéis semelhantes (praticamente iguais) sendo que um é limpo regularmente e o outro nunca é limpo ao longo do estudo e, ao mesmo tempo, estudar e desenvolver vários modelos de detetores de *soiling*, testá-los em ambiente laboratorial e verificar qual seria o melhor para adaptar aos painéis. Toda esta fase seria desenvolvida dentro campus da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, tanto em meio exterior, no Campus Solar, como em laboratório.

3.5.1 Estudo Do *Soiling* Através Da Produção De Energia

Este estudo tinha como objetivo observar a diminuição da eficiência devido ao *soiling* por comparação de dois painéis fotovoltaicos iguais. Assim, ao colocar os dois painéis lado a lado, sujeitos às mesmas condições, mas com a diferença que um seria ser limpo regularmente (dispositivo de controle), enquanto o outro permaneceria sempre sujo (dispositivo sujo). Considera-se que esta solução é simples e eficaz uma vez que quantifica diretamente o impacto do *soiling* na produção de energia por parte do painel.

A avaliação do efeito do *soiling* consiste no cálculo do *soiling ratio* (SR) calculado com base nos valores da corrente de curto-circuito (I_{sc}) e nos valores de potência máxima (P_{max}), fornecidos pela curva IV. O *soiling ratio*, matematicamente, compara as correntes de curto-circuito (I_{sc}), e a potência máxima (P_{max}), dos dois painéis fotovoltaicos em estudo. O seu valor varia entre 1, quando o painel/dispositivo de controle, está completamente limpo, e 0, quando se encontra completamente sujo. Quando o *soiling* está distribuído de forma homogênea pelo painel, calcular o *soiling ratio* pelos valores da corrente de curto-circuito ou pelos valores da potência máxima, irá resultar em valores bastante semelhantes. A diferença está quando o *soiling* não está distribuído de forma homogênea. Nesse caso, o cálculo teria de ser feito com base nos valores da corrente de curto-circuito e resultaria num valor superior ao que é resultado quando calculado por base na potência máxima. A razão para tal acontecer é a ação do *soiling* não uniforme pelo painel modifica a curva IV de tal maneira que, em alguns casos, altera consideravelmente o ponto de potência máxima.

3.5.2 Estudo Do *Soiling* Em Placas De Vidro

Durante esta fase do estudo, as placas de vidro não seriam limpas, a não ser por causa natural, isto é, no caso de chuva. A acumulação de partículas na superfície dos painéis fotovoltaicos afeta a sua eficiência devido a perdas óticas, por isso, nesta parte do estudo seria analisada a massa e a transmitância de cada vidro de forma a obter a quantidade de *soiling* que fica acumulado, e o quão este seria prejudicial, longo das medições. Para colocar os vidros no exterior foi necessário usar uma *glass tree*, onde os vidros estavam dispostos com diferentes ângulos de inclinação e com direções também distintas de forma que fosse possível analisar como é que a direção do vento favorece, ou não, a acumulação do *soiling*.

3.5.3 Modelos De Detecção De *Soiling*

Limpar painéis fotovoltaicos arrecada custos de manutenção para o painel e implica, em alguns casos, riscos de segurança para quem os limpa (como por exemplo quando os painéis estão

em telhados altos), por isso, a limpeza é tantas vezes desprezada pelos proprietários dos painéis. No entanto, a falta de limpeza irá provocar uma redução no rendimento dos painéis, por isso nesta tese, inicialmente, tinha-me proposto a desenvolver um protótipo que indicaria quando é que a potência fornecida ao painel é significativamente afetada devido à ação do *soiling* acumulado e, por consequência, me diria quando é que o termos de remover. Assim, só o termos de limpar quando for mesmo necessário e não é preciso haver riscos de segurança para verificar se temos de limpar ou não.

Juntamente com o meu orientador, o professor Miguel Brito, pensamos em desenvolver os seguintes modelos de deteção, sendo constituídos pelos elementos da legenda abaixo.

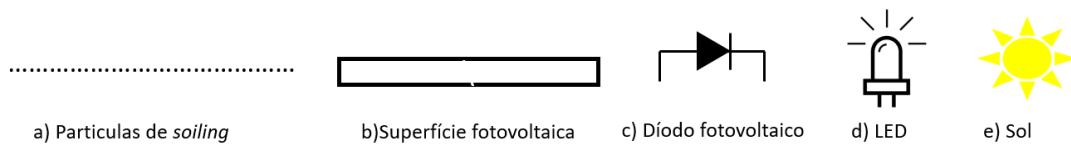


Figura 17- Elementos necessários para o desenvolvimento dos modelos de deteção de soiling.

Modelo 1

Neste modelo 1 [Figura 18] o LED e o díodo estão dentro do sistema fotovoltaico, por detrás da superfície, mas isolados um do outro, de forma que o díodo não detete a luz do LED quando não é suposto.

O LED ao emitir luz, esta pode passar pela superfície fotovoltaica, e aí significa que esta não se encontra suja, ou pode refletir-se e assim intercepar o díodo.

Quando o díodo recebe a luz vinda do LED significa que o painel se encontra sujo.

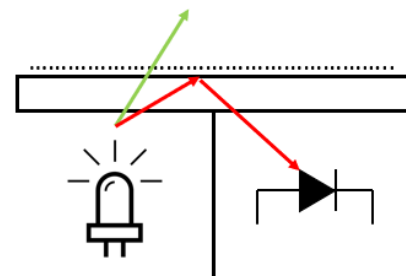


Figura 18- Projeto do modelo 1.

Embora não esteja representado na figura [Figura 29], ao passar pela superfície, a luz do LED irá sofrer refrações e reflexões, o que faz com que o díodo receba sempre uma percentagem de luz vinda do LED. Seria necessário verificar em laboratório a quantidade da percentagem de luz recebida pelo díodo que indique quando é que a superfície se encontra suja, ao ponto de ser essencial limpar.

Modelo 2

O modelo 2 pode ser realizado de duas formas análogas, uma a usar a luz provida de um LED [Figura 19] e outra a usar a luz vinda do sol [Figura 20]. Aqui, independentemente da fonte de luz usada, esta viria do exterior da superfície fotovoltaica e o díodo estaria por detrás da

superfície fotovoltaica (dentro do sistema). Se a luz que viria da fonte, passar a superfície fotovoltaica e intercepar o díodo, significa que o painel não está sujo.

Embora não esteja representado nas figuras [Figura 19] [Figura 20], ao passar pela superfície, a luz sofreria refrações e reflexões, o que faz com que o díodo recebesse sempre uma percentagem de luz ou o díodo pode receber luz e o painel estar sujo. Seria necessário verificar em laboratório a calibração do díodo de forma a perceber quantidade da percentagem de luz recebida que nos indique quando é que a superfície se encontra suja, ao ponto de ser essencial limpar.

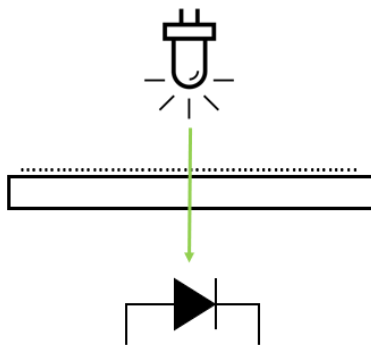


Figura 19- Projeto do modelo 2 com o led.

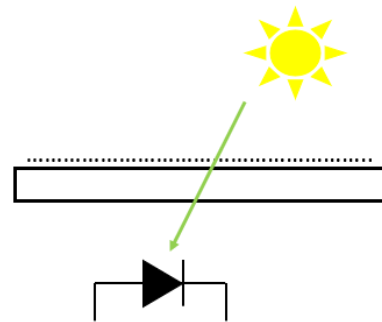


Figura 20- Projeto do modelo 2 com o sol.

Modelo 3

Este modelo [Figura 21] é bastante semelhante ao modelo 1 [Figura 18], mas com o LED e com o díodo fotovoltaico no exterior da superfície fotovoltaica.

Caso a luz emitida pelo LED se refletir e assim intercepar o díodo significa que o painel se encontra sujo.

Embora não esteja representado na figura [Figura 21], ao passar pela superfície, a luz do LED irá sofrer refrações e reflexões, o que faz com que o díodo receberá sempre uma percentagem de luz vinda do LED. Será necessário estimar em laboratório a quantidade da percentagem de luz recebida pelo díodo que nos indique quando é que a superfície se encontra suja.

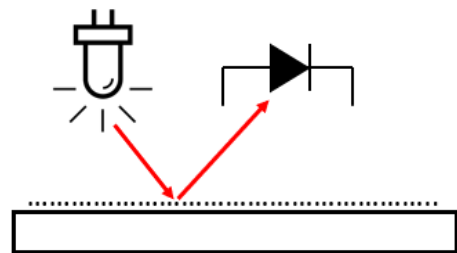


Figura 21 - Projeto do modelo 3.

Modelo 4

Neste modelo [Figura 22], temos representados dois díodos, um no exterior da superfície fotovoltaica e outro por detrás da superfície (dentro do sistema fotovoltaico). O objetivo deste

protótipo é comparar a radiação que chega a ambos dos díodos e verificar quando é que o díodo interno recebe uma radiação muito inferior ao díodo exterior.

Embora não esteja representado na figura [Figura 22], ao passar pela superfície, a radiação irá sofrer refrações e reflexões, o que fará com que o díodo interior capte sempre uma percentagem menor. Será necessário estimar a quantidade da percentagem de luz recebida pelo díodo interno que nos indique quando é que a superfície se encontra suja.

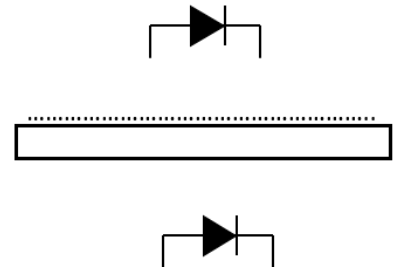


Figura 22 - Projeto do modelo 4.

3.6 Estudos Realizados Sobre O *Soiling*

3.6.1 Estudos Nacionais Realizados Para Avaliar O Impacto *Soiling*

Ricardo Conceição em “Saharan Dust Transport To Europe And Its Impact On Photovoltaic Performance: A Case Study Of Soiling In Portugal” [5] investigou como é que as perdas devido a *soiling* prejudicam a eficiência do módulo fotovoltaico, em concreto devido ao transporte de poeira do deserto do Saara para Portugal - Évora. Para tal, mediu a corrente de curto-circuito e a potência máxima de saída com um traçador de curva I-V conectado aos painéis fotovoltaicos. Descobriu que a potência máxima de saída e a corrente de curto-circuito diminuíram cerca de 8% e 3%, respetivamente, em fevereiro de 2017. No mesmo estudo, avaliou-se o impacto do transporte de poeira do Saara em dois locais da zona rural de Portugal, em Évora e Alter do Chão. Para isso foram instalados vidros de alta transmitância em cada local e analisou-se o *soiling* depositado, logo após os eventos de transporte de poeira do Saara para Portugal. Os resultados mostram que em fevereiro de 2017 foi quando existiu uma maior taxa de *soiling* nos vidros e que em Alter do Chão o *soiling* se apresenta de forma aglomerada, sendo composta, principalmente, por alumínio, silício e oxigênio, característicos em áreas desérticas, e a acumulação de massa encontrada foi de 402 mg/m². Já em Évora, as partículas de *soiling* tinham como principais componentes o silício e o cálcio, da areia do deserto, e a acumulação de massa encontrada foi de 1067 mg/ m².

3.6.2 Estudo Internacionais Realizados Para Avaliar O Impacto Soiling

Nuria Martín-Chivelet [48], em “*Soiling Loss In Pv Roofs Of Residential Urban Areas In Madrid Region*” estudou o efeito do *soiling* em painéis fotovoltaicos em cima de telhados, numa área residencial típica dos arredores de Madrid. Esta área residencial tinha em seu redor espaços verdes, com algumas árvores como os pinheiros, estradas alcatroadas e com menos edifícios do que no centro da cidade. A instalação teste estava localizada num prédio de 10 metros de altura. O estudo foi realizado em 3 pares de módulos fotovoltaicos, onde cada par tinha uma inclinação diferente: 8°, 22° e 35°.

A metodologia que foi usada foi com base na comparação das potências de saída de módulos fotovoltaicos idênticos, que estão sob as mesmas condições de operação, mas enquanto um é limpo semanalmente, o outro nunca o é.

Resultados diários: Como esperado, as perdas por *soiling* diárias aumentaram gradualmente ao longo do período com ausência de precipitação. Sendo mais acentuadas as perdas nos módulos com inclinação menor.

Resultados em longos períodos: Pode-se observar pelos resultados apresentados que nos módulos com inclinação mais baixa houve uma maior taxa de perdas por *soiling* e que nos módulos com inclinação mais alta obteve-se uma taxa menor.

David Dassler em “*Advanced Method For Determining Soiling Losses On Pv Modules In Desert Climate*” [49] estudou o efeito do *soiling* na cidade de Xiraz, no Irão. Usou um par de módulos fotovoltaicos iguais, instalados com ângulo de inclinação de 30°. O estudo consistiu na comparação da corrente de curto-circuito dos dois módulos, sendo que um dos módulos era mantido limpo por limpeza diária, e o outro era deixado sujo. Tomou também atenção ao vento, à humidade ambiente, temperatura ambiente, temperatura do módulo e radiação solar são medidos continuamente durante todo o período experimental. Os resultados do campo de medição indicam que a perda média diária devido a *soiling* para oito semanas de exposição foi de cerca de 4,45%.

Paudyal e Shakya em “*Dust accumulation effects on efficiency of FPV modules for off grid purpose: a case study of Kathmandu*” [50] em analisaram módulos que estavam situados no Instituto de Engenharia da Universidade de Tribhuvan, no Nepal, durante 150 dias. Foram utilizados dois sendo um módulo limpo diariamente, enquanto o outro não. Como resultado, os módulos produziram a mesma quantidade de eletricidade inicialmente, porém, à medida que os dias passaram, foi observado uma considerável diferença da potência de saída entre o módulo limpo e sujo. Desse modo, houve uma forte redução da eficiência do módulo sujo durante o

período do experimental sem chuva, cerca de 29,76%, com exceção de uma leve melhora devido às gotas de orvalho. Verificaram também a transmitância através do peso e concluíram que a densidade do depósito de poeira no módulo representou uma variação entre 0,1047 g/m² e 9,6711 g/m².

Soares Júnior, Cruz e Amaral em “*Impacto da sujidade sobre o desempenho de sistemas fotovoltaicos*” [51] apresentam um estudo realizado em módulos fotovoltaicos na Universidade Federal de Montes Claros - Minas Gerais. A produção solar estudada é composta por 3 painéis, com 84 módulos do tipo p-Si e possui uma potência instalada de 12,6 kWp. A avaliação do impacto do *soiling* nos módulos é feita a partir da comparação da geração de eletricidade de dois dos painéis em que um serve como referência, estando sujo durante todo o tempo do experimento, e o outro, os módulos são limpos com diferentes intervalos de tempo. Com a metodologia utilizada, os autores concluem que não há necessidade de realização de limpeza em um intervalo inferior a 15 dias e que o acúmulo de *soiling* no estudo levou uma perda de produção média de 20%.

3.6.3 Análise Geral Dos Estudos Abordados

Dos cinco trabalhos analisados nesta dissertação, apenas um é um trabalho português, pois, após muita pesquisa, apenas foi encontrado trabalhos do mesmo autor - Ricardo Conceição, com conclusões iguais e/ou semelhantes às do trabalho aqui apresentado. Este facto demonstra o quanto o *soiling* em módulos fotovoltaicos é um assunto desvalorizado no nosso país. No entanto, os restantes trabalhos demonstram o quão é importante o impacto do *soiling* na diminuição da eficiência fotovoltaica, sendo que esta redução pode ultrapassar os 20%.

É possível também observar que na maioria dos trabalhos analisados, foi utilizada a metodologia de comparar módulos fotovoltaicos limpos e sujos. Ao realizar todo o estudo para esta dissertação, consegui concluir que esta é a metodologia mais utilizada para a avaliação do impacto do *soiling*.

Para se obter resultados fiáveis é necessário fazer observações ao longo de grandes períodos de tempo, pois só assim é que é possível verificar o efeito do *soiling* num dado local, sendo o tempo recomendável de, pelo menos, um ano.

3.7 Efeito Do *Soiling* Na Eficiência Dos Módulos

É de extrema importância compreender como a deposição de partículas de *soiling* afeta a eficiência dos painéis fotovoltaicos para se poder determinar se há, ou não, a necessidade da realização de uma limpeza.

Como já referido, a deposição de partículas pode originar uma diminuição nos módulos da sua corrente de curto-circuito, da sua potência máxima, da sua eficiência, e ainda do seu tempo de vida útil. A forma como estes fatores são afetados varia bastante consoante o clima do local de instalação. Diversos estudos foram realizados e foi possível verificar que, por exemplo, no sul da Itália, numa zona onde o solo era composto sobretudo por areia solta, originaram perdas energéticas de 6,9% após um ano sem qualquer limpeza, enquanto em solo constituído por areia compactada as perdas observadas foram apenas de 1,1%, o que nos permite observar o quão suscetíveis são as perdas ao tipo de solo [52].

Em Portland - Oregon, nos EUA, por sua vez, foram observados painéis fotovoltaicos monocristalinos de silício, sendo comparados os efeitos da limpeza natural pela chuva com a limpeza manual. Após 17 dias sem qualquer tipo de precipitação observou-se uma perda de 4% de eficiência, sendo que logo a seguir a ter ocorrido um único dia de precipitação a eficiência ficou apenas 1% inferior em comparação com um painel equivalente limpo manualmente. Verificou-se que a temperatura do painel não foi afetada, portanto as perdas foram devido aos efeitos óticos de dispersão [52].

Estudos realizados mostram também que sistemas fotovoltaicos concentrados são ainda mais sensíveis à deposição de poeiras, atingindo perdas de 20% após alguns meses sem limpeza, pois os sistemas concentrados apresentam características óticas específicas [53].

CAPÍTULO 4 - DIMINUIÇÃO DO EFEITO DO SOILING

4.1 Diminuição Do Efeito Do Soiling

Os painéis fotovoltaicos são constituídos por uma camada de vidro transparente na sua superfície que quando obstruída faz com que exista perdas energéticas no sistema. A presença de *soiling* nos módulos fotovoltaicos não só afeta a eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica como também pode diminuir a sua vida útil. Para que um sistema fotovoltaico não tenha perdas de potência significativas devido ao *soiling* poderá ser necessário fazer uma limpeza à superfície de vidro do módulo. O período entre cada limpeza e o melhor método para a efetuar depende essencialmente da taxa de *soiling* de cada lugar, das causas do *soiling*, de cada estação do ano, do tipo de tecnologia de módulos fotovoltaicos utilizada e do custo de limpeza.

O estudo da importância da limpeza dos sistemas fotovoltaicos em diferentes tipos de clima é algo que está a ser desenvolvido ao longo dos anos. A indústria de manutenção dos sistemas está em crescimento, e, obviamente, que aquando da manutenção de um sistema fotovoltaico há que ter em conta a sua limpeza. Sabe-se que em um ambiente em que chove muito e com boa qualidade de ar as limpezas realizam-se sem a intervenção antropogénica, pois a chuva é uma forma de limpeza natural e uma boa qualidade de ar levará a menor existência de grandes partículas que se podem depositar nos painéis; e que em locais com solos áridos é necessário realizar limpezas mais regulares, pois apresentam uma diminuição na eficiência do sistema solar considerável.

Existem vários métodos de limpeza para a superfície dos módulos fotovoltaicos, no entanto é importante notar que existe certos tipos de utensílios que podem ser prejudiciais ao módulo, como por exemplo certos detergentes químicos e esfregões podem danificar a superfície do módulo [25].

4.2 Métodos De Limpeza Dos Painéis Fotovoltaicos

Com o aumento do consumo de energia produzida através de tecnologias fotovoltaicas, umas das maiores prioridades do setor é garantir que estas funcionam com a maior eficiência possível, assim sendo, pelo que já visto nesta dissertação, a presença de *soiling*, dependendo da taxa, não só reduz a produção de energia como também o tempo de vida útil do módulo. Assim sendo, a limpeza do módulo tornou-se um aspeto bastante importante, sendo uma questão prioritária a ser abordada antes de iniciar qualquer projeto de fornecimento de energia solar [53].

O método de limpeza dos painéis solares deve ser logo discutido na conceção da exploração solar, uma vez que alguns métodos utilizam maquinaria pesada e de alto desempenho requerem espaçamento para operação e espaçamento entre painéis [53].

A limpeza pode ser realizada através de métodos naturais ou métodos artificiais, sendo que estes últimos podem ocorrer com água ou a seco, com uma grande variedade de métodos que podem divergir entre manuais ou de autolimpeza (automáticos) [25].

A decisão sobre quais os melhores métodos a utilizar no módulo em questão deve ter em conta o local da instalação, que está relacionado com o clima e o tipo de solo.

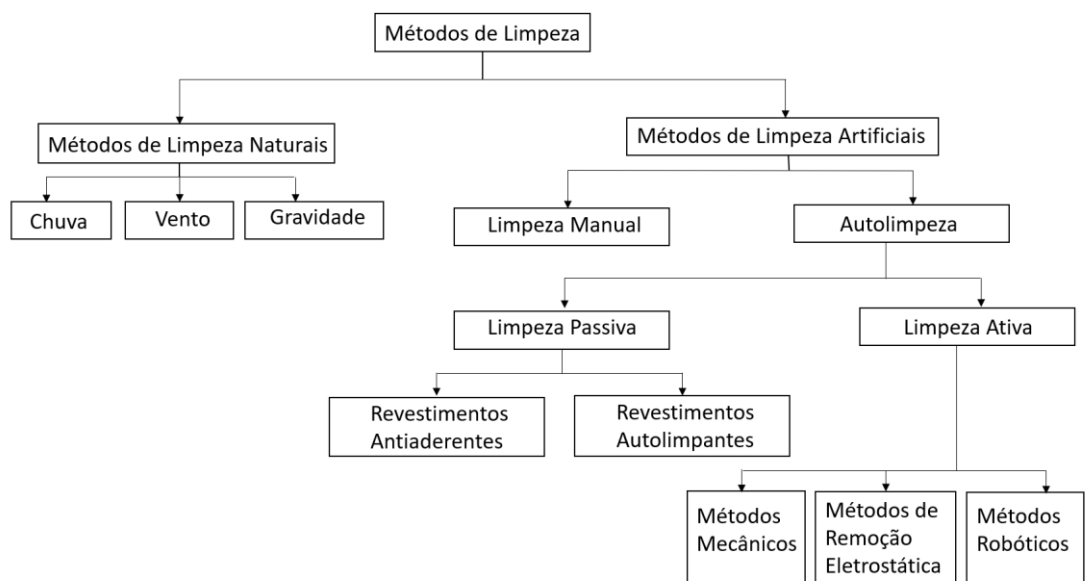


Figura 23 - Esquema organizado dos métodos de limpeza de painéis fotovoltaicos.

Já existem diversas empresas no mercado português que são especializadas em limpezas de painéis fotovoltaicos, como por exemplo a Tinalimpa [69], SolarClean - The Solar Panel Cleaning Company [70], Maxilimpe – Profissionais de Limpeza [71], entre outras. É, normalmente, no início do verão que esta empresa tem mais trabalho, para que os painéis fotovoltaicos fiquem limpos para a estação onde a produção é maior.

4.2.1 Métodos De Limpeza Naturais

Os métodos de limpeza naturais caracterizam-se sobretudo por serem realizados sem a intervenção do ser humano ou sem intervenção mecânica, através dos agentes ambientais e/ou da ação da gravidade sobre os painéis fotovoltaicos.

Na escolha deste método, devemos ter em conta o tipo de solo e o clima do local onde se encontra a nossa instalação fotovoltaica.

Em áreas com taxas baixas deposição de *soiling*, limpeza natural pela chuva e pelo vento são mais do que eficazes para a limpeza dos módulos. No entanto necessário ter em conta que nem toda a chuva é um bom agente de limpeza; chuvas de baixa intensidade promovem uma melhor aderência das partículas ao módulo, existindo a transformação de pó em lama, que por sua vez não pode ser removida assim tão facilmente [54].

A inclinação do módulo também desempenha um papel importante na limpeza natural pois a superfície horizontal não é facilmente de limpa pela chuva. O ângulo de inclinação mais alto faz com que o *soiling* caia devido à força gravitacional [55].

O vento pode reduzir a deposição de poeira removendo a maior parte das partículas de *soiling*, no entanto em partículas menores (menos de 50 μm) a ação do vento não é significativa para a limpeza do módulo devido à força adesiva [56].

4.2.2 Métodos De Limpeza Artificiais

Os métodos de limpeza artificiais são aqueles que não são realizados por agentes ambientais e podem subdividir-se por limpeza manual e por autolimpeza.

Método De Limpeza Manual

Para se realizar o método de limpeza manual nos painéis fotovoltaicos é necessário a ação de um operador humano, a utilizar um material que sirva para esfregar, como uma esponja ou um pano que não sejam ásperos de forma a evitar possíveis arranhões na superfície do módulo fotovoltaico que degradam o desempenho do módulo fotovoltaico, água (em jato ou corrente) e algum detergente de limpeza, tendo sempre em atenção se este é adequado e não abrasivo para que não afete a qualidade do material transparente do módulo [61]. Depois de limpo, o ideal é enxaguar a água com um pano seco [61] para evitar a acumulação de calcário. Por fim, para determinar se o módulo está bem limpo, o operador faz uma confirmação visual, o que demonstra que este é um método bastante subjetivo.

A limpeza deve ser feita no início ou no final do dia e nunca durante as horas de maior exposição solar, pois a água fria pode danificar o painel devido à diferença de temperatura [61].

Este método tem como vantagem de os módulos serem limpos com um gasto de energia muito baixo, de serem muito flexíveis e de poderem projetar a instalação com corredores muito pequenos, mas a desvantagem é o custo do pessoal/ do operador, ser um processo muito lento, e com muito gasto de água [53].

Este método normalmente é escolhido para limpar os módulos fotovoltaico instalados em pequena escala, como por exemplo em parques fotovoltaicos muito pequenos [57], especialmente nos parques de autoconsumo de privados e PMEs [53], pois para instalações de grande escala, esse método de limpeza torna-se desafiador, pois os painéis solares são constituídos por vários módulos fotovoltaicos, que podem estar instalados a grandes alturas (como por exemplo em cima de um telhado de um prédio), torna-se crucial ter em consideração o tempo necessário e a segurança do operador e do próprio painel. A limpeza manual também é necessária em explorações solares muito antigas, com corredores muito estreitos que não têm espaço suficiente para o acesso a maquinaria pesada, ou naquelas que são localizadas em países com custos de mão-de-obra muito baixos [53].



Figura 24- Operador a efetuar a limpeza manual [75].

Autolimpeza

Existem vários métodos de autolimpeza para reduzir o efeito da deposição de *soiling* sobre os módulos, que se podem dividir por limpeza ativa ou limpeza passiva.

No método de autolimpeza, o recurso a mão-obra humana pode ser substituída por um sistema de automação/mecânico para efetuar a limpeza [25].

Métodos De Limpeza Ativa

Os métodos de limpeza ativos podem ser considerados como aqueles métodos que consomem energia continuamente de forma a limpar o módulo fotovoltaico.

Métodos De Limpeza Mecânica

Existem diversos aparelhos que podem realizar os métodos de limpeza mecânica que estes podem estar equipados por um motor e por escovas. Estes aparelhos de limpeza podem ser controlados de forma elétrica e eletronicamente. Dependendo do tipo de aparelho, pode ser necessário um operador humano. A eficiência do processo não ultrapassa os 95% [25].

Segundo a Cepillos Sacema, que é uma empresa internacional, especializada em encontrar soluções em diversas áreas de limpeza, existem sistemas motorizados de limpeza de painéis solares com maquinaria ligeira e maquinaria pesada [53].

Contudo, as desvantagens causadas no módulo são equivalentes às referidas para a limpeza manual.

Sistemas Motorizados De Limpeza De Painéis Solares Com Máquinas Ligeira

Estes são sistemas de limpeza motorizados, embora sejam leves. São colocados sobre os painéis solares e limpos através de uma escovagem mecânica. É necessário, pelo menos, um operador para os acompanhar, para que seja fornecida a energia e água necessária. Este tipo de sistema é movido à mão de uma linha de painéis solares para outra, e devido a isto é prático utilizar em pequenas instalações fotovoltaicas ou em instalações de autoconsumo, mas é demasiado pequeno para grandes instalações.

O investimento necessário já começa a não ser negligenciável, e há vários equipamentos no mercado, que deixam um acabamento muito aceitável [53].



Figura 25- Sistemas Motorizados De Limpeza De Painéis Solares Com Máquinas Ligeira [81].

Sistemas De Limpeza De Parques Solares Com Maquinaria Pesada

Os sistemas de limpeza com maquinaria pesada para instalações solares são os mais comuns nos países mais desenvolvidos, onde a mão-de-obra é mais cara, e também onde são instaladas explorações solares com maiores dimensões, que precisam de ser mantidas limpas para proporcionar um maior desempenho [53].

Normalmente, estes tipos de sistemas de limpeza são constituídos por [53]:

- Uma máquina de tração – Que pode ser um trator ou um camião e confere ao sistema mobilidade e capacidade de carga;
- Uma base com o seu braço articulado hidráulico – Trata-se de braço hidráulico articulado, que tem uma base acoplada à maquinaria principal e serve para aproximar o equipamento de limpeza e posicioná-lo sobre os painéis solares;
- O limpador de painéis solares - Este é um sistema com uma geometria cilíndrica que se adapta à forma dos painéis solares e que proporciona uma rotação ou deslocamento angular em relação ao braço articulado;
- Um sistema de posicionamento digital – que posiciona a escova do limpador painel, mantém a posição e quando necessário retifica-a aquando de uma destabilização.
- Sistema de água – é um sistema de pulverização de água, que tem um tanque, uma bomba de água pressurizada e um sistema que pulveriza a água em frente das escovas, de modo que estas limpem corretamente os painéis solares e não gerem arranhões ou outros danos;
- Reboque e contrapesos - É necessário montar um reboque e fornecer-lhe contrapesos, a fim de evitar problemas de estabilidade e o risco de tombar.



Figura 26 - Sistema de limpeza de parques solares com maquinaria pesada [79].

Métodos De Remoção Eletrostática

O método de remoção eletrostática utiliza o Arduíno para que exista uma limpeza regular dos módulos de forma eficaz, não ocorrendo limpeza em alturas desnecessárias, mas limpando o *soiling* sempre que a eficiência do módulo esteja a ser afetada. Um ESP (precipitador eletrostático), é constituído por um conjunto de eléctodos fixos que são utilizados para colher as partículas, sendo um aparelho de filtração que permite retirar as poeiras finas depositas na superfície dos módulos através da indução de uma carga eletrostática. Um ESP é colocado em cada lado do painel, que tem um sensor de peso que consegue determinar a espessura da poeira através da alteração do peso do painel. Quando um valor específico de peso é ultrapassado, o microcontrolador de Arduíno avisa o ESP. O primeiro eléctrodo tem uma tensão negativa muito alta, sendo que as partículas ao se aproximarem adquirem também uma carga negativa, sendo que o segundo eléctrodo tem uma tensão positiva muito alta para atrair as partículas carregadas negativamente, que são removidas por um mecanismo de vibração ou por limpeza manual. Devido a ser tão eficiente, é maioritariamente utilizado em indústrias que produzem muita poeira. A grande vantagem do ESP como método automático de filtração é que é um método que não necessita de contacto com a superfície do módulo [66].

A eficiência do ESP depende de muitos fatores, como a taxa de deposição de *soiling*, o tipo de partículas acumuladas e a tensão aplicada. A capacidade de remoção da superfície eletrodinâmica transparente é sensível a mudanças na magnitude, forma de onda e frequência da tensão aplicada [25].

Métodos Robóticos

Esta é a forma mais avançada tecnologicamente para efetuar a limpeza dos parques fotovoltaicos, que continua em constante desenvolvimento, no qual robôs autónomos são colocados nas extremidades dos painéis solares e realizam um ciclo de limpeza automática, com o mínimo de intervenção humana.

A grande desvantagem deste equipamento é o elevado custo e a necessidade de instalar um equipamento para cada fila de limpeza, ou de optar por um dos pequenos robôs que podem ser deslocados de uma fila para outra, o que levanta dúvidas quanto à sua rentabilidade.

A tecnologia avança tão rapidamente que em pouco tempo veremos robôs que fazem sozinhos a limpeza completa do parque solar, sem intervenção humana, e por isso, irão trabalhar durante mais tempo e sempre que existir necessidade [53]



Figura 27- Robot de limpeza de módulos fotovoltaicos da Escovacs Robotics [80].

Métodos De Limpeza Passiva

Revestimentos Sobre A Superfície Dos Módulos

De forma a reduzir-se manutenções e, sobretudo, custos de manutenção na um painel, sem que a sua eficiência seja afetada, tem sido realizado estudos no âmbito do desenvolvimento de revestimentos, aplicados sobre as superfícies fotovoltaicas. Esses revestimentos podem-se caracterizar por: revestimentos antiaderentes e revestimentos autolimpantes [25].

Os revestimentos antiaderentes têm como objetivo repelir os líquidos que se depõem sobre a superfície dos painéis fotovoltaicos. Podem ser divididos por hidrofílicos, hidrofóbicos ou super-hidrofóbicos. Os revestimentos hidrofílicos conferem à superfície ângulos de contacto com o líquido entre os 0° e os 90° . No caso dos revestimentos hidrofóbicos fazem com que a superfície apresente ângulos de contacto superiores a 90° e inferiores a 150° . Acima dos 150° , as superfícies são consideradas super-hidrofóbicas [4].

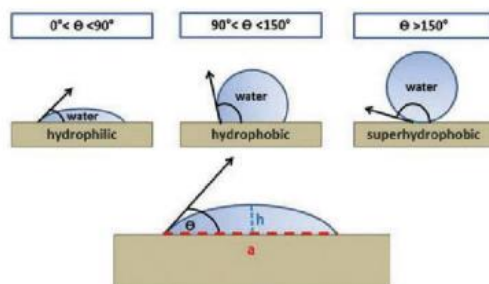


Figura 28 - Ângulos de contacto criados nas diferentes superfícies [62].

Os revestimentos autolimpantes, comparativamente aos revestimentos antiaderentes, tem como diferença o efeito foto-catalítico, que concede à superfície, aquando na presença de luz, a decomposição de componentes orgânicos [4].

Torna-se interessante para o leitor saber que revestimentos existem no mercado, assim foi feito um estudo sobre os produtos que já estão a ser comercializados.

Solar Wash Protect

O *Solar Wash Protect* é um produto utilizado na lavagem dos painéis fotovoltaicos. Este produto contém na sua composição um polímero que adere à superfície dos módulos conferindo-lhe propriedades hidrofóbicas.

A aplicação deste produto é realizada primeiramente através da diluição de 1/50 de produto em água, seguida da pulverização da mistura sobre a superfície do módulo fotovoltaico. Como o produto é diluído, o seu custo por aplicação em cada painel é muito reduzido [63].

IGP PRO – Chemitek

Este produto é um revestimento protetor transparente de longa duração – tem de ser repostado numa média de 5 em 5 anos - que se liga quimicamente à superfície dos painéis, criando assim uma barreira antiaderente, resistente à corrosão e manchas, o que faz com que a limpeza dos mesmos tenha de ser feita com menos regularidade. O vidro tratado com este produto torna-se hidrofóbico e oleofóbico, protegendo contra a maioria das formas de *soiling* [58].

Tecnologia De Grafeno

A tecnologia de grafeno em painéis fotovoltaicos permite que os módulos tenham melhor rendimento, pois este revestimento confere aos painéis características autolimpantes.

Este material é extremamente fino, embora seja altamente resistente. Possui alta condutividade térmica e elétrica, alta transmissividade da luz, e é impermeável [59].

Tecnadis Selfclean PV

Este é um produto nanotecnológico para as superfícies dos painéis fotovoltaicos que diz que tem a capacidade de aumentar a eficiência energética dos mesmos em mais de 8%, pois tem as características de ser um revestimento hidrofóbico, anti-pó, anti-reflexo [60].

4.5 Efeito Da Deposição Do *Soiling* No Aspeto Econômico

Como já referido neste trabalho, o *soiling* consiste no acúmulo e deposição de partículas sobre as superfícies fotovoltaicas, o que leva a uma perda direta na geração de energia. De forma a minimizar o impacto do *soiling*, pode-se mitigar através de ações preventivas, que visam evitar a deposição de partículas nos módulos ou facilitar a sua remoção natural, e/ou através de limpezas artificiais [75]. Atualmente, as limpezas artificiais são a estratégia de mitigação de *soiling* mais comum, e devem ser realizadas em horários que maximizem o desempenho elétrico e, ao mesmo tempo, minimizem o consumo de eletricidade e os custos. Em um cenário ótimo, as limpezas artificiais devem ser realizadas para minimizar o custo sobre a presença de *soiling*, que deve ser entendido como a soma das perdas de receita e dos custos de mitigação. Com efeito, a limpeza de um módulo fotovoltaico na presença de *soiling*, bem como a não limpeza de um módulo fotovoltaico sujo, causam perdas de receitas evitáveis [73]. Além disso, deve-se considerar que as chuvas também podem ter um efeito de lavagem natural e remover o *soiling* dos módulos fotovoltaicos sem qualquer custo [74]. As limpezas artificiais realizadas imediatamente antes de uma chuva podem ter, portanto, uma baixa conveniência, pois aumentariam os custos de operação e manutenção (O & M), podendo não ter nenhum benefício energético. Em algumas estações do ano e em alguns locais, as chuvas podem manter os módulos fotovoltaicos adequadamente limpos, sem a necessidade de qualquer intervenção artificial [76]. Por essas razões, é vantajoso criar um cronograma de limpeza para cada projeto fotovoltaico.

Uma metodologia simples para tomada de decisão sobre limpeza artificial deve ou não ser realizada baseia-se na realização da limpeza uma vez que a perda de receita devido ao *soiling* é superior aos custos de limpeza [77].

Um estudo realizado por Massi Pavan denominado de “*The Effect Of Soiling On Energy Production For Large-Scale Photovoltaic Plants*” [67] demonstra um estudo sobre o impacto da deposição de *soiling* para dois sistemas fotovoltaicos de 1 MWp e revelou que as perdas no rendimento energético são de 1,1 a 6,9%. Essas perdas influenciam a produção e tem como consequência impactos económicos resultados da deposição.

Os resultados indicaram que no sistema fotovoltaico com perdas de 6,9% devido à presença de *soiling*, a perda económica equivale a 41.400 € por ano, enquanto no sistema fotovoltaico que apresentou uma redução de 1,1% na produção revela uma perda económica na ordem de 6 600 € por ano.

Atendendo aos valores, podemos verificar taxas baixas de perdas devido ao *soiling* implicam grandes perdas financeiras por ano.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

5.1 Perspetivas De Futuro No Estudo Do *Soiling*

Portugal é um dos países com maior potencial no que diz respeito à produção de energia fotovoltaica. Como tal, é de se esperar que a produção de energia através de tecnologias fotovoltaicas sejam cada vez mais comum no futuro, o que torna o estudo do *soiling* um fator interessante e muito importante a ser levado em conta no país, algo que até agora não acontece.

Na minha opinião é imprescindível a criação e o desenvolvimento de novos modelos e técnicas a serem introduzidos nos módulos fotovoltaicos para que estes nos transmitam quando é que a sua produção elétrica está a ser prejudicada pelo acumular de *soiling* na sua superfície, indicando ao utilizador quando se deve proceder à limpeza, afim que não sejam realizadas em vão, de forma a poupar energia e, quando da limpeza manual, preservar a segurança do utilizador.

Considerar o impacto do *soiling* em novos projetos fotovoltaicos e incluir nos planos de manutenção, formas de reduzir o *soiling*.

5.2 Conclusão

Com esta dissertação definimos por *soiling* a deposição e a acumulação de partículas sobre as tecnologias fotovoltaicas, e verificou-se que as principais consequências deste fenómeno são a influencia negativa na eficiência dos sistemas fotovoltaicos e a redução da sua vida útil.

Verificou-se também que esta deposição pode derivar de vários factores, podendo eles serem de cariz ambiental, como por exemplos as chuvas ou o vento, de cariz da instalação, como a inclinação dos painéis, ou de cariz das propriedades do solo.

Foi também constatado que quando a pandemia COVID-19 se instalou pelo mundo as taxas de emissões poluentes diminuíram (logo menos poeiras e partículas no ar), foi quando se atingiu recordes na produção fotovoltaica. O que nos permite concluir que o *soiling* proveniente das emissões antrópicas prejudica imenso a geração fotovoltaica.

É importante notar que o *soiling* sobre as superfícies fotovoltaicas, leva a uma seletividade espectral e, comprovado pela dispersão de Mie, as partículas que apresentem um diâmetro da mesma ordem de grandeza, ou maior, que o comprimento de onda da luz incidente, é que impende que a radiação atinga completamente o módulo.

Foi estudado 4 métodos de deteção de *soiling*, sendo que uns servem apenas para estudar o *soiling* e outros para saber quando há necessidade de limpar os painéis fotovoltaicos. Ao analisar não só os cinco trabalhos sobre *soiling* referidos, como quase todas as referências desta dissertação, é possível concluir que a metodologia por comparação de módulos é a mais utilizada.

Sendo o *soiling* prejudicial aos sistemas fotovoltaicos, com esta dissertação analisei como podemos diminuir o seu efeito. Existem diversos métodos de limpeza indicados para diferentes sistemas fotovoltaicos, diferentes climas e para diferentes tipos de solos, sendo que nunca devem ser usados utensílios que podem ser prejudiciais ao sistema. Embora em Portugal este tema não tem sido muito considerado, já existe empresas no país que efetuam esse serviço de limpeza.

Não foi possível obter um custo de limpeza dos painéis fotovoltaicos, pois este varia para casos de estudo diferentes, no entanto é possível afirmar que a limpeza deve ser efetuada quando as perdas de receita devido ao *soiling* são superiores aos custos de limpeza de cada caso. É de notar que taxas baixas de *soiling* implicam grandes perdas financeiras ao fim de um ano.

Referencias

- [1] <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/energia-solar/solar-fotovoltaico/> Acesso a 30/05/2022
- [2] <https://www.portalsolar.com.br/historia-e-origem-da-energia-solar> Acesso a 30/05/2022
- [3] <https://www.cnnbrasil.com.br/business/energia-solar-se-torna-a-segunda-principal-fonte-do-mundo/> Acesso a 30/05/2022
- [4] Araújo, Teresa. 2019. “Avaliação do Efeito de Revestimentos Antiaderentes Na Eficiência de Coletores Solares Fotovoltaicas”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.
- [5] Conceição, R., Silva, H., Lopes, F., Mirão, J., Gostein, M., Fialho, L., Narvarte, L., Collares-Pereira, M. 2018. Saharan dust transport to Europe and its impact on photovoltaic performance: A case study of soiling in Portugal.
- [6] Morais, J., 2009. Sistemas Fotovoltaicos – Da Teoria à Prática, Publindustria.
- [7] Castro, R., 2008, Energias Renováveis e Produção Descentralizada – Introdução à Energia Fotovoltaica, Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa.
- [8] <https://slideplayer.com.br/slide/13252/> Acesso a 06/07/2022
- [9] Carneiro, J.; Passos, M., 2020, Sistemas Fotovoltaicos – Fundamentos sobre Dimensionamento, Engebook.
- [10] <https://pt.solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/painel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/tipos> Acesso a 07/07/2022.
- [11] Silva, H., 2009, Energia Solar Fotovoltaica: Contributo para um Roadmapping do seu Desenvolvimento Tecnológico, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- [12] Hecktheuer, L. A. 2001. Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos, Tese para obtenção de título de doutor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [13] Coutinho, C. R., Nardoto, A., Proveti, J., Coura, D., 2016, Efeito Do Sombreamento Em Módulos Fotovoltaicos, VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte.
- [14] Villalva, M. G., Gazoli, J. R., 2012. Energia Solar Fotovoltaica, 1st ed, Editora Érica.
- [15] CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 2008, Energia solar princípios e aplicações.

- [16] DGS. 2008, Planning And Installing Photovoltaic Systems - A guide for installers, architects and engineers.
- [17] <https://pt.solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/painel-fotovoltaico/partes> Acesso a 07/07/2022
- [18] <https://www.portalsolar.com.br/passos-a-passos-da-fabricacao-do-painel-solar.html> Acesso a 07/07/2022
- [19] Pinho, J., Galdino, M., 2014, Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos, Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES, CEPEL – DTE – CRESESB.
- [20] Márquez, J., Gómez, J., Aranda, E., Bohórquez, M., 2004, Sistema Para La Generación Automática de Curvas I-V, P-V, Monitorización De Módulos Fotovoltaicos. Universidad de Huelva, XXV Jornadas de Automática.
- [21] Martí, A., 2004, Fundamentos de la conversión fotovoltaica: la célula solar. Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica. CIEMAT.
- [22] Alonso, M., 2004, El generador fotovoltaico. Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica. CIEMAT.
- [23] [http://www.electrical-installation.org/enwiki/Photovoltaic background technology](http://www.electrical-installation.org/enwiki/Photovoltaic_background_technology) Acesso a 9/07/2022
- [24] Pinto, F., 2019, Study and Characterization of the Impacts of Soiling on the Performance of Photovoltaic Systems, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- [25] Gupta, V., Sharma, M., Pachauri, R. P., Babu, K. N. Dinesh, 2019, Comprehensive review on effect of dust on solar photovoltaic system and mitigation techniques.
- [26] Kimber, A., Mitchell, L., Nogradi, S., Wenger, H., 2006. Effect of soiling on large gridconnected photovoltaic systems in California and the Southwest region of the United States. In: Proceedings of the Photovoltaic Energy Conversion: Record of the 2006 IEEE 4th WORLD Conference.
- [27] Song, Z., Liu, J., Yang, H., 2021, Air Pollution And Soiling Implications For Solar Photovoltaic Power Generation: A Comprehensive Review
- [28] Gostein, M., Caron, J.R., Littmann, B., 2014. Measuring soiling losses at utility- scale PV power plants. Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2014 IEEE 40th. IEEE.
- [29] S.Mekhilefa, R.Saidurb, M.Kamalisarvestani, 2012, Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells.
- [30] Said, S.A.M., Walwil, H.M., 2014. Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance. Sol. Energy.
- [31] Hammond, R., Srinivasan, D., Harris, A., Whitfield, K., Wohlgemuth, J., 1997. Effects of soiling on PV module and radiometer performance. In: 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC).

- [32] Beattie NS, Moir RS, Chacko C, Buffoni G, Roberts SH, Pearsall NM., 2012 Understanding the effects of sand and dust accumulation on photovoltaic modules.
- [33] Kohli R, Mittal KL. Developments in surface contamination and cleaning. 2011, Volume three, methods for removing particle contaminants.
- [34] Appels R, Muthirayan B, Beerten A, Paesen R, Driesen J, Poortmans J., 2012. The effect of dust deposition on photovoltaic modules. In: Proceedings of the 38 th IEEE photovoltaic specialists conference (PVSC).
- [35] F. Mohd, S. Mekhilef, M. Seyedmahmoudian, and B. Horan, 2016, “Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel efficiency : Why and how?”
- [36] Cano, J., 2011. Photovoltaic Modules: Effect of Tilt Angle on Soiling. Master’s thesis, Arizona State University.
- [37] Shaju, A. Chacko, R. 2018, Soiling Of Photovoltaic Modules – Review.
- [38] Nahar, N., Gupta, J.P., 1990. Effect Of Dust On Transmittance Of Glazing Materials For Solar Collectors Under Arid Zone Conditions Of India.
- [39] Garg, H., 1974. Effect of dirt on transparent covers in flat-plate solar energy collectors.
- [40] Peters IM, Brabec C, Buonassisi T, Hauch J, Nobre AM. The Impact Of COVID-19-Related Measures On The Solar Resource In Areas With High Levels Of Air Pollution.
- [41] Parnell J., 2020, Clean Air, Clear Skies and Fresh Megawatts Cause Europe’s Solar Records to Tumble.
- [42] Cox, A. J.; DeWeerd, A. J.; Linden, J. An experiment to measure Mie and Rayleigh total scattering cross sections.
- [43] Hickel, B., 2017, O Impacto No Desempenho De Sistemas Fotovoltaicos Causado Pelo Acúmulo de Sujeria Sobre Os Módulos FV – Metodologia e Avaliação Atráves De Curvas IxV Em Campo. Dissertação de Pós- Graduação da Universidade Federal De Santa Catarina.
- [44] <https://cosmeticinnovation.com.br/as-mudancas-do-seculo-xxi-e-protecao-solar/>
Acesso a 20/07/2022
- [45] Coello, M. and Boyle, L. Simple model for predicting time series soiling of photovoltaic panels. World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Hawaii, 2018. Also, IEEE JPV (2019) in-press.
- [46] Hegazy, A. A. Effect of Dust Accumulation on Solar Transmittance through Glass Covers of Plate-Type Collectors.
- [47] Duarte, T., P., Costa, A., S., Kazmerski, L., ESTIMATIVA DA TAXA DE SUJIDADE EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO DADOS DE DENSIDADE GRAVIMÉTRICA.
- [48] Martin-Chivelet, N., Polo, J., Sanz, C., Alonso-Abella, M., 2019, Soiling Loss In PV Roofs Of Residential Urban Areas In Madrid Region.

- [49] Dassler, D., Malik, S., Pandiyan, A., 2017, Advanced Method For Determining Soiling Losses On Pv Modules In Desert Climate.
- [50] PAUDYAL, B. R.; SHAKYA, S. R. Dust accumulation effects on efficiency of FPV modules for off grid purpose: a case study of Kathmandu.
- [51] Soares Júnior, J. G.; Cruz, S. R.; Amaral, L. S. Impacto Da Sujidade Sobre O Desempenho De Sistemas Fotovoltaicos. In: Congresso Brasileiro De Energia Solar.
- [52] SMITH, M.K. & WAMSER, Carl. 2013. Effects of Natural and Manual Cleaning on Photovoltaic Output.
- [53] <https://sacemagroup.com/pt/parques-fotovoltaicos-limpeza-de-paineis-solares/> Acesso a 27/07/2022
- [54] Bethea, R.M., Barriger, M.T., Williams, P.F., Chin, S., 1981. Environmental Effects On Solar Concentrator Mirrors.
- [55] Qasem, H., Betts, T.R., Müllejans, H., Albusairi, H., Gottschalg, R., 2014. Dust-Induced Shading On Photovoltaic Modules.
- [56] Cuddihy, EF, 1980. Considerações Teóricas De Retenção Do Solo.
- [57] Mohamed, A.O., Hasan, A., 2012. Effect Of Dust Accumulation On Performance Of Photovoltaic Solar Modules In Sahara Environment.
- [58] <https://www.chemitek.pt/products/industrial-glass-protect> Acesso a 01/08/2022
- [59] <https://canalsolar.com/tecnologia-de-grafeno-em-paineis-saiba-o-que-e-e-quais-suas-vantagens/> Acesso a 01/08/2022
- [60] <https://www.portal-energia.com/revestimento-aumentar-eficiencia-paineis-solares/> Acesso a 01/08/2022
- [61] <https://www.edp.pt/particulares/content-hub/como-fazer-a-manutencao-de-paineis-solares/> Acesso a 01/08/2022
- [62] Mattone, M., Rescic, S., Fratini, F. & Manganelli Del Fà, R., 2017, Experimentation of Earth-Gypsum Plasters for the Conservation of Earthen Constructions.
- [63] https://www.bricobutikk.pt/products/solar-wash-protect-50-chemitek?variant=42642328289509&gclid=Cj0KCQjwguGYBhDRARIsAHgRm4-XBPDy3ZU6QctJD6PumXH5iSg2qbxPi8XWRzPlSj0MhSgqLq3JYcwaAjsxFEALw_wcB Acesso a 01/08/2022
- [64] Gostein, M., Duster, T., Thuman, C., 2015. Accurately Measuring PV Soiling Losses With

Soiling Station Employing Module Power Measurements.

[65] Costa, S., Diniz, A., Camatta, V., Kazmerski, L., 2020, Determinação Das Taxas De Sujidade Para Módulos Fotovoltaicos De Filme Fino E Silício Cristalino Instalados Em Diferentes Zonas Climáticas Brasileiras.

[66] Hudedmani, M., Joshi, G., Umayal, R., Revankar, A., 2017, A Comparative Study of Dust Cleaning Methods for the Solar PV Panels.

[67] Massi Pavan, A., Mellit, A., De Pieri, D., 2011. The Effect Of Soiling On Energy Production For Large-Scale Photovoltaic Plants.

[68] Vallêra, A., Brito, M., 2006, Meio Século de História Fotovoltaica.

[69] <https://www.tinalimpa.com/> Acesso a 25/09/2022

[70] <https://www.solarclean.pt/en/> Acesso a 25/09/2022

[71] <http://www.maxilimpe.pt/> Acesso a 25/09/2022

[72] Bagdahn, J., Schneider, J., Hanifi, H., 2015 REDUCED SHADING EFFECT ON HALF-CELL MODULES – MEASUREMENT AND SIMULATION.

[73] Shrestha S., Taylor M., 2016, Avaliação de sujidade em arranjos fotovoltaicos de grande escala.

[74] Mejia FA, Kleissl J., 2013, Soiling losses for solar photovoltaic systems in California.

[75] <https://energiawise.com.br/manutencao-preventiva-dos-paineis-solares-como-funciona-o-servico-da-wise/> Acesso a 25/09/2022

[76] Kalogirou SA, Agathokleous R, Panayiotou G., 2013, PV characterization and the effect of soiling on their performance.

[77] Cristaldi L, Faifer M, Rossi M, Catelani M, Ciani L, Dovere E, 2012, Economical Evaluation of PV System Losses Due To The Dust and Pollution.

[78] Carneiro, J., 2010, Módulos Fotovoltaicos – Características e Associações, Eletromagnetismo B.

[79] <https://www.bitimec.com/> Acesso a 25/09/2022

[80] <https://www.solarpowerworldonline.com/2015/02/fighting-dirty-manual-washing-vs-automatic-cleaning-of-solar-modules/> Acesso a 25/09/2022

[81] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117313> Acesso a 25/09/2022

