

Elaboração de um controle eletrônico para seguidor solar horizontal com limpeza automática.

Nelson Anthony Los - 39698

Trabalho realizado sob a orientação de
Prof. Paulo Jorge Pinto Leitão
Prof. Claudinor Bitencourt Nascimento

Mestrado em Engenharia Industrial
2019-2020

Elaboração de um controle eletrônico para seguidor solar horizontal com limpeza automática.

Relatório da UC de Projeto
Mestrado em Engenharia Industrial
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Nelson Anthony Los - 39698

2019-2020

A Escola Superior de Tecnologia e de Gestão não se responsabiliza pelas opiniões expressas neste relatório.

Declaro que o trabalho descrito neste relatório é da minha autoria e é da minha vontade que o mesmo seja submetido a avaliação.

Nelson Anthony Los - 39698

Dedicatória

Dedico este trabalho, bem como todas outras conquistas que já tive e as que terei, a meus amados pais, Karel e Wilhelmina Los, que me dão amor e apoio incondicional, amo muito vocês.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me ajudar na manutenção da fé. À minha família pelo apoio tanto financeiro como emocional e psicológico, desde sempre. Aos amigos que transformaram esses anos de estudo em momentos agradáveis que jamais serão esquecidos.

Resumo

Observando o constante crescimento das fontes energéticas limpas, viu-se a oportunidade de desenvolvimento na matriz fotovoltaica. O objetivo do trabalho foi elaborar um controlador digital, para o seguidor solar horizontal, que apresentasse: controle de movimentação, sistema de segurança contra ventos fortes e limpeza automatizada. A dissertação teve sua origem em uma proposta apresentada por uma empresa da região de Bragança e aborda a criação do produto.

Foram analisados diversos estudos e sistemas atuais, buscando caracterizar o produto a ser desenvolvido, no decorrer da dissertação é explicado cada característica e o porquê da mesma ser escolhida. Foi elaborado, baseado na modelagem matemático, um método de monitoramento do índice de sujeira sobre os painéis fotovoltaicos. O controlador ainda apresenta limpeza automatizada feita por aspersão de água em um ciclo fechado; rastreamento solar por sensor virtual e movimento utilizando pistão eletrônico.

Entretanto não foi possível aplicar o sistema em uma escala real devido às particularidades da própria empresa. Foi possível verificar o funcionamento do sistema a partir de testes por softwares e de simuladores, obtendo como resultado um aumento na geração fotovoltaica de 22.04% em relação ao sistema fixo, ao realizar o teste no sistema de monitoramento de sujeidade foi obtido um resultado de erro relativo igual a 2,04%. Com os resultados obtidos foi possível estimar uma alta confiabilidade do sistema, assim como robustez e aplicabilidade, demonstrando que o produto elaborado está apto ao mercado atual de seguidores solares além de ter vantagem sobre os demais modelos por possuir monitoramento da sujeidade automático.

Palavras-chave: energia renovável; geração fotovoltaica; seguidor solar horizontal; sensor virtual; monitoramento da sujeidade.

Abstract

Observing the constant growth of clean energy sources, the opportunity for development in the photovoltaic matrix was seen. The objective of the work was to elaborate a digital controller, for the horizontal solar tracker, that presented: movement control, security system against strong winds and automated cleaning. The dissertation had its origin in a proposal presented by a company from the region of Bragança and addresses the creation of a product.

Foi analisado diversos estudos e sistemas atuais, seeking to characterize the product to be developed, in the course of the dissertation, each characteristic is explained and why it was chosen. Based on mathematical modeling, a method for monitoring the dirt index on photovoltaic panels was developed. The controller also features automated cleaning done by spraying water in a closed cycle; solar tracking by virtual sensor and movement using electronic piston.

However, it was not possible to apply the system on a real scale for reasons of the company itself. It was possible to verify the functioning of the system from tests by software and simulators, obtaining as a result an increase in photovoltaic generation of 22.04% in relation to the fixed system, when performing tests on the dirt monitoring system, results were obtained from relative error equal to 2.04%. With the results it was possible to estimate great reliability of the system, robustness and applicability, demonstrating that the elaborated product is apt for the current market of solar trackers besides having advantage over the other models for having automatic dirt monitoring.

Keywords: renewable energy; photovoltaic generation; horizontal solar tracker; virtual sensor; soiling monitoring.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Estrutura do Documento	4
2	Estado da Arte	5
2.1	Sistemas fotovoltaicos	5
2.1.1	Origem	5
2.1.2	Tipos de Fotocélulas	6
2.2	Sistema fotovoltaicos	8
2.3	Movimento Terrestre	10
2.4	Seguidores solar	12
2.4.1	Sistemas de controle	12
2.4.2	Sistema de rastreamento solar	14
2.4.3	Número de eixos de atuação	16
2.4.4	Forma de rastreamento solar	16
2.5	Efeito do vento sobre a estrutura	21
2.6	Efeito da sujidade	23
2.7	Limpeza automatizada de sistemas FV	24
2.8	Conclusão	25

3	Desenvolvimento do Sistema	27
3.1	Caracterização do sistema	27
3.2	Sistema de movimentação e orientação	29
3.2.1	Movimentação	29
3.2.2	Orientação	30
3.3	Sistema de segurança	31
3.4	Sistema de monitoramento da sujidade/eficiência	31
3.4.1	Calibração do modelo	32
3.4.2	Aquisição de dados de monitoramento da sujidade	33
3.5	Sistema de limpeza	35
3.6	Desenvolvimento e embarque do código	37
3.7	Estudo de caso/Implementação	41
4	Análise de Resultados	45
4.1	Teste de geração fotovoltaica	45
4.2	Validação do método de monitoramento de índice de sujidade.	46
4.3	Teste de acionamento do sistema de limpeza	48
4.4	Teste sistema de segurança	49
4.5	Frequência ótima de limpeza	50
5	Conclusões e trabalho futuros	53
5.1	Conclusões	53
5.2	Trabalhos futuros	54
A	Testes do Software	A1

Lista de Tabelas

2.1	Valores de cp_1 e cp_2 para diferentes ângulos do seguidor. [36]	22
3.1	Lista de variáveis de calibração do sistema. [51]	33

Lista de Figuras

1.1	Fonte energéticas primarias consumidas no mundo de 1965 a 2018. [1]	2
2.1	Célula básica de silício cristalino. [6]	6
2.2	Comparação entre silício mono-cristalino e multi-cristalino. [12]	8
2.3	Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica. [9]	8
2.4	Células ligadas em serie, modelo comum de 36 células. [9]	9
2.5	Célula fotovoltaica, módulo e painel. [9]	9
2.6	Módulo ligado em serie. [9]	10
2.7	Módulo ligado em paralelo. [9]	10
2.8	Angulação da trajetória solar nos hemisférios. [13]	11
2.9	Design de seguidor passivo.[16]	13
2.10	Atuador linear, pistão eletrônico. [26]	14
2.11	Diferentes abordagens com fotosensores. [27]	15
2.12	Eixos X e Y em um seguidor.	17
2.13	Seguidor de 1 eixo Polar.	18
2.14	Seguidor de 1 eixo Horizontal.	18
2.15	Seguidor de 1 eixo Azimutal.	19
2.16	Seguidor de 2 eixo Polar Equatorial.	19
2.17	Seguidor de 2 eixo Azimutal - Elevação.	20
2.18	Produção de diferentes seguidores em algumas cidades. [33]	21
2.19	Comparação entre Payback dos modelos de seguidores solar. [34]	21
2.20	Diagrama do impacto do vento sobre o painel.[36]	22

2.21	Os módulos retorcidos. Danos sofridos no local do Oakey 2. [38]	23
2.22	Impacto da sujidade na geração [39].	24
3.1	Diagrama de blocos do sistema do seguidor fotovoltaico.	28
3.2	Pistão eletrônico em seguidor horizontal. Adaptado de [52]	29
3.3	Tabela de dados solares utilizada no sensor virtual.	30
3.4	Sistema de monitoramento da sujidade.	32
3.5	Diagrama acionamento da bomba de limpeza.	36
3.6	Diagrama sistema de limpeza 1.	36
3.7	Diagrama sistema de limpeza 2.	37
3.8	Programação da leitura da planilha.	38
3.9	Programação do movimento de segurança.	39
3.10	Programação da modelagem e calculo da eficiência.	40
3.11	Programação do acionamento de limpeza.	41
3.12	Programação do acionamento de limpeza.	42
4.1	Geração dos sistemas FV com estrutura: fixa inclinado, polar e horizontal.	46
4.2	Valores simulados no software desenvolvido.	47
4.3	Comparação entre valores simulados no software desenvolvido(S) e no PVSyst(G).	48
4.4	Erro relativo obtido entre a comparação.	49
4.5	Ponto ótimo de frequência de limpeza do sistema neste estudo.	51
A.1	Resultado do teste de limpeza. Autoria própria.	A1
A.2	Resultado do teste de acionamento limpeza. Autoria própria.	A2

Capítulo 1

Introdução

Na atual situação mundial, crescimento contínuo da industrialização, ocasionando um crescimento do consumo energético, o aumento na geração de energia se torna uma das prioridades e uma preocupação do mundo todo; contudo as fontes energéticas mais utilizadas atualmente são limitadas uma vez que são não-renováveis, em 2018 foi verificado que como fonte primaria energética foi consumido 38.489 terawatt-hora(TWh) de Gás natural, 43.869(TWh) de Carvão e 54.220(TWh) de Petróleo que somados representam 93% de toda a energia consumida [1], como indicado na Figura 1.1.

Além do limite quantitativo destas fontes de energia existentes no mundo, as duas mais utilizadas (carvão e petróleo) emitem muitos poluentes na sua utilização, contaminando a atmosfera com CO_2 proveniente de sua combustão. Em Maio de 2019, O observatório Havaí Mauna Loa Atmospheric Baseline verificou o crescimento da quantidade de dióxido de carbono na atmosfera pelo sétimo ano consecutivo [2], batendo mais um recorde maléfico ao planeta.

Observando este cenário e objetivando um âmbito com menor malefício ao meio ambiente e maior sustentabilidade energética, é necessário investimentos em pesquisas em fontes renováveis, dentre essas fontes, a energia proveniente do sol ganha destaque pela grande capacidade de geração, uma vez que nosso astro tem imenso potencial energético, restando para nós, o papel de melhor aproveitar esta energia. Das formas energéticas solares temos: as oriundas da temperatura e da radiação (luz) solar, neste estudo iremos

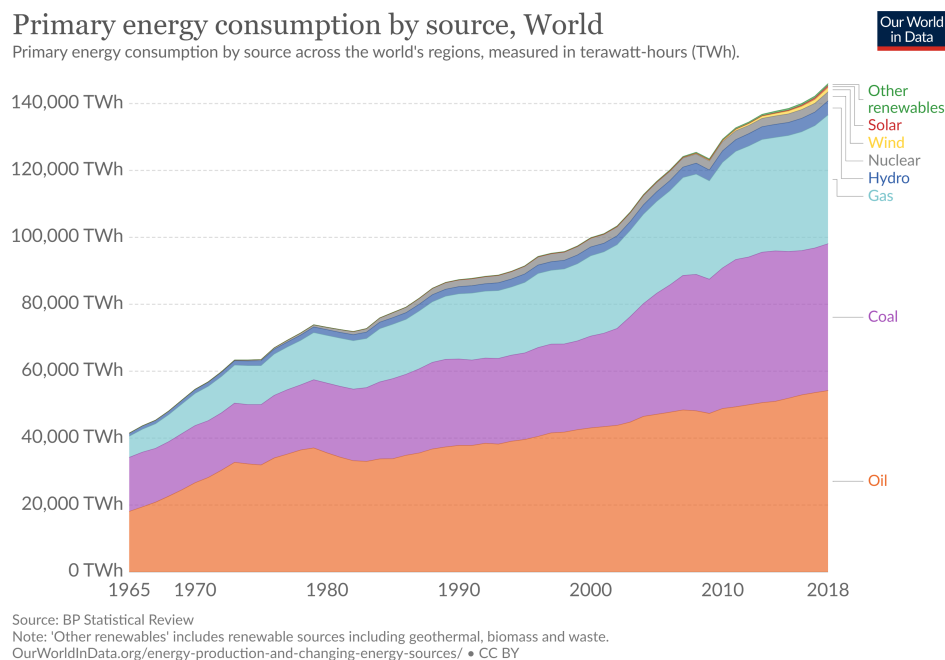


Figura 1.1: Fonte energética primárias consumidas no mundo de 1965 a 2018. [1]

abordar as fotovoltaicas (FV).

A energia FV, resulta da transformação de energia luminosa em energia elétrica [3], proveniente da movimentação de elétrons na junção P-N do semicondutor que compõe as células FV, a quantidade energética gerada é diretamente relacionada com a resultante da irradiação solar incidente sob o painel, ou seja a intensidade da luz sobre as células FV.

Para aumentar a geração dos painéis fotovoltaicos são utilizados seguidores solares, tecnologia que se mostra vantajosa pois aumenta muito a geração do sistema e é relativamente barata, de forma geral representa um acréscimo em 20% no valor final do projeto, porém é preciso levar em conta que um sistema deste tipo, com seguidor, pode vir a aumentar a geração em cerca de 40% [4].

Com os incentivos políticos portugueses e a contínua diminuição no preço dos painéis fotovoltaicos, esta alternativa vem sendo mais atrativa aos pequenos produtores que procuram o autoconsumo ou até mesmo aos que desejam gerar de forma comercial e atuarem como fornecedores energéticos [5].

Observando todo este cenário, este estudo buscou o desenvolvimento de um controle para o seguidor fotovoltaico modelo horizontal, buscando melhorar a eficiência na geração de energia elétrica. Foi estabelecido como meta, além do controle do movimento do seguidor, o desenvolvimento de uma limpeza automatizada de simples implementação visando diminuir as perdas de geração por acúmulo de sujeira sobre os painéis.

1.1 Enquadramento

O estudo sobre o assunto desta tese torna-se muito oportuno uma vez que a geração fotovoltaica está em crescimento, por incentivo governamental e pela baixa no preço de implementação que vem acontecendo nos últimos anos.

A proposta de projeto foi iniciada pela empresa Valled, buscando alunos para auxiliar no desenvolvimento de um novo produto, um sistema de seguidor solar, uma vez que a empresa já trabalha utilizando-se da tecnologia fotovoltaica. Com o objetivo de desenvolver o seguidor solar, foi solicitado que o projeto siga alguns parâmetros de característica, tais como: seguir deveria possuir apenas um eixo de movimentação, deveria possuir sensoriamento e sistema de proteção para ventos fortes e deveria possuir limpeza automática.

Foi oferecido pela empresa, apoio de engenheiro de criação e engenheiro mecânico da mesma, assim como disponibilidade de utilização do laboratório que seria montado nas dependências da fábrica. No entanto, no período de desenvolvimento do projeto, por motivos próprios, a empresa resolveu deliberadamente realizar o fechamento da parceria deste projeto.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste estudo estão focados no desenvolvimento de um seguidor solar para sistemas FV seguindo como principais características, definidas inicialmente pela empresa:

- Seguidor de 1 eixo no modelo horizontal

- Limpeza automatizada dos painéis PV
- Sistema de controle robusto e simples

Além dos principais objetivos, foi estabelecido também o desejo de desenvolver um sistema de segurança contra ventos fortes e desenvolver um método de monitoramento do nível de sujeidade acumulado sobre as placas FV, para que as mesmas só fossem limpas quando necessário.

Buscou-se validar os métodos e o sistema, como um todo, realizando comparações com software confiável, uma vez que não foi possível realizar a implementação do mesmo, como já debatido no tópico 1.1.

1.3 Estrutura do Documento

Este modelo de dissertação está organizado em cinco capítulos para facilitar a leitura do mesmo. Este relatório foi escrito durante o desenvolvimento do projeto para que fosse possível abordar o máximo de detalhes relevantes no projeto.

Primeiramente é encontrado neste relatório capa e contracapa que apresentam os dados das instituições e pesquisadores envolvidos no desenvolvimento deste projeto, em seguida encontram-se dedicatória e agradecimentos aos familiares e amigos que ofereceram apoio neste período. Para auxílio na localização desta dissertação foi elaborado o índice e as listas de figuras e tabelas.

O resto do relatório está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 descreve-se os sistemas fotovoltaicos já encontrados na literatura assim como sua origem e funcionamento e de seguidores solares e características de sua estrutura; no capítulo 3 foi abordado o desenvolvimento do projeto do controlador do seguidor, demonstrando detalhadamente cada uma das funções; o capítulo 4 apresenta os testes realizados para validar o sistema e os resultados e discussões destes testes; finalmente, o capítulo 5 apresenta as conclusões e direções de trabalho futuro.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 Sistemas fotovoltaicos

Este tópico apresenta a origem da energia solar, assim como seus conceitos básicos de funcionamento, a composição das células fotovoltaicas e os materiais que podem apresentar na sua formação.

2.1.1 Origem

A origem do estudo sobre fotovoltaico é atribuído ao físico Edmond Becquerel, que em 1839 [6], observou a geração de uma corrente elétrica quando dois eletrodos submerso em uma solução ácida eram expostos a irradiação luminosa [7], descobrindo assim o efeito fotovoltaico, que em homenagem ao pesquisador, recebeu o nome de efeito Becquerel. Após esta descoberta inúmeros estudos tomaram a frente, observando o grande potencial nessa nova tecnologia, em 1877 foram desenvolvidas as primeiras células de estado sólido que foram utilizadas na medição de luz em fotografias, a aplicação na geração elétrica como conhecemos hoje, só foi possível com a chegada da tecnologia dos semicondutores na década de 1950. Por sua vez, o silício, material mais presente nas atuais fotocélulas, só foi começado a ser utilizado em 1955 [8]. Apesar de pesquisas sobre células de outros materiais surgirem constantemente, mais de 80% das células geradoras FV contém este

material como base [6], justificando o foco deste t3pico neste tipo de c3lula.

2.1.2 Tipos de Fotoc3lulas

As c3lulas fotovoltaicas, necessitam de materiais que realizem a absorc3o da energia luminosa para que seja poss3vel a convers3o entre energia proveniente do sol em uma diferenca de potencial e por fim numa corrente el3trica, como observado na Figura 2.1.

As c3lulas fotovoltaicas dos pain3is solares s3o feitas de um material semiconductor, que pode conter sil3cio, arseneto de g3lio, telureto de c3dmio ou diseleneto de cobre e 3ndio (g3lio), como discutido por CRESESB [9], principalmente sil3cio dopado com outros elementos qu3micos para ter el3trons livres com menor esforco necess3rio. Os tipos de c3lulas fotovoltaicas mais encontradas no mercado: Sil3cio cristalino (m-Si e p-Si), Sil3cio amorfo hidrogenado (a-Si), Telureto de c3dmio (CdTe), Diseleneto de cobre (g3lio) e 3ndio (CIS e CIGS) e Arseneto de g3lio (GaAs).

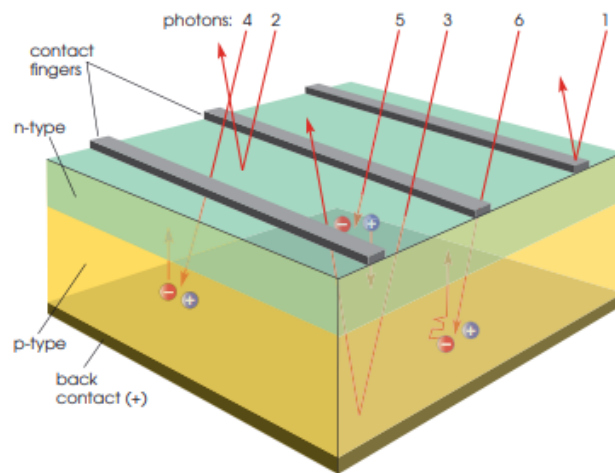


Figura 2.1: C3lula b3sica de sil3cio cristalino. [6]

Dentre os materiais utilizados nas c3lulas FV, o sil3cio tem se apresentado como grande dominante por motivo de sua grande abundancia na superf3cie terrestre [6] e pelo baixo custo [3], dentre os modelos de estrutura apresentadas pelo sil3cio, os mais presentes s3o: sil3cio amorfo e sil3cio cristalino.

O silício amorfo é o que apresenta menor custo e é o mais popular nas aplicações, é a primeira tecnologia de filme-fino utilizada comercialmente, possui uma eficiência de 5% a 7%, possui uma variedade de composição, carbeto de silício amorfo (a-SiC), silício-germânio amorfo (a-SiGe), silício microcristalino ($\mu\text{c-Si}$) e nitreto de silício amorfo (a-SiN), entretanto é muito propenso a degradação. [10]

Por outra mão, o silício cristalino apresenta uma maior eficiência quando comparado com o amorfo, sendo a eficiência comercial em torno de 12% a 19%, esta estrutura de célula FV, por sua vez, pode ser classificada em dois grupos, os silícios mono-cristalinos e os multi-cristalinos.

- mono-cristalinos - São as células de silício que apresentam maior eficiência, são fabricados a partir de uma camada fina ou de um *wafers* de silício puro derretido, e feitos no formato hexagonal para melhor serem encaixados em módulos. Contudo para sua fabricação são necessários muitos processos industriais e por muitas vezes é realizado a dopagem do material para melhorar sua geração [6], encarecendo o seu preço final. A eficiência desta estrutura está em 14-19%.
- multi-cristalino - Também conhecido por poli-cristalino. Este tipo de célula também é produzido a partir de silício fundido puro, mas usando um processo de fundição, então cortado em fatias quadradas finas para tornar as células individuais. Sua estrutura, sendo aleatória, possuindo um tom azul inconstante, como observado na Figura 2.2; é menos eficiente do que com material monocristalino, mas essa desvantagem é compensada por menores custos na fabricação. Os módulos multi-cristalinos exibem eficiências típicas na faixa de 11 a 15%.

Contudo estudos relacionando e comparando os dois modelos de silício cristalino, apresentaram a baixa diferença na eficiência entre os dois [11]; justificando o grande aumento na procura e utilização dos módulos de menor preço: multi-cristalinos.

A célula FV tem seu funcionamento muito parecido com o diodo emissor de luz(LED), porém de forma contrária, o LED converte energia elétrica em energia luminosa e a célula FV converte energia luminosa em energia elétrica. O comportamento deste item já é muito

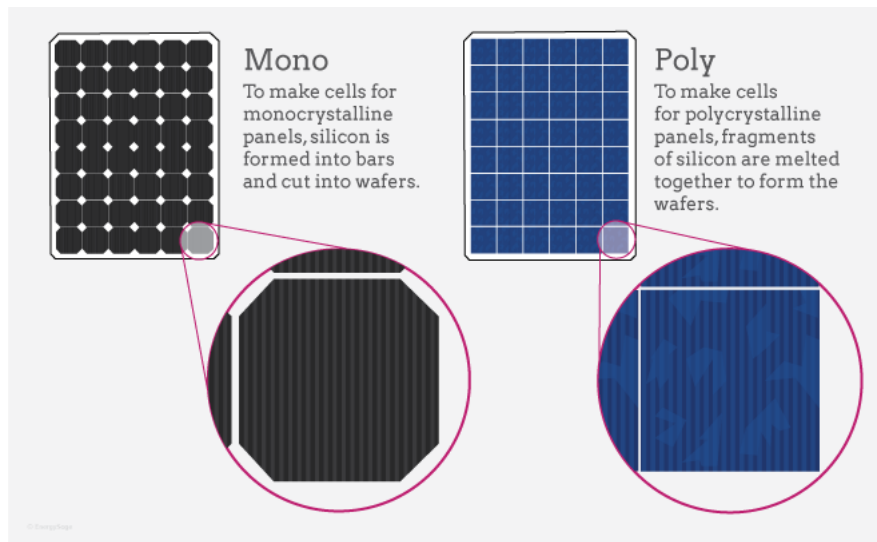


Figura 2.2: Comparação entre silício mono-cristalino e multi-cristalino. [12]

conhecido e pode ser modelado por um circuito elétrico, como observado na Figura 2.3. Uma célula sozinha gera em trono de 0.5V [9], como são poucas aplicações que utilizam uma voltagem tão baixa, é necessário a junção de algumas destas células.

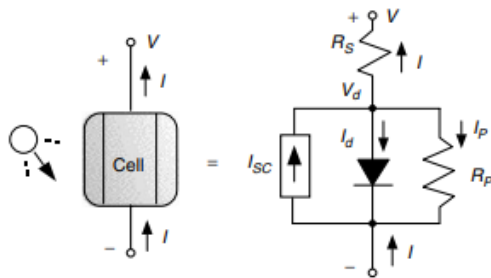


Figura 2.3: Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica. [9]

2.2 Sistema fotovoltaicos

As Junções das fotocélulas compõem os módulos FV, que apresentam comportamento similar as células isoladas [9], vide Figura 2.4 (complementar comentando o comportamento do painel agrupando as células), porém em maior escala; as conexões entre painéis compõem os módulos FV, Figura 2.5. Os painéis junto com outros componentes formam o

sistema fotovoltaico como um todo, que é debatido na próxima secção.

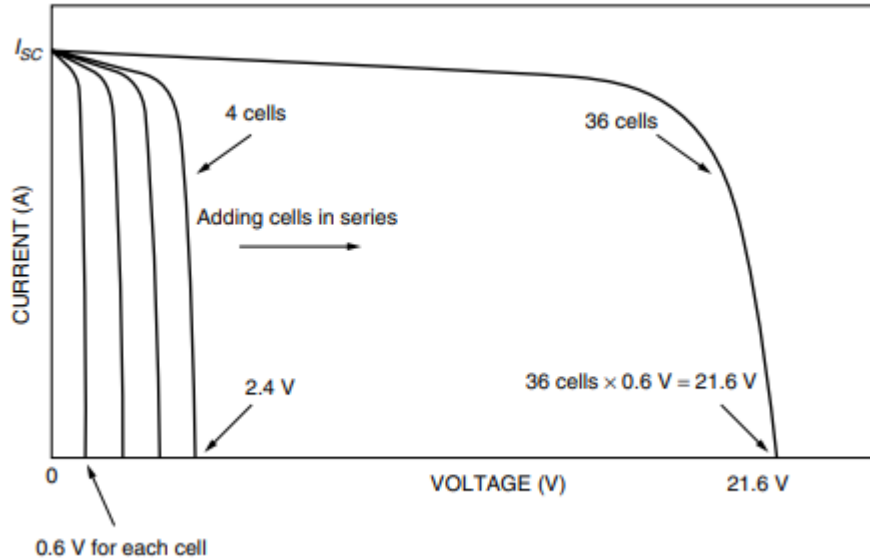


Figura 2.4: Células ligadas em serie, modelo comum de 36 células. [9]

Cada fabricante elabora sua combinação de fotocélulas com o intuito de obter um nível de potência que acha mais comercial, a combinação das células deve estar presente no datasheet, assim como os níveis das grandezas do painel, que são cruciais para a elaboração do projeto.

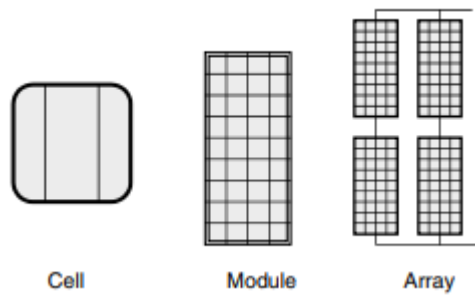


Figura 2.5: Célula fotovoltaica, módulo e painel. [9]

O painel fotovoltaico é a combinação de alguns módulos fotovoltaicos conectados, os módulos podem ser conectados em série, Figura 2.6, resultando em um painel/arranjo com maior tensão, ou em paralelo, Figura 2.7, para que o arranjo possua maior corrente, ou até mesmo uma combinação de conexão em serie e paralelos.

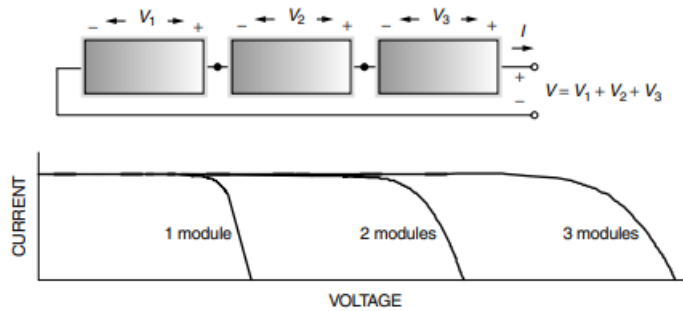


Figura 2.6: Módulo ligado em serie. [9]

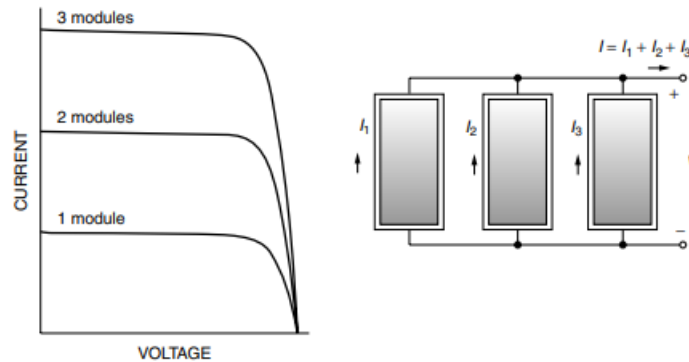


Figura 2.7: Módulo ligado em paralelo. [9]

Para melhor rendimento e garantir a segurança do sistema, os módulos devem ser conectados de acordo com a potência e nível de tensão aceita pelo inversor escolhido para o sistema.

2.3 Movimento Terrestre

Um dos fenômenos naturais que tem grande influência e deve ser sempre considerado nos projetos de geração de energia solar são os movimentos de rotação e translação da terra. Este capítulo irá abordar uma breve revisão sobre os impactos destes movimentos sobre a geração FV.

Uma vez que o fenômeno de rotação determina o período em que o sistema gera energia (dia) e o período de inatividade (noite), o fenômeno de translação causa impacto na variação da duração do dia durante o ano e na angulação de azimute.

O fato da órbita terrestre possuir o formato elíptico e o fato da Terra possuir o eixo de rotação inclinado, são os maiores causadores dos impactos no sistema FV, o movimento do planeta em torno do Sol gera: pelo formato da órbita, períodos anuais em que há maior incidência de irradiação solar; e pela inclinação do eixo terrestre, uma diferente angulação da incidência solar sobre a superfície, esta inclinação pode variar, no solstício de inverno de -23.45° e no solstício de verão de $+23.45^\circ$. Este período é inverso entre os hemisférios, como visto na ilustração 2.8, e os impactos desta inclinação é maior em locais com maiores latitudes [13].

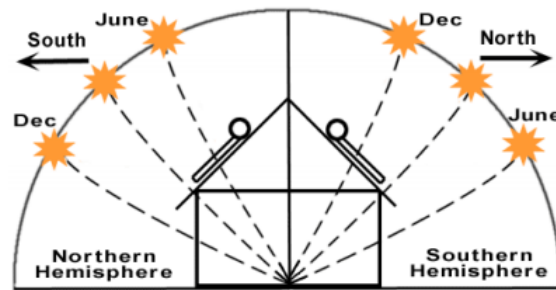


Figura 2.8: Angulação da trajetória solar nos hemisférios. [13]

O ângulo, representado na Figura 2.8, entre o Sol e a linha central, é o ângulo de Azimute, que é calculado na relação entre a direção Sul e a projeção da linha Sol-Terra sobre a horizontal [13], a equação 2.1 apresenta este valor em função do dia do ano.

$$\delta = 23,45 * \sin\left(\frac{360(n180)}{365}\right) \quad (2.1)$$

Esta inclinação é a inclinação que deve ser corrigida ao aplicar um sistema utilizando o modelo de painéis fixos ou seguidores inclinados (polar, azimutal ou seguidor de eixo duplo).

2.4 Seguidores solar

Os seguidores solares são equipamentos que buscam aumentar a geração do sistema por meio do posicionamento das placas fotovoltaicas de forma a possibilitar maior captação da irradiação do sol. A implementação dessa tecnologia fornece um aumento de aproximadamente 20% no custo total do projeto e pode gerar um aumento na produção de energia de 40% [14]. Essa tecnologia apresenta diversos modelos e tipologias que serão abordados no tópico "Formas de rastreamento solar".

2.4.1 Sistemas de controle

Sistema de controle passivo

Sistemas de seguidor FV que possuem controle de posição baseado em controladores passivos não possuem nenhuma eletrônica de processamento e nenhum atuador eletromecânico para originar a movimentação [15], este sistema de controle é baseado na dilatação, de gases ou ligas metais de memória, na presença de irradiação solar movimentando os módulos.

Neste âmbito [15] obteve uma eficiência de 23% comparado com painéis fixos, utilizando gases que dilatam-se na presença do sol, mudando o valor do binário do sistema, movimentando os painéis como na Figura 2.9, utilizando um sistema parecido [16] obteve um resultado de 23,33% utilizando diferentes gases em seu estudo. O funcionamento deste rastreador ocorre pela força da gravidade agindo sobre o líquido presente nos cilindros das extremidades da estrutura. Quando o cilindro é atingido pelo sol, o líquido dentro do cilindro é aquecido e a pressão interna aumenta, movendo o líquido para o outro cilindro por meio do tubo que interliga os dois recipientes movendo assim a estrutura.

Por outro lado [17] utilizando outras abordagens dos seguidores passivos, com faixas verticais de um material que sofre expansão com a temperatura, elaborou um seguidor de eixo múltiplo e obteve um aumento de 28% na geração quando comparado com sistemas fixos. Contudo a grande complexidade deste seguidor quando aplicado em grande escala, torna a utilização do projeto inviável.

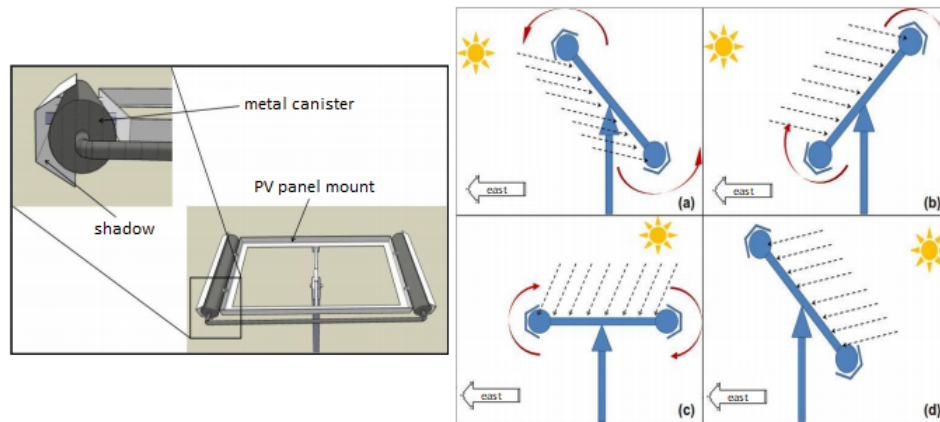


Figura 2.9: Design de seguidor passivo.[16]

Sistema de controle ativo

Os rastreadores com controle ativo, utilizam sistema eletrônico para rastrear a posição do sol e utilizam atuadores para realizar o movimento dos módulos [18]. Esses rastreadores podem possuir sensoriamento por fotodiodo, fototransistoras, piranômetro ou sensoriamento virtual por banco de dados. O sensoriamento e diferença entre ele será abordado no tópico "Sistema de rastreamento solar".

Para realizar o movimento dos módulos FV são utilizados os mecanismos mecânicos ou mecatrônicos como motores DC, motores AC ou atuadores lineares. Os motores AC possuem alta complexidade no seu controle [19], sendo necessário utilizar inversores para controlar de forma eficiente a posição, a velocidade e o torque do motor, aumentando muito o preço do sistema de seguidor, quando não utilizado um inversor de frequência para controle é necessário a utilização de PWM¹ por fases ou uma caixa de redução [20].

Por outro lado, a utilização do motor DC na movimentação de seguidores solares é amplamente aceita pela literatura [21]–[24], pelo seu fácil controle de posição e velocidade, sendo necessário apenas controlar o valor de tensão do motor.

Outra alternativa para utilização são os atuadores lineares, dentre eles pode-se destacar os pistões pneumáticos, pistões eletrônicos e os pistões hidráulicos, contudo o pistão

¹PWM (Pulse Width Modulation) refere-se ao conceito de pulsar rapidamente um sinal digital. Além de várias outras aplicações, esta técnica de modulação pode ser utilizada para resultar uma tensão estática variável e é aplicada no controle de motores elétricos.

eletrônico, vide Figura 2.10, tem maior aceitação e confiabilidade para este modo de utilização. Possuindo uma boa resposta quanto a precisão [25] e baixa complexidade no seu controle, utilizando de pulsos PWM para controle. Essas duas ultimas opções, DC motor e pistão eletrônico, são passivas de aplicação uma vez que as duas utilizam-se de motores DC, porém de formar diferentes, com movimento rotativo e movimento linear respectivamente. Os atuadores lineares têm apresentado alto torque para um baixo custo, o que o torna uma ótima opção para a movimentação de grandes linhas de seguidores.



Figura 2.10: Atuador linear, pistão eletrônico. [26]

O atuador escolhido para elaboração deste sistema foi o atuador linear, pela praticidade de substituição, pela facilidade de manutenção, pelo baixo custo e pelo alto torque.

2.4.2 Sistema de rastreamento solar

Uma vez que o principal objetivo de um seguidor solar, é realizar o seguimento da trajetória solar, é essencial que a posição do astro seja reconhecida. Este tópico abordará os diferentes meios de rastreamento da posição solar.

O sensoriamento do sistema de seguimento possui diversas maneiras, pode ser um sistema em malha aberta ou malha fechada podendo utilizar sensores ou algoritmos com banco de dados ou até mesmo a junção entre os dois sistemas.

Seguimento com sensor

Os fotosensores são capazes de identificar a presença de luz ou até mesmo a intensidade da luminosidade, dentre os fotosensores os mais comuns são: fotodiodo, fototransistor e o LDR (Resistência sensível a luz, em tradução do inglês) [13]. Esses sensores compõem sistemas de malha fechada que, quando obtém dados sobre o sol, emitem sinais para a movimentação dos atuadores. Geralmente os sistemas FV utilizam pares de fotosensores, onde o erro entre os dois sensores indica o ângulo a ser corrigida, juntamente com alguma estrutura para melhor adaptar o uso, como na Figura 2.11.

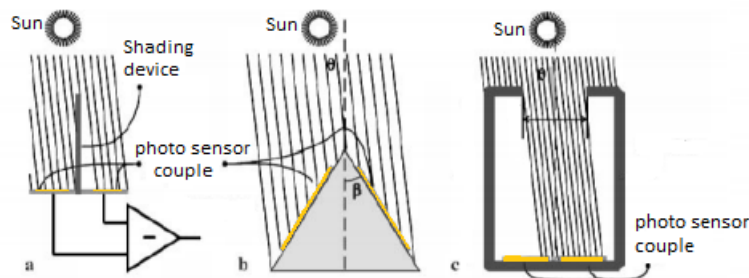


Figura 2.11: Diferentes abordagens com fotosensores. [27]

As desvantagens deste tipo de rastreamento são: os fotosensores devem ser iguais, para garantir os mesmos níveis de leitura, caso contrário a determinação da posição do sol não será feita de forma precisa; a sensibilidade e confiabilidade do sensor são comprometidas com o efeito de envelhecimento do semicondutor e com a sujeira presente sobre ele [28], além da perda de orientação, por parte dos sensores, durante dias nublados/com pouca iluminação.

Seguimento sem sensor

Este segmento de rastreamento possui o sistema de controle em malha aberta e utiliza de algoritmos para determinar a posição do sol.

Estes algoritmos podem apresentar diferentes níveis de complexidade, uma vez que os mais simples necessitam apenas de hora, data e local, para determinar a posição solar, tornando-se ideais para seguidores de eixo único. Há também aqueles mais complexos que

exigem grande processamento levando em conta latitude, longitude, pressão, temperatura entre outras variáveis tornando o sistema muito mais complexo, porém alcançando a precisão de 0,0003º de erro [29].

Ainda considerando o grupo de algoritmos que possuem baixa necessidade de processamento, os algoritmos que possuem acesso a banco de dados meteorológicos apresentam bons resultados, podendo indicar a duração do dia e o nascer e pôr do sol apenas pelo dia do ano. Organizações online como [30] e [31] apresentam calendários solares reconhecidos com dados angulação de azimute [30], [31], angulação de altitude e fuso horário [31], além dos dados citados acima sobre o dia solar. Simplificando e diminuindo a quantidade de processamento necessário para os cálculos.

2.4.3 Número de eixos de atuação

Os sistemas podem possuir 1 ou 2 eixos de atuação, como apresentado na Figura 2.12, esta classificação separa os sistemas fotovoltaicos em duas grandes vertentes. Os que possuem apenas 1 eixo, possuem o benefício de serem mais baratos e mais simples sua construção, contudo possuem menor precisão em relação aos de 2 eixos. Por sua vez o outro grupo de seguidores, os de 2 eixos, possuem maior precisão e maior complexidade, e por consequência maior custo.

Os sistemas de 2 eixos apresentam maior aumento na geração dos sistemas e maior aplicabilidade em locais diversos, diferente dos seguidores de 1 eixo que tem sua aplicabilidade e rendimento maximizados em situações específicas que serão apresentados a seguir.

2.4.4 Forma de rastreamento solar

Os dois grandes grupos, abordados no tópico anterior, podem ser divididos ainda quanto a forma em que se movimentam realizando o rastreamento. Os seguidores de apenas um eixo, podem ser: polar, azimutal e horizontal; os de eixo duplo, por sua vez, podem apresentar se em: polar equatorial e azimutal/elevação [4].

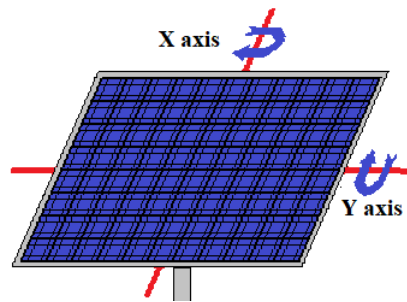


Figura 2.12: Eixos X e Y em um seguidor.

Comparando diferentes tipos de rastreamento solar, verificou-se que o seguidor de eixo único horizontal N-S, Figura 2.14, possuía uma absorção de 81.8% da absorção em relação ao seguidor de eixo duplo 2.17, que é o seguidor mais completo e complexo, em estudo realizado em Changdu / China [32], localizado em aproximadamente 31° de latitude, demonstrando desempenho próximo, com uma estrutura mais simplificada e com menos investimento, justificando a decisão para esse modelo, eixo único horizontal, como alvo da aplicação deste estudo.

Seguidor polar

O seguidor Polar de apenas um eixo, apresenta o eixo de rotação inclinado em relação ao solo, onde a inclinação do eixo se equipara a inclinação da latitude do local em que se situa o sistema fotovoltaico, Figura 2.13. Este modelo de seguidor realiza o movimento seguindo o Sol de Leste a Oeste, possuindo um simples controle, porém gerando maior quantidade de sombra que os demais seguidores de eixo único. Aplicável em locais longe da linha do equador que apresenta maior valor de latitude.

Seguidor horizontal

O seguidor Horizontal, também apresenta apenas um eixo de atuação, contudo este tem sua estrutura com o eixo de movimentação paralelo ao solo, como apresentado na Figura 2.14, sem possuir inclinação alguma. Assim como o modelo anterior, polar, segue o Sol de Leste a Oeste, em um movimento de simples controle. Aplicável e bem aceito em locais com baixa latitude.

Seguidor azimutal

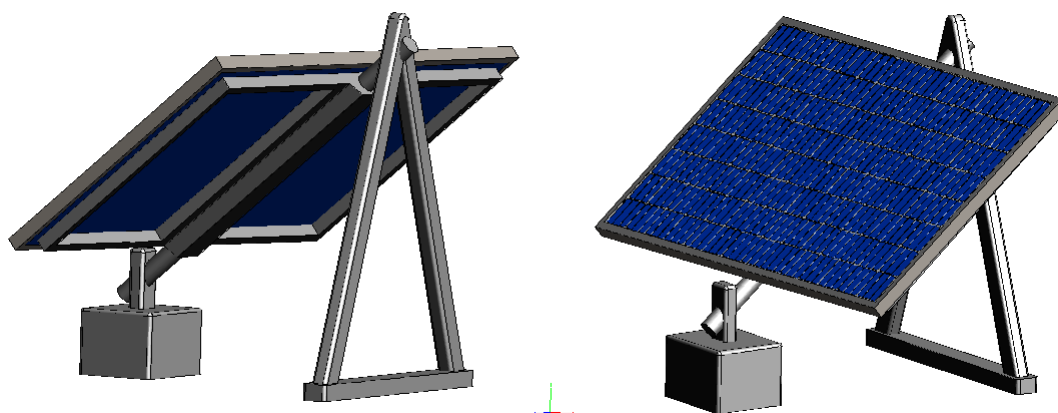


Figura 2.13: Seguidor de 1 eixo Polar.

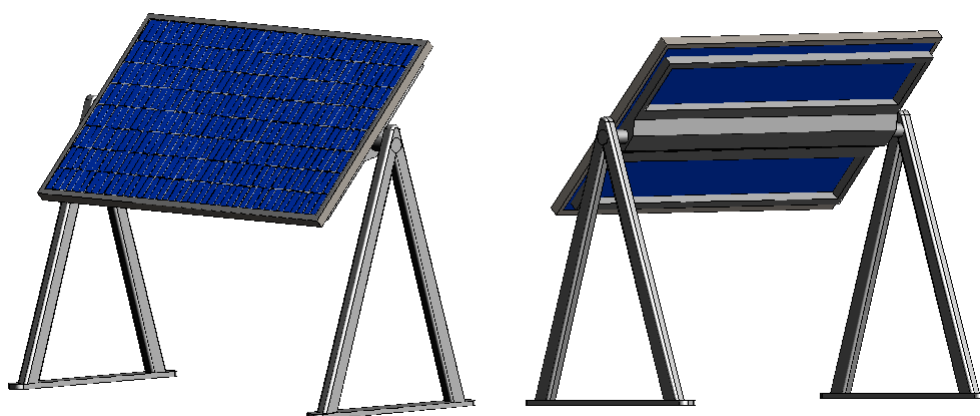


Figura 2.14: Seguidor de 1 eixo Horizontal.

O seguidor Azimutal de apenas um eixo apresenta uma estrutura de formato de pedestal, mais complexa que os outros dois modelos de seguidor de eixo único, como possível observar na Figura 2.15 apresentando uma inclinação fixa adequável a cada local, aplicável principalmente em locais distantes da zona equatorial.

Seguidor polar equatorial

O seguidor polar equatorial permite coletar o máximo de energia possível, uma vez que apresenta uma estrutura que possibilita movimento em qualquer angulação nos eixos X e Y, como observado na Figura 2.16, deixando as placas fotovoltaicas sempre perpendiculares aos raios solares. Contudo apresenta alta complexidade, elevado custo e necessita

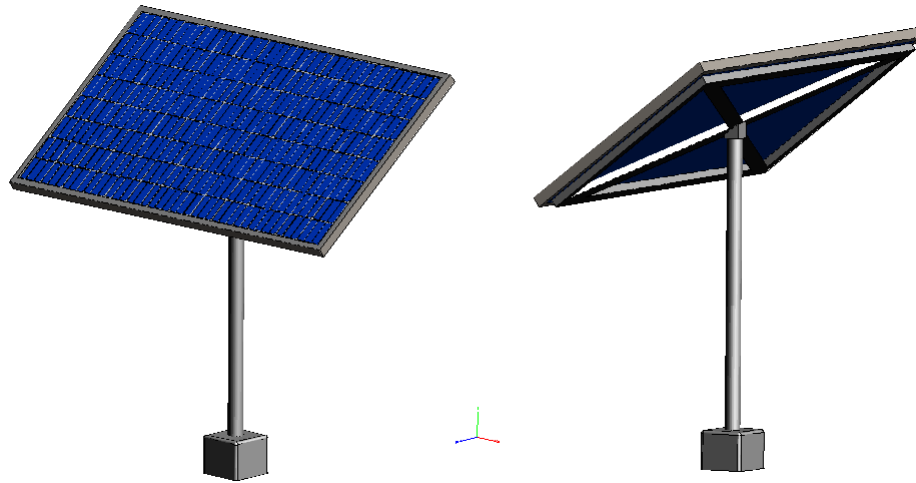


Figura 2.15: Seguidor de 1 eixo Azimutal.

de uma grande área pois gera grande sombreamento.

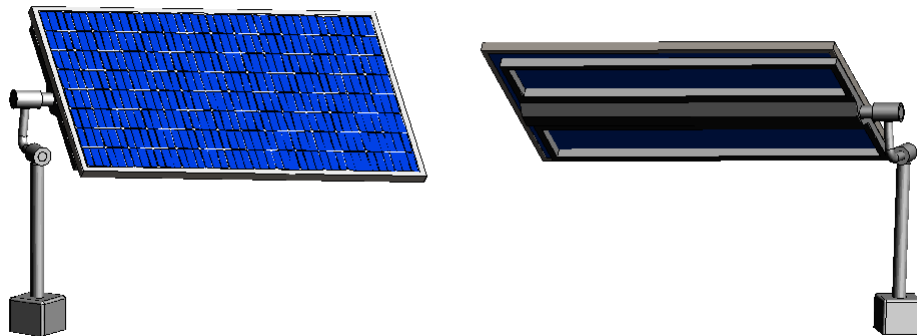


Figura 2.16: Seguidor de 2 eixo Polar Equatorial.

Seguidor azimutal/elevação

O seguidor azimutal/elevação, 2.17, assemelha-se bastante ao seguidor Azimutal de 1 eixo, já abordado anteriormente, contudo com um eixo a mais de atuação o qual o ajusta automaticamente a inclinação das placas. Este modelo possibilita alta precisão em seu rastreamento aplicável em qualquer localidade do globo terrestre, porém possui maior custo de implementação e utilização que os sistemas de eixos únicos.

Comparando os diferentes rastreadores, [33] observou os resultados apresentados na

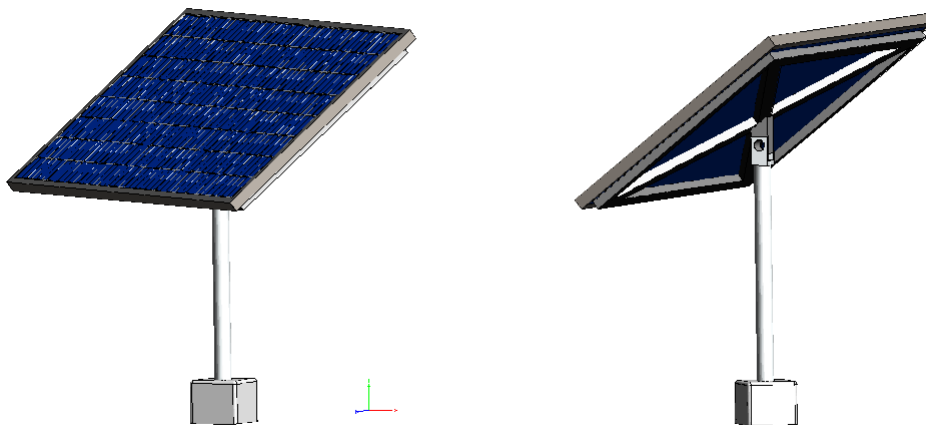


Figura 2.17: Seguidor de 2 eixo Azimutal - Elevação.

Figura 2.18; demonstrando que o resultado da aplicação dos diferentes modelos de rastreadores solares, depende muito da localização global do sistema, já debatido anteriormente no tópico 2.3.

Uma vez que os diferentes modelos de seguidores apresentam diferentes respostas para cada cidade aplicado, foi necessário buscar qual a relação que cada seguidor apresenta entre o seu retorno no aumento da geração e seu custo de implementação, segundo [34] foi possível verificar o tempo de payback, retorno financeiro, de cada um dos sistemas de seguidor, como visto na figura 2.19

A determinação da escolha do tipo de estrutura de rastreamento foi feita pela empresa, que originou este estudo, partindo do nicho alvo desta pesquisa (grandes fazendas solares), buscando menor complexidade de controle e estrutura; objetivando também a possibilidade de dinamizar o tamanho dos arrays de painéis de acordo com o desejo do futuro cliente. Foi escolhido então a estrutura de rastreamento baseado no modelo de seguidor de eixo único horizontal.

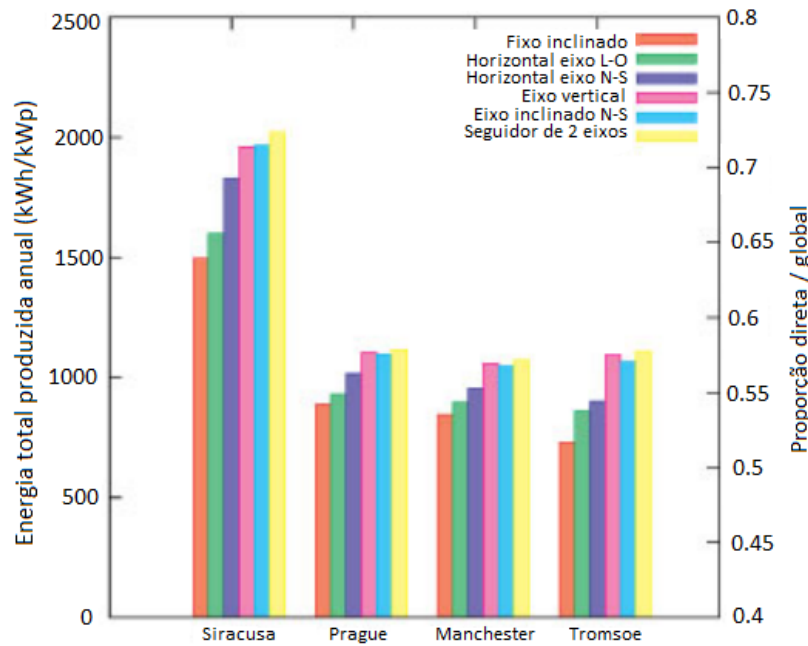


Figura 2.18: Produção de diferentes seguidores em algumas cidades. [33]

Tipo de seguidor solar	Custo por Watt gerado	Projeção de Payback
Sistema de painel fixo.	\$2-2.4/watt dependendo da localização	1.5 - 3.5 anos para sistemas FV de silício cristalino
		1 - 1.5 anos para tecnologia de filme fino
Seguidor de eixo unico.	\$1.17/watt premium em relação à eficiência	3.0 anos para investimento em seguidor
Seguidor de eixo duplo.	\$0.36/watt premium em relação à eficiência	3.5 - 5 anos para investimento em seguidor
Seguidor passivo.	\$1.2-2/watt dependendo da localização e características	Aproximadamente 5 anos de custo de payback

Figura 2.19: Comparação entre Payback dos modelos de seguidores solar. [34]

2.5 Efeito do vento sobre a estrutura

Quando é realizado um investimento como este, com alto valor de capital, é necessária uma preocupação maior em relação a segurança do equipamento, para que o mesmo permaneça em bom funcionamento durante toda sua vida útil. Por este motivo é válido realizar um pequeno estudo de revisão sobre os impactos das cargas naturais sobre os módulos, dentre as cargas possíveis no sistema fotovoltaico: vento, chuva, neve, terremoto e seu próprio binário causado pelo peso; o vento possui a maior influência [35]

O impacto do vento é mensurado pela sua pressão ou pela sua força sobre a plataforma,

o efeito deste impacto depende, não apenas das propriedades do vento (velocidade e turbulência), mas também com os fatores da estrutura do seguidor (forma, orientação, inclinação) [36], [37].

Estudo realizado em [36] foi possível observar o coeficiente de pressão (cp), resultante do vento, sobre diferentes partes do painel FV, como representado na Figura 2.20, observando o maior impacto do vento em inclinações maiores do seguidor.

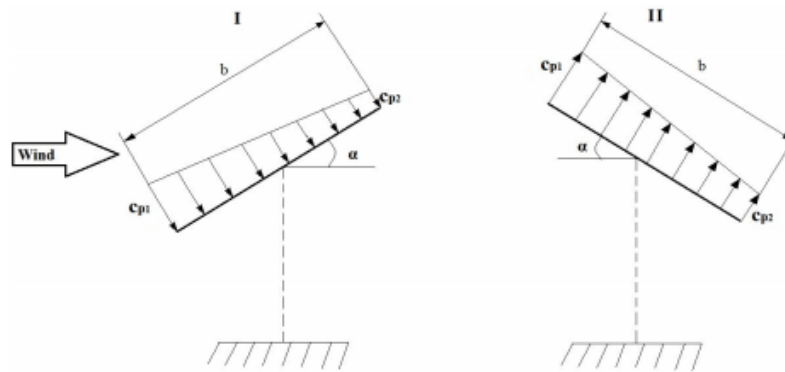


Figura 2.20: Diagrama do impacto do vento sobre o painel.[36]

Os valores obtidos foram abordados na tabela 2.1, possibilitando a conclusão que o ângulo onde o vento causa menos impacto é o ângulo 0° (seguidor na horizontal), definindo assim esta posição como posição de segurança para o controle, o sistema de monitoramento do vento será debatido na metodologia na seção 3.3.

	Angulo de inclinação, α						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	$60^\circ-90^\circ$
cp_1	0	0,8	1,2	1,6	1,6	1,4	1,2
cp_2	0	0	0,4	0,8	0,8	1,0	1,2

Tabela 2.1: Valores de cp_1 e cp_2 para diferentes ângulos do seguidor. [36]

Apesar do sistema possuir uma posição de segurança para ventos fortes, deve ser levado em conta um estudo de frequência natural e resistência a cargas do sistema, no momento de implementação, evitando acidentes como o ocorrido em 2018 na usina fotovoltaica Oakey 2, Figura 2.21, situada na Austrália [38].



Figura 2.21: Os módulos retorcidos. Danos sofridos no local do Oakey 2. [38]

2.6 Efeito da sujeidade

Entre os fatores externos que impactam a geração de energia fotovoltaica, o acúmulo de detritos é um dos mais importantes a serem considerados [39], [40], como mostra a Figura 2.22. O impacto causado pelo acúmulo de detritos pode ser observado como uma perda progressiva de potência, devido ao sombreamento causado pela sujeira, como foi possível analisar em [39], apresentando valores de perda por sujeira entre 40-70% para uma exposição do sistema por 6 meses, em ambientes com clima muito seco e com baixa incidência de chuva. No entanto, por outro lado, observou-se que climas mais úmidos podem acabar aumentando a aderência de sujeira na superfície dos módulos, o que deve ser levado em consideração na limpeza dos módulos, a fim de limpar com mais cuidado e não danificar o sistema [41].

Modelar o impacto da sujeira é uma maneira de identificar essa queda na geração fotovoltaica e melhorar as condições operacionais do sistema. De acordo com a literatura analisada, foram encontrados modelos em que o nível de sujeira foi modelado com base em fatores climáticos [42], [43], o método que apresenta os melhores resultados, conforme concluído em [11]. E também existem modelos que usam o comportamento do sistema como base [44].

Os modelos analisados possuem formas de monitoramento muito complexas, o que pode dificultar sua aplicação, por apresentar alto custo de aplicação, devido ao número

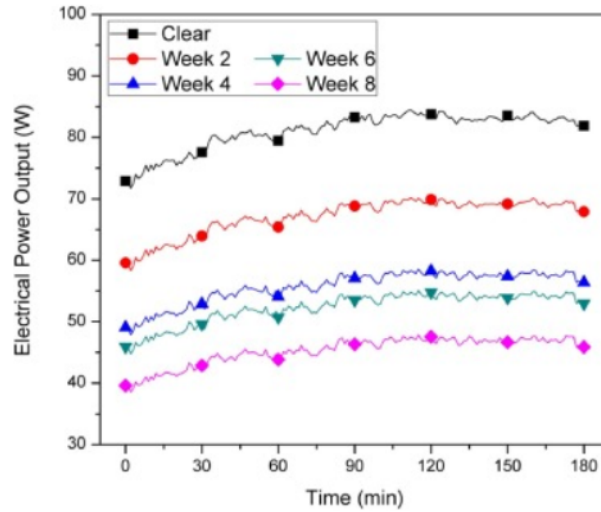


Figura 2.22: Impacto da sujidade na geração [39].

de sensores necessários e à necessidade de alto processamento de dados, pois utilizam redes neurais artificiais (RNA) e cálculos muito complexos, tornando esses métodos economicamente inviáveis [32].

Um dos desafios deste estudo é desenvolver o monitoramento do índice de sujeira no sistema fotovoltaico, com baixa complexidade, evitando o uso de ferramentas de análise complexas, como redes neurais, e evitando o uso de muitas variáveis de entrada, conforme apresentado em [42]–[44].

2.7 Limpeza automatizada de sistemas FV

Apresentado os efeitos ocasionados pelo acúmulo de sujidade sobre as placas FV, este tópico apresenta alguns dos métodos de limpeza FV, suas características e principais aspectos negativos e positivos dos mesmos.

Apresentado um breve estudo [45] sobre os sistemas limpeza automatizados, é possível observar inúmeros métodos de limpeza; dentre os métodos destacam-se os robóticos que apresentam estrutura de trilhos e escovas sobre os painéis [46]–[48] contudo este método implica em um grande investimento inicial e possuem grande peso interferindo na dinâmica dos seguidores solares.

Ha também os robôs que utilizam da geolocalização para percorrer os módulos fotovoltaicos [45], porém necessitam de supervisão humana para assegurar seu funcionamento e possuem a desvantagens do peso assim como os que utilizam de trilhos para movimentar. Em contrapartida possuem os que utilizam de ondas eletroestáticas [49], estes removem as partículas de sujeira por meio do efeito eletroestático realizado pelos gases comprimidos, contudo há a necessidade de pressurização dos gases para bom funcionamento, ou requerem alimentação trifásica para funcionamento [50]

Noutro ramo há ainda o método por aspersão de água [51], onde são instalação aspersores entre cada placa FV que por gravidade remove o acúmulo de sujeira, este método possui baixo custo de implementação, porém necessita de grande volume de água e não há um ciclo fechado para a mesma, ocasionando num grande desperdício.

2.8 Conclusão

Durante este capítulo foram apresentadas as tecnologias existentes no setor de energia fotovoltaica e de seguidores solares, assim como a comparação entre eles, além de apresentar estudos presentes na literatura que abordam fenômenos como: efeito da sujeira na geração, sistemas de limpeza de painéis existentes, impacto da força do vento sobre a estrutura do seguidor; que são relevantes para a estrutura e a geração de energia FV. O estudo dos efeitos desses fenômenos auxiliou na caracterização e desenvolvimento do sistema que foi elaborado.

Partindo dos estudos apresentados neste capítulo foi decidido pela utilização do pistão eletrônico como atuador no seguidor horizontal. Do efeito do vento foi concluído a necessidade de utilização de um piranômetro para monitoramento constante do vento. Do efeito da sujeira foi determinado a necessidade de monitoramento utilizando modelagem e a limpeza do painéis sera feita por aspersão toda via mantendo a água num ciclo fechado evitando perdas.

O capítulo a seguir apresenta uma caracterização do sistema/produto separado em:

funções do controle (Movimentação e orientação 3.2, Sistema de segurança 3.3, Monitoramento da eficiência 3.4, Limpeza 3.5) e Ferramentas.

Capítulo 3

Desenvolvimento do Sistema

3.1 Caracterização do sistema

Como ponto de partida desta dissertação, foi proposto, pela empresa parceira, o desafio de desenvolver um controle para seguidor de 1 eixo do tipo horizontal, com sistema de limpeza automática; porém que fosse elaborado de forma simples para que seja de fácil implementação comercial.

Seguindo as características solicitadas pela empresa e os objetivos definidos na seção 1.2, utilizando as referências obtidas na realização do embasamento teórico 2 foi desenvolvido o sistema que é descrito abaixo. Onde Observamos no centro do diagrama o hardware escolhido, Raspberry pi, os sinais de entradas provenientes dos sensores, anemômetro monitorando o vento para segurança, sensor amperímetro e sensor de irradiação solar monitorando a sujidade do sistema; e como saída do hardware o sinal PWM para movimentação e controle do pistão e o acionamento da bomba de água para limpeza

Um diagrama da caracterização completa do sistema está presente a seguir, 3.1, detalhando todos os componentes presentes no mesmo. A discussão abaixo apresenta de forma mais detalhada a caracterização de cada funcionalidade e equipamentos utilizados por ela.

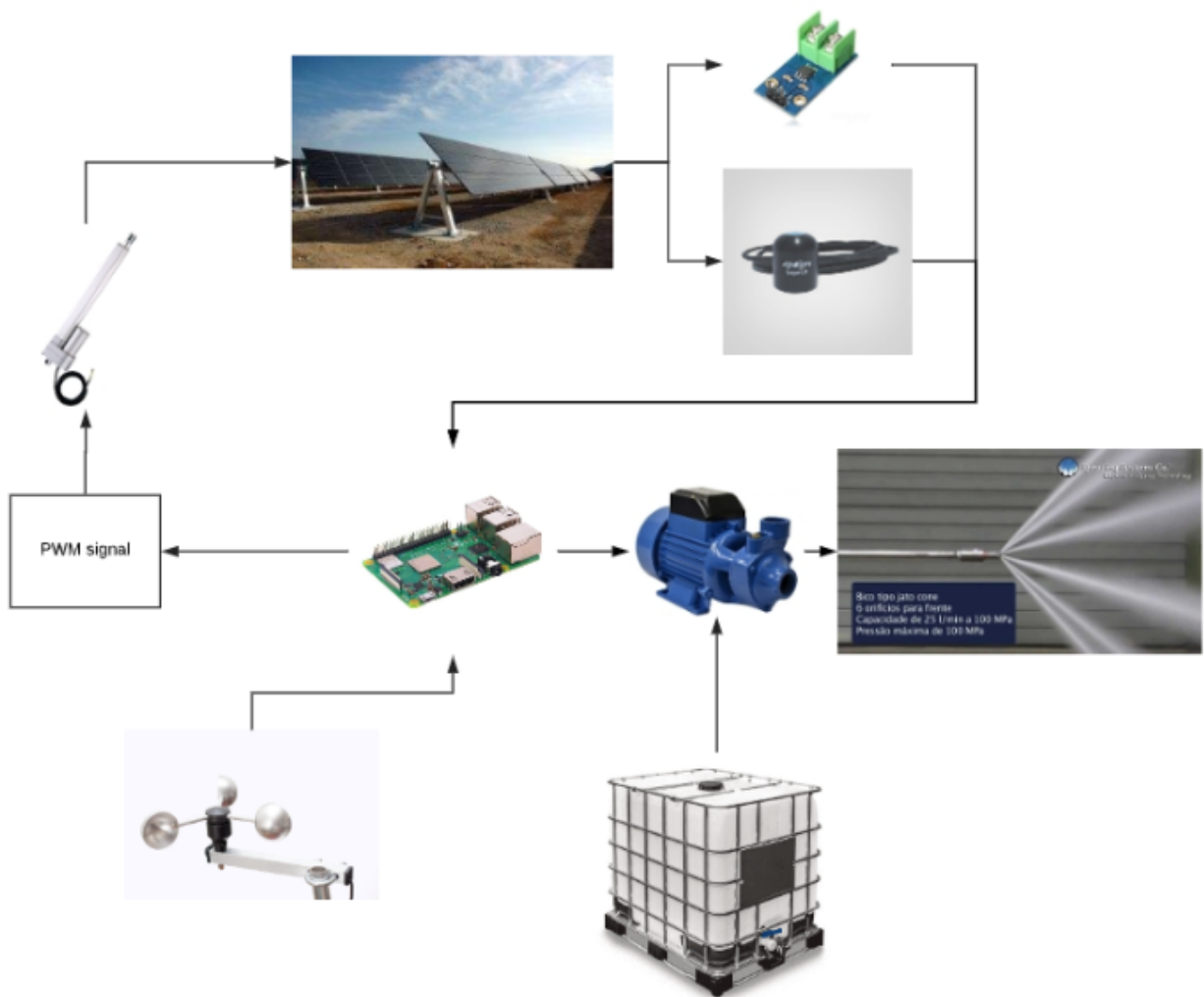


Figura 3.1: Diagrama de blocos do sistema do seguidor fotovoltaico.

3.2 Sistema de movimentação e orientação

3.2.1 Movimentação

O modelo de seguidor horizontal, abordado na secção 2.4.4, apresenta fácil implementação,[32], e aceita todos os atuadores utilizados no mercado (motores DC, motores AC ou atuadores lineares), logo, foi necessário a definição de qual seria o atuador utilizado neste sistema para direcionar o estudo do controle.

Foi escolhido o pistão eletrônico, uma vez que o mesmo possui baixo custo, alta precisão [25] e pode ser controlado facilmente por frequência de PWM. Instalando o atuador linear na base do seguidor e sua outra ponta em uma das extremidades do suporte do módulo PV, é possível converter o movimento linear em rotatório, para seguir o sol de Leste a Oeste, como observado na Figura 3.2.

Para que o sistema tenha boa rotação e consiga a angulação equidistante, tanto a leste quanto a oeste, é necessário que o pistão esteja na metade do seu comprimento quando os módulos estiverem horizontal. O tamanho do pistão foi dimensionado para que o sistema, para que quando o sistema estiver em seu estado inicial, esteja com uma angulação de 45° (em relação a haste de base) no amanhecer e ao fim de sua jornada esteja em 315° .

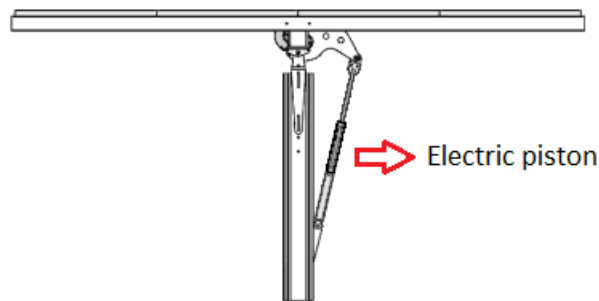


Figura 3.2: Pistão eletrônico em seguidor horizontal. Adaptado de [52]

Para controle de velocidade de abertura do pistão foi utilizado o PWM, baseado na velocidade angular variável de acordo com a relação entre a amplitude máxima do sistema, 270° , e a duração do dia solar, obtido por meio do sensor virtual elaborado, o sensor será debatido neste mesmo tópico a seguir.

3.2.2 Orientação

Afim de diminuir o custo de implementação deste sistema, foi desenvolvido um sensor virtual, baseado no cruzamento de informação obtidos nos bancos de dados [30], [31].

Foi organizado as informações em planilhas do tipo XLSX para facilitar a leitura pelo programa 3.3; possuindo 12 planilhas(dividido por meses) contendo os dados diários de nascer e pôr do sol, duração do dia solar. Este método de sensoriamento foi abordado no estado da arte no tópico seguimento sem sensor 2.4.2. Obtendo a duração diária e amplitude máxima, foi calculado de forma direta a velocidade angular de seguimento do sol, dada em $^{\circ}/\text{min}$.

A forma de rastreamento solar por sensor virtual possui boa precisão e baixo custo, contudo este método necessita que o calendário e relógio do hardware estejam sempre atualizados em relação ao local de implementação além da necessidade de um, já existente, banco de dados solar do local (pode ser utilizado de proximidades, sujeito ao aumento do erro).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	-	Duração do dia		Duracao em MINUTOS	Nascer		Meio-dia Solar	Pôr	
2	Fev	Duração	Diferença (s)	Duracao	Início	Fim		Início	Fim
3	1	10h 15m 08s	0	615.133333	7	42	12:50	17	57
4	2	10h 17m 10s	120	617.133333	7	41	12:50	17	59
5	3	10h 19m 14s	126	619.233333	7	40	12:50	18	0
6	4	10h 21m 21s	126	621.333333	7	40	12:50	18	1
7	5	10h 23m 28s	126	623.433333	7	39	12:50	18	2
8	6	10h 25m 37s	132	625.633333	7	38	12:50	18	3
9	7	10h 27m 47s	132	627.833333	7	37	12:50	18	4
10	8	10h 29m 59s	132	630.033333	7	35	12:50	18	5
11	9	10h 32m 11s	132	632.233333	7	34	12:50	18	7
12	10	10h 34m 25s	132	634.433333	7	33	12:50	18	8
13	11	10h 36m 40s	138	636.733333	7	32	12:50	18	9
14	12	10h 38m 56s	138	639.033333	7	31	12:50	18	10
15	13	10h 41m 13s	138	641.333333	7	30	12:50	18	11
16	14	10h 43m 31s	138	643.633333	7	29	12:50	18	12

Figura 3.3: Tabela de dados solares utilizada no sensor virtual.

3.3 Sistema de segurança

Mesmo evitando o sensoriamento para diminuir o custo, quando se trata de um alto investimento, é necessário para segurança do equipamento a utilização de um Anemômetro, como já apresentado em 2.5. Foi utilizado um sensor comercial simples e foi adaptado o código do fabricante para o sistema PV. Quando o sensor indica um vento superior ao determinado pelo cliente o sistema de movimentação entra em modo de segurança deslocando os painéis para 90° em relação a base (metade do comprimento do pistão elétrico).

O sistema de monitoramento de vento está ativo em todas as etapas do controle para evitar que rajadas de ventos causem algum dano ao sistema.

Para supervisionar e possibilitar uma aplicação futura ao usuário, foi desenvolvido no controlador, a função de aquisição de dados: velocidade de ventos que ultrapassam a velocidade limite, horário em que o sistema de segurança foi acionado e o tempo que o sistema ficou nesta posição; salvando esses dados em um arquivo com formato xls.

Para determinar o limite de velocidade do vento é necessário realizar o estudo de resistência da estrutura do seguidor.

3.4 Sistema de monitoramento da sujidade/eficiência

Uma vez que um dos objetivos deste desafio é gerenciar uma limpeza automática; foi necessário a definição de parâmetros para realização da limpeza. Foram levantadas hipóteses de realização da limpeza periódica, contudo foi verificado na literatura a não linearidade do acúmulo de sujidade sobre os painéis, pois eventos como: chuva, dejetos de animais e outros; modificam de forma irregular (tanto aumentam como diminuem) o nível de sujeira acumulado.

Decidiu-se então monitorar grandezas de geração, para que fosse possível medir, em tempo real, o nível de sujidade a partir do efeito dela sobre o sistema. Para tal, foi buscado na literatura uma modelagem de PV que melhor se adequasse ao caso estudado.

O modelo é baseado na modelagem apresentada em [51], [53] aplicada em Python ao programa elaborado. Foi decidido, embasado no tópico 2.6, que a grandeza de geração que sofre maior impacto com o acúmulo de sujeira é a corrente elétrica gerada ($I_{out_{Real}}$).

Foi realizado a estimativa de $I_{out_{Estimado}}$ através da modelagem e de valores de irradiação e para realização do monitoramento foi comparado com os valores de $I_{out_{Real}}$ medidos constantemente. A metodologia segue o diagrama mostrado na Figura 3.4.

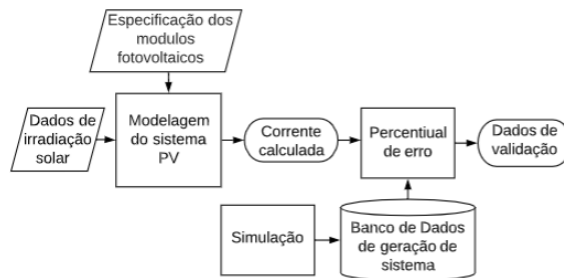


Figura 3.4: Sistema de monitoramento da sujeira.

3.4.1 Calibração do modelo

O monitoramento da sujeira utiliza como parâmetros fixos na modelagem, as especificações fornecidas pelo fabricante de cada módulo utilizado, para obter o melhor resultado. A atualização destes dados é de extrema importância, uma vez que são eles que indicam o comportamento das células PV nas condições de referência dos fabricantes; eles podem ser encontrados no datasheet dos módulos PV. Os dados utilizados foram listados em tabela 3.1.

Observando os valores dos coeficientes α e β ($\alpha = 5.0mA/C$ e $\beta = -163mV/C$) [52], que representam a variação de corrente gerada e a variação de tensão gerada, decorrente da temperatura respectivamente; foi possível perceber que a temperatura causa uma interferência muito menor sobre a corrente quando comparado com a tensão; demonstrando assim a irrelevância de monitoramento da temperatura para a estimativa de I_{out} . Então foi decidido por limitar a variável T na equação 3.6 a uma constante igual ao valor de T_{ref} .

Tabela 3.1: Lista de variáveis de calibração do sistema. [51]

V_{oc}	- Tensão de circuito aberto do módulo (V);
V_{mp}	- Tensão de máxima potência do módulo (V);
I_{sc}	- Corrente de curto circuito do módulo (A);
I_{mp}	- Corrente de máxima potência do módulo (A);
α	- Coeficiente de variação corrente por temperatura na irradiação de referência (A/°C);
β	- Coeficiente de variação tensão por temperatura na irradiação de referência (V/°C);
R_s	- Resistência de módulo em serie (Ω);
S_{ref}	- Irradiação solar de referência (1000 W/m ²);
T_{ref}	- Temperatura de referência (25°C).

3.4.2 Aquisição de dados de monitoramento da sujidade

Considerando a modelagem do sistema realizada por [51], verificou-se que o comportamento do sistema pode ser definido pelas seguintes equações:

$$I_{out} = I_{sc} * \left[1 - C1 * \left(e^{\frac{V_{out} - \Delta V}{C2 * V_{oc}}} - 1 \right) \right] + \Delta I \quad (3.1)$$

$$C2 = \frac{\left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}} \right) - 1}{\ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right)} \quad (3.2)$$

$$C1 = \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) * e^{\frac{-V_{mp}}{C2 * V_{oc}}} \quad (3.3)$$

AS equações 3.1, 3.2 e 3.3 representam o comportamento de I_{out} , este comportamento apresenta relação direta com: as constantes de calibração, discutidas acima, variáveis do sistema : temperatura (T), irradiação solar (S) e tensão de saída (V_{out}); e também com ΔI e ΔT apresentados nas equações 3.5 e 3.6.

$$\Delta I = \alpha * \frac{S}{S_{ref}} * \Delta T + \left[\frac{S}{S_{ref}} - 1 \right] * I_{sc} \quad (3.4)$$

Em ΔI , observamos a influência sofrida pelo I_{out} causado pela variação de temperatura e pela variação da irradiação solar, pode-se verificar que, devido ao valor de α ser

muito pequeno, a corrente varia pouco em relação à T, porém apresenta grandes variações quando variado o valor de S.

$$\Delta V = -\beta * \Delta T - R_s * \Delta I \quad (3.5)$$

No entanto, este sistema se concentra em uma implementação simplificada e menor custo, para esse fim, foi decidido por uma diminuição no número de sensores necessários; depois de analisar o efeito da sujeira em alguns sistemas, foi observado que o maior impacto do acúmulo de detritos está na corrente gerada, pois os detritos limitam a quantidade de irradiação absorvida pelas fotocélulas [54], [55]; com base nesses estudos e em nosso objetivo de reduzir preço e complexidade, foi decidido por considerar a tensão de saída (V_{out}) na equação 3.1 uma constante igual ao V_{mp} , valor fornecido pelo fabricante.

$$\Delta T = T - T_{ref} \rightarrow T = T_{ref} \rightarrow \Delta T = 0 \quad (3.6)$$

Após a validação da modelagem, que será abordada no tópico 4, foi possível realizar a estimativa de I_{out} e comparar com a corrente gerada, medida a partir de um sensor amperímetro, na saída dos módulos e determinar qual a perda de eficiência ocasionada pela sujeira. O sensor amperímetro escolhido apresenta fácil implementação por utilizar efeito hall para efetuar a medição, não sendo necessário abrir o circuito para tal.

Utilizando fórmula do erro simples é possível verificar qual o desvio da corrente medida (I_{medida}) em relação a corrente estimada ($I_{estimada}$) e calcular o índice de eficiência ($Ind_{eficiência}$), equação 3.7

$$Ind_{eficiência} = 1 - ((I_{estimada} - I_{medida})/I_{estimada}) \quad (3.7)$$

Para determinar o nível máximo de sujeira aceito pelo sistema, antes de acionar a limpeza, foi realizado um estudo de custo da realização da limpeza (C_{clr}) e custo de perdas por sujeira do sistema, uma vez que esses custos são variáveis pelo tamanho do sistema, foi utilizado para esse estudo o exemplo de um sistema de seis painéis fotovoltaicos e a

tempo da limpeza realizada durante 1 hora (T_{limp}) de acionamento de uma bomba com a potência(P_{pump}) de 5.5kW utilizando a tarifa energética media de 0.3 Euros/kWh; e adicionando o custo de produtos de limpeza na água C_{prdt} .

$$C_{clr} = P_{pump} * Tarifa * T_{clr} + C_{prdt} \quad (3.8)$$

Foi determinado que o sistema de limpeza deve ser acionado quando estiver perdendo cerca de 6.7% eficiência ou $Ind_{eficiencia} = 93.3\%$ para esse exemplo.

3.5 Sistema de limpeza

Determinado o parâmetro de realização de limpeza é necessário definir a forma em que será realizada.

Foi escolhido a realização de uma limpeza sem profundidade com o intuito de prolongar ao máximo a necessidade da realização de limpeza manual no local, para simplificar o sistema de limpeza e ser competitivo ao sistema que atualmente há no mercado, robotizado e alto custo de implementação [29].

O sistema proposto é composto por uma bomba hidráulica de pressão, tubulação, bico de pressão com grande abertura angular, canaletas e armazenadores de água.

O princípio de funcionamento desta limpeza está em utilizar a pressão da água sobre os módulos para retirar acúmulo de detritos e poeira, utilizar a inclinação do sistema e a força gravitacional para realizar o enxágue das placas.

Determinando o índice de sujidade como parâmetro de acionamento da bomba hidráulica, foi utilizado uma saída digital do hardware, para acionar durante meia hora um rele que por sua vez aciona a partida da bomba hidráulica durante esse período, como representado na Figura 3.5.

Foi programado o controle para que a limpeza seja realizada apenas no período noturno, para que o tempo a posição de limpeza não influenciem na geração PV.

A fim de tornar o sistema um ciclo fechado para a água e evitar a necessidade de

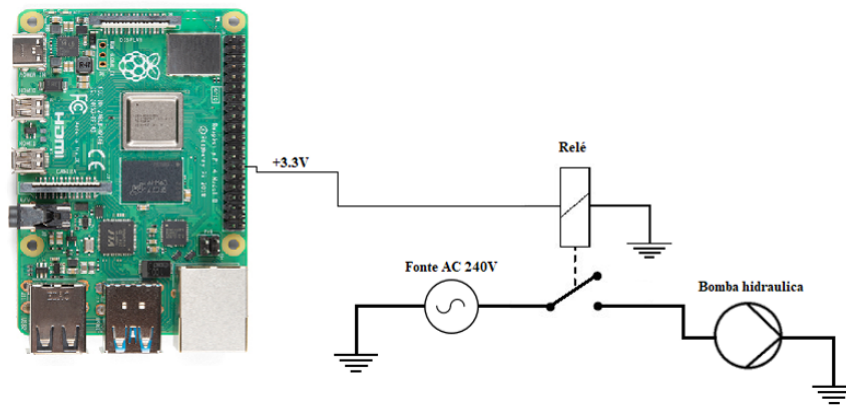


Figura 3.5: Diagrama acionamento da bomba de limpeza.

constante abastecimento dos reservatórios. Foi decidido pela reutilização da água da limpeza, retornada pelas canaletas para os reservatórios, decantando os detritos no fundo do armazém, uma vez que as limpezas ocorreram com um período considerável entre elas; possibilitando que o sistema seja aplicado em lugares off-grid.

Determinado o sistema de limpeza, foi proposto duas soluções que abordam todas as opções, apresentados nas Figuras 3.6 e 3.7.

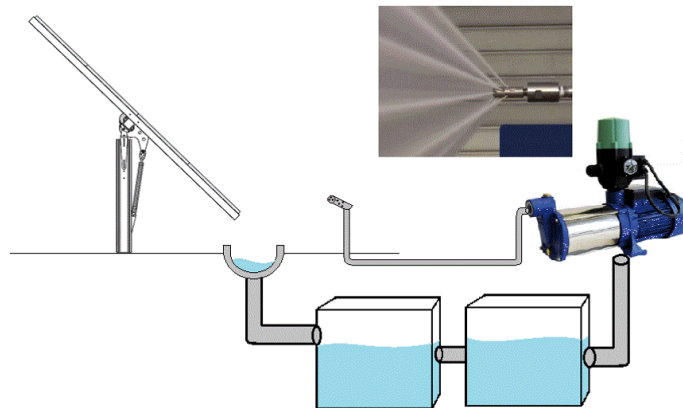


Figura 3.6: Diagrama sistema de limpeza 1.

O esquema 1 (Figura 3.6) apresenta o jato de água posicionado no solo direcionado para o módulo quando em sua posição inicial (45° em relação a haste de suporte), contudo este sistema necessita que seja realizado o estudo de perdas de água por respingo.

O esquema 2 (Figura 3.7) apresenta o jato de água posicionado na extremidade Oeste dos módulos, direcionado para as placas, estima-se que esta estratégia apresente menos perdas de água no sistema, porém implica num maior e mais dinâmico torque sobre sistema, podendo gerar dano a estrutura.

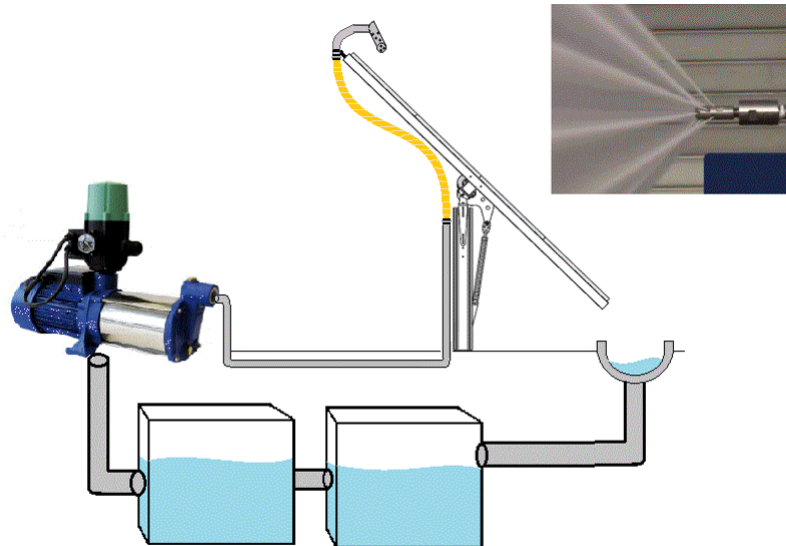


Figura 3.7: Diagrama sistema de limpeza 2.

Foi decidido pelo sistema de limpeza 1 (Figura 3.6), uma vez que nela não se faz necessário a realização do balanceamento de peso para que não haja binário desigual sobre o eixo do seguidor horizontal.

3.6 Desenvolvimento e embarque do código

Esta secção trata do desenvolvimento do código e de toda a eletrônica necessária na implementação.

Juntamente com o projeto da estrutura e método de funcionamento, foi desenvolvido o código fonte do controle do seguidor que foi embarcado no hardware, Raspberry Pi.

O código foi desenvolvido na linguagem Python, motivado pela simplicidade da linguagem e sua grande utilização no meio industrial. Buscando maior facilidade numa eventual

manutenção do código, o mesmo foi elaborado utilizando funções para cada evento separadamente.

As funções elaboradas foram:

- Sensor virtual

O sensor virtual, como já explicado na secção 3.2, foi elaborado a partir do banco de dados do posicionamento solar durante os dias.

Para evitar a necessidade do acesso a internet e evitar problemas de orientação por falha de conexão, foi transferido todos os dados solar para um documento no cartão de memória do hardware.

A função *sensor virtual* foi elaborada de forma a possibilitar o acesso do sistema ao banco de dados documentado por meio da leitura do tipo .xlsx utilizando os comandos do pacote *xlrd* retornando ao sistema a posição do sol naquele horário. Este *feedback* será utilizado na função *movimento*.

```
workbook = xlrd.open_workbook("C:/Users/Usuario/Desktop/ProgramaSeguidorSolar/calendariosolar.xlsx")
worksheet = workbook.sheet_by_index(mesatual - 1) # abrir planilha dentro deste excel
duracaodiaatual = worksheet.cell_value(diaatual + 1, 1)
duracaodiaatualminutos = worksheet.cell_value(diaatual + 1, 3)
nasceratualhora = int(worksheet.cell_value(diaatual + 1, 4))
nasceratualminuto = int(worksheet.cell_value(diaatual + 1, 5))
poratualhora = int(worksheet.cell_value(diaatual + 1, 7))
poratualminuto = int(worksheet.cell_value(diaatual + 1, 8))
return duracaodiaatual, duracaodiaatualminutos, nasceratualhora, nasceratualminuto, poratualhora, poratualminuto
```

Figura 3.8: Programação da leitura da planilha.

- Movimento

O movimento foi formulado de maneira a receber o valor da duração do dia solar, do sensor virtual, e definir a partir da relação 3.9 qual a velocidade de abertura do atuador linear.

$$Velocidade_{atuador} = \frac{Amplitudeseguidor}{DiaSolar(min.)} \quad (3.9)$$

Definindo qual a velocidade do atuador para aquele dia, o sistema gera o sinal PWM

para realizar o acionamento do atuador, afim de realizar o movimento contínuo enquanto for dia.

Quando o sistema detecta, por meio do tempo de movimentação, o final do dia solar, o mesmo retorna o atuador, e o seguidor, a posição inicial.

- Medir vento

A função responsável pela medição do vento foi criada com a característica de ser realizada a todo o tempo, uma vez que a integridade do sistema deve ser mantida constantemente.

A medição do vento, como já descrita anteriormente, utiliza o código padrão do fabricante convertido para Python, após a medição, o valor da velocidade do vento, m/s ou km/h, retorna para a função *segurança*.

- Sistema de segurança

O sistema de segurança foi elaborado de modo a ser acionado quando o vento, medido pela função anterior, ultrapassar a velocidade limite estipulada pelo programador.

Assim que acionado o modo de segurança, o código aciona o movimento e orienta-o para direcionar as placas na posição horizontal (posição em que estrutura sofre menos impacto); permanecendo nesta posição ate o cessar dos ventos fortes, como demonstrado na figura 3.9.

Após a verificação da finalização dos ventos nocivos, o seguidor retorna a sua posição normal: posição inicial, se for noite ou posição do trajeto, se ocorrer durante o dia.

```
if vento >= limitevento:
    while vento >= limitevento:
        posicao = amplitudeseguidor/2
        guardar_vento(vento, cont_vento)
        cont_vento = cont_vento +1
        print(f'velocidade do vento eh {vento} km/h por questao de segurança a posicao do seguidor esta em {posicao}.\n\nSEGURANCA')
        vento = medirvento()
    return vento, cont_vento
```

Figura 3.9: Programação do movimento de segurança.

- Cálculo da eficiência

A função de monitoramento de eficiência foi baseada no método matemático apresentado no tópico 3.4; todas as equações do método foram traduzidas para Python, figura 3.10.

Como já apresentado anteriormente, o sistema possui como entrada nas equações a irradiação solar presente sobre as placas, dado extraído com o auxílio do sensor e código fonte do mesmo fornecido pelo fabricante.

Com o valor de irradiação em mãos, torna-se possível o cálculo da corrente que deveria estar sendo gerada se o sistema estivesse totalmente limpo. Então a função *eficiencia* calcula o erro entre a corrente calculada e a corrente real medida pelo sensor amperímetro e estima o índice de sujidade.

```

deltaT = T-Tref
deltaI = (alfa*(S/Sref)*deltaT)+(((S/Sref)-1)*Isc)
deltaV = (-1*(beta * deltaT)) - (Rs * deltaI)
C2 = ((Vmp/Voc)-1)/(math.log(1-(Imp/Isc)))
C1 = (1 - (Imp / Isc)) * math.exp(-(Vmp / (C2 * Voc)))
correntePadrao = Isc*(1-C1*(math.exp((V-deltaV)/(C2*Voc))-1))+deltaI
correnteMedida = uniform(6.8,7.6) # pegar codigo leitor de corrente padrao!!!

|
eficiencia = 1 - ((correntePadrao-correnteMedida)/correntePadrao)
print(f'\nValor de corrente devia ser de {{correntePadrao}} e eh de {{correnteMedida}}')
print(f'\nValor de eficiencia eh de {{(eficiencia) * 100}}')
if eficiencia < 0.889:
    print(f'precisa LIMPAR')
    limpeza = 1
else:
    print(f'NAO precisa LIMPAR')
    limpeza = 0
return limpeza

```

Figura 3.10: Programação da modelagem e calculo da eficiência.

- Sistema de limpeza

Com o valor do índice de sujidade calculado pela função *eficiencia*, foi realizado de forma simples a comparação do valor com o limite calculado na secção 4.5.

Uma vez verificado a necessidade de realização da limpeza, o sistema verifica se o seguidor se encontra na posição inicial e se esta a noite; se estas duas condições forem verdadeiras então, por meio da porta logica digital, é acionado o rele que aciona a bomba d'água pelo período de tempo programado (15 minutos), como demonstra a figura 3.11.

```

limpar = eficiencia()

if limpezaRealizada == 0:
    if limpar == 1:
        icont = 0
        if horaatual == leituraXLS[2] and minutoatual <= leituraXLS[3] or horaatual < leituraXLS[2] or \
            horaatual == leituraXLS[4] and minutoatual >= leituraXLS[5] or horaatual > leituraXLS[4]:

            guardar_limpeza(cont_limpeza)
            cont_limpeza = cont_limpeza+1
            while icont < 3; # limpeza liga durante N= 5 Segundos
                #GPIO.output(12,1)
                vento = medirvento()
                if vento >= limitevento:
                    icont =0
                    seg = seguridad(vento,limitevento,amplitudeseguidor,cont_vento)
                    cont_vento = seg[1]
                    print(f'limpando... {3-icont} segundos')
                    icont = icont +1
                    sleep(1)

            limpezaRealizada = 1
        else:
            print('Esperar Anulterar para limpar')
    if limpezaRealizada == 1 and limpar == 1:
        print("limpeza ja foi realizada neste dia.\n SE DURANTE O DIA A EFICIENCIA NAO MELHORAR, FAVOR visitar o seguidor")
    return cont_limpeza, cont_vento, limpezaRealizada

```

Figura 3.11: Programação do acionamento de limpeza.

- Backup

Afim de facilitar o monitoramento e o controle do sistema, foi elaborado um subsistema para obtenção de dados de limpeza do sistema e dados de sistema de segurança.

O subsistema de backup funciona a partir da coleta de dados de data e hora, da realização dos eventos, tanto da limpeza quanto da segurança contra ventos fortes, e armazenando na memória do hardware em dois documentos denominados: *backup_limpeza.xls* e *backup_ventos.xls*, como observado na figura 3.12.

Facilitando assim tanto o acompanhamento do sistema, quanto uma possível futura interface gráfica para o sistema.

3.7 Estudo de caso/Implementação

Esta secção aborda a implementação do sistema apresentado, como forma de comprovar sua eficácia por meio de um estudo experimental. Entretanto, este projeto foi iniciado como parceria com uma empresa local (Bragança), que por motivos próprios, não deu continuidade a essa parceria, dificultando assim a implementação real do produto.

O estudo de caso realizado utilizou-se do software PVSyst [56] para implementação

```

def guardar_limpeza(cont):
    ocorrencia = cont
    style1 = xlwt.XFStyle()
    style1.num_format_str = "DD-MM-YY HH:MM:SS"
    workbook = xlrd.open_workbook("C:/Users/Usuario/Desktop/ProgramaSeguidorSolar/backup_LIMPEZA.xls")
    wb = copy(workbook)
    worksheet = wb.get_sheet(0)
    worksheet.write(ocorrencia, 0, ocorrencia)
    data_e_hora_atuais = datetime.now()
    worksheet.write(ocorrencia, 1, data_e_hora_atuais, style=_style1)
    wb.save('backup_LIMPEZA.xls')

def guardar_vento(vento, cont):
    ocorrencia = cont
    workbook = xlrd.open_workbook("C:/Users/Usuario/Desktop/ProgramaSeguidorSolar/backup_VENTO.xls")
    wb = copy(workbook)
    worksheet = wb.get_sheet(0)
    worksheet.write(ocorrencia, 0, ocorrencia)
    data_e_hora_atuais = datetime.now()
    style1 = xlwt.XFStyle()
    style1.num_format_str = "DD-MM-YY HH:MM:SS"
    worksheet.write(ocorrencia, 1, data_e_hora_atuais, style=_style1)
    worksheet.write(ocorrencia, 2, vento)
    wb.save('backup_VENTO.xls')

```

Figura 3.12: Programação do acionamento de limpeza.

de simulação do sistema, foi executado: simulação da eficiência de geração do seguidor horizontal na região pretendida e simulação do cálculo de previsão do índice de sujeidade, para comprovação do método de cálculo utilizado.

Para realização do estudo de caso, foi decidido que seria utilizado um conjunto de seis placas somando a potência de 1.5kW no total, com os painéis da marca Yingle Solar e do modelo YLM-VG 72 CELL [52].

No software de controle do seguidor, foi calibrado o sistema com as constantes das placas Yingle Solar, e foram utilizados os valores de irradiação oferecidos pelo PVSyst no sistema desenvolvido, afim de que fosse possível a comparação dos resultados da corrente gerada entre os dois software.

Foi realizado a comparação entre a geração de um ano do sistema fixo inclinado (inclinação de 34°), sistema em seguimento horizontal e também do sistema em seguimento polar, com mesma inclinação utilizada no sistema fixo, sugerida pelo software.

Utilizando o software de controle desenvolvido foi realizado: teste do sensor virtual elaborado, verificando a orientação das placas durante o dia e analisando se os horários de nascer e pôr do sol condiziam com a realidade.

Foi executado também teste virtual do sistema de segurança relacionado com a velocidade do vento, verificando, mesmo que virtualmente, se o sistema orientava os painéis

em 180° enquanto havia ventos fortes. Foi utilizado uma variável do tipo inteiro aleatória, que variava o valor de 0 a 100, representando as velocidades do vento, acionando a posição de segurança quando a velocidade limite fosse ultrapassada.

Capítulo 4

Análise de Resultados

Este capítulo é destinado a apresentação e discussão dos resultados obtidos a partir da execução do estudo de caso debatido no tópico 3.7.

Uma vez que foi impossibilitado a implementação do sistema foi realizado todos os testes utilizando softwares, foi realizado a simulação do sistema e foi obtido os conseguintes valores.

4.1 Teste de geração fotovoltaica

O teste de geração energética foi realizado a partir do uso do software PVSyst, onde foi simulado três sistemas de 1.5kW de potência, um sistema fixo inclinado com o melhor ângulo de geração, um sistema com seguidor polar com o mesmo ângulo que o sistema fixo e um modelo horizontal (modelo que é abordado no nosso sistema). Estes sistemas foram simulados num período de um ano, com valores de clima e tempo da localidade de Bragança.

Comparando os modelos de seguidores solares (fixo inclinado, polar e horizontal) por meio do software PVSyst, foi possível observar os seguintes resultados de geração anual:

Observando a Figura 4.1 é notável uma melhora no desempenho, do sistema horizontal sobre o modelo fixo inclinado, de 22.04%, contudo em se tratando do modelo polar comparado com o modelo fixo inclinado, obteve-se uma eficiência de geração de 32.32%.

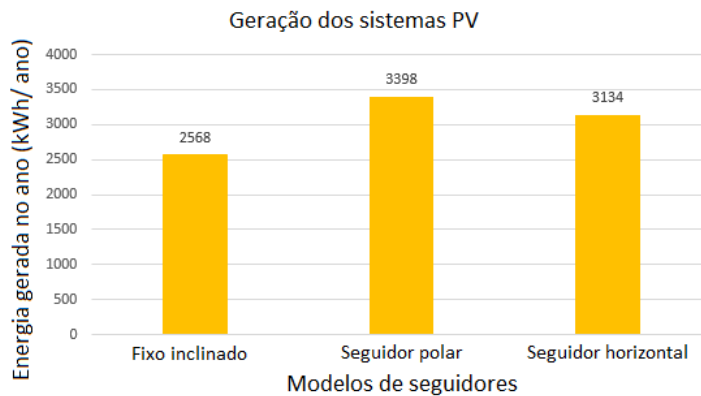


Figura 4.1: Geração dos sistemas FV com estrutura: fixa inclinado, polar e horizontal.

Demonstrando que o sistema horizontal, escolhido pela empresa como modelo a ser seguido, apresenta um melhor rendimento quando comparado a modelos sem seguimento, porém pela região estudada (Bragança/Portugal) apresentar uma grande latitude, foi obtido melhores resultados com o rastreador polar, por apresentar inclinação na sua estrutura. Os resultados se mantiveram próximos a faixa observada na literatura analisa no tópicos de seguidores,2.4.4.

4.2 Validação do método de monitoramento de índice de sujidade.

Uma vez modificado a modelagem, como já apresentado em 3.4, foi necessário realizar a validação da nova metodologia. Juntamente com o aluno Victor Henrique Pagani, foi realizado, como trabalho interno, a comparação do método desenvolvido com a simulação do software PVSyst, comparando a corrente gerada nos dois programas.

Ainda utilizando o PVSyst, porém agora juntamente com o monitoramento de sujidade desenvolvido em 3.4. Foi possível averiguar o funcionamento do mesmo utilizando o sistema de simulação de sujidade do software já consolidado. Foi comparado o valor de I_{out} em ambos os softwares para valores de índice de sujidade de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% para diferentes valores de irradiação solar e diferentes inclinações do seguidor, sendo

0° seguidor horizontal. Os valores obtidos de I_{out} foram:

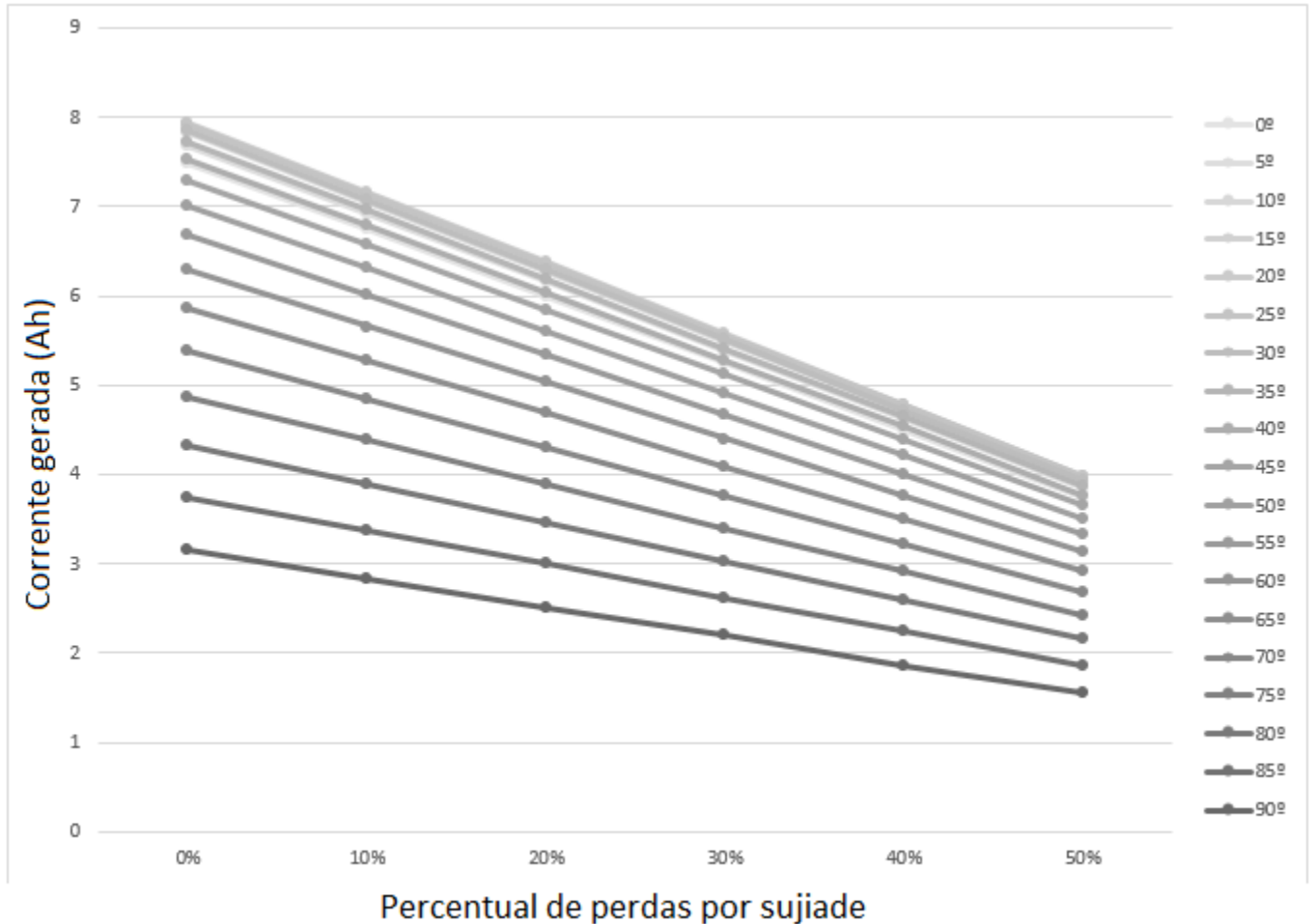


Figura 4.2: Valores simulados no software desenvolvido.

Pelos resultados obtidos observou que a modelagem segue um padrão linear entre irradiação e o declínio da corrente gerada, como ocorre na realidade. Foi então comparado os valores de 4.2 com os valores simulados no PVSyst e foi obtido os gráficos de comparação 4.3 e o de erro relativo 4.4 a seguir:

Pelos resultados obtidos quando comparado, a modelagem adaptada com apenas irradiação e corrente como entradas, com uma simulação com inúmeros outros fatores e com grande necessidade de processamento; foi obtido o valor médio de erro relativo de 2.04% no índice de sujidade; erro o qual é aceitável quando utilizado em aplicações, dando uma boa aproximação de qual a situação que o sistema se encontra em campo. Pelo sistema

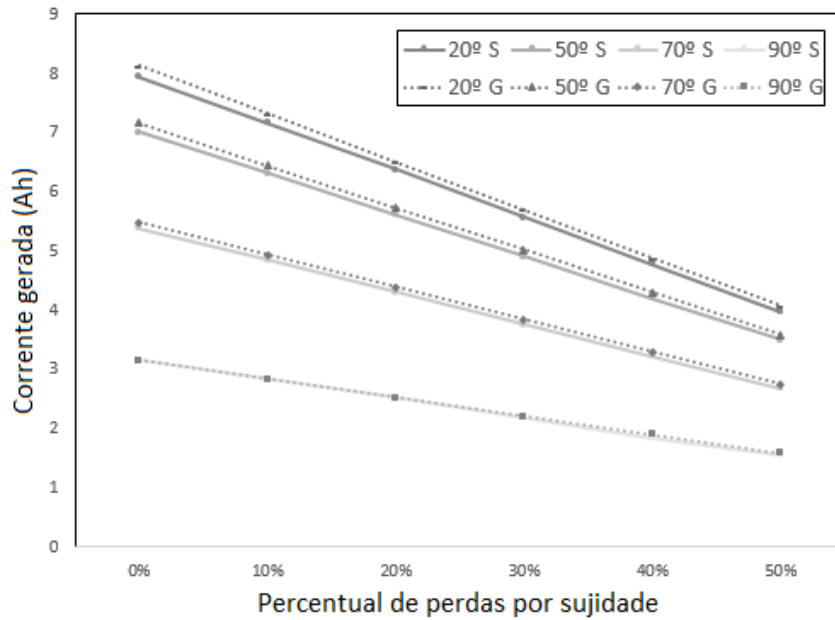


Figura 4.3: Comparação entre valores simulados no software desenvolvido(S) e no PVSystem(G).

desenvolvido ser um monitoramento e não uma estimativa, fatores chuva e vento não irão atrapalhar o desempenho do mesmo, uma vez que causaram impacto, contudo o sistema acusara quais são esses impactos no índice.

4.3 Teste de acionamento do sistema de limpeza

Aprovado o sistema de monitoramento da sujeidade, fez-se necessário realizar teste no acionamento da limpeza pela porta lógica, entretanto como não houve possibilidade de implementação, foi realizado teste utilizando uma variável inteira decrescente para realizar o percurso do sol e uma variável de valor real decrescente para simular a I_{out} com o acúmulo de sujeidade, exibido no apêndice A.

Realizado o teste de acionamento, foi possível verificar o acionamento da saída digital que ligaria o rele para acionar a bomba A.2, contudo pelo teste ter sido realizado durante o período vespertino, em que ainda havia iluminação solar, o próprio sistema identifica com base no horário do hardware e do banco de dados e agenda a limpeza para o período

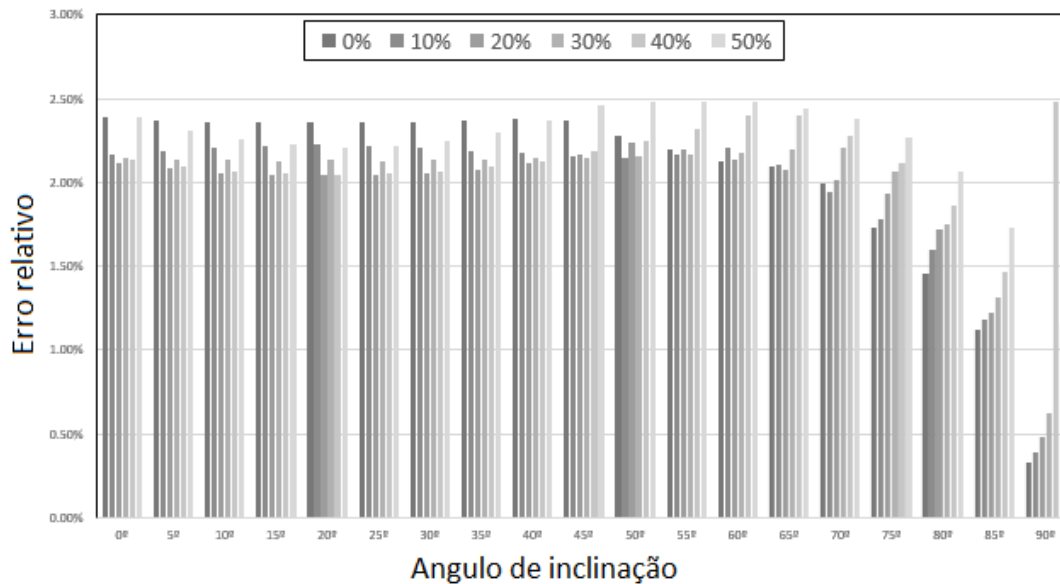


Figura 4.4: Erro relativo obtido entre a comparação.

noturno, também exibido no apêndice A.

Quando no período da noite, a limpeza é realizada com a duração de tempo que foi escolhido pelo técnico responsável A.1.

4.4 Teste sistema de segurança

Como observado também na Figura A.1, é possível observar o sistema de segurança contra vento simulado, uma vez que detectado alguma rajada de vento forte, o sistema é travado na posição horizontal (125°) até que seja detectado uma diminuição na velocidade do vento.

Com esses resultados foi possível identificar a boa funcionalidade da programação feita, assim como a eficácia do sistema de monitoramento de sujidade e acionamento de limpeza. Durante os testes também foi verificado a função de registro de dados nomeados "backup vento" e "backup limpeza" apresentados nos apêndices A. Dados os quais apresentam grande valor uma vez que possibilitam a utilização em uma futura aplicação de interface humana e até mesmo facilita o monitoramento do sistema como um todo.

4.5 Frequência ótima de limpeza

Este tópico aborda um breve estudo sobre a relação entre o custo da limpeza e as perdas devido à diminuição da geração elétrica, resultado de sujeira. Para determinar o ponto ideal, do índice de sujeira, para limpar o sistema fotovoltaico.

Após validar a metodologia utilizada para calcular o índice de sujeira, é necessário estimar um valor máximo aceitável desse índice antes de limpar os painéis. O valor recomendado, em percentual, desse índice está diretamente relacionado ao custo da limpeza e à quantidade de perdas na geração devido à diminuição da eficiência do sistema motivada pela camada de detritos.

A porcentagem ideal deve ser calculada para cada sistema implementado, variando seu valor dependendo do local de implementação, devido às tarifas pagas pela luz e o custo da limpeza, e do tamanho do sistema, devido aos diferentes tamanhos de perdas. Para este estudo, o sistema utilizado é o mesmo que na metodologia analisada, sistema fotovoltaico contendo seis módulos com potência total de 1,5kW.

Para calcular o custo da limpeza (C_{clr}), foi considerado: o custo da energia, de acordo com o tarifário médio do sistema elétrico de Portugal, por horas necessárias para limpar os seis painéis (T_{clr}), e o custo de produtos e consumíveis, estimado por Hammad, $C_{prdt} = 0,212$ US\$/kWp [43].

$$C_{clr} = Pot.bomb * Tarifa.media * T_{clr} + C_{prdt} \quad (4.1)$$

Para determinar as perdas devidas à acumulação de sujeira ($L_{sujeira}$) no módulo, foi calculado o valor médio da geração do sistema, multiplicado pela taxa de venda de kWh em Portugal, considerando uma perda percentual crescente, estabelecendo a soma das perdas em euros enquanto o sistema está sujo.

Cruzando as duas curvas, C_{clr} x Intervalo de limpeza e $L_{sujeira}$ x Intervalo de limpeza, foi possível estabelecer um valor de ponto ideal. Foi determinado que em 6,7 %, como visto na Figura 4.5, das perdas de eficiência que os painéis fotovoltaicos devem ser limpos.

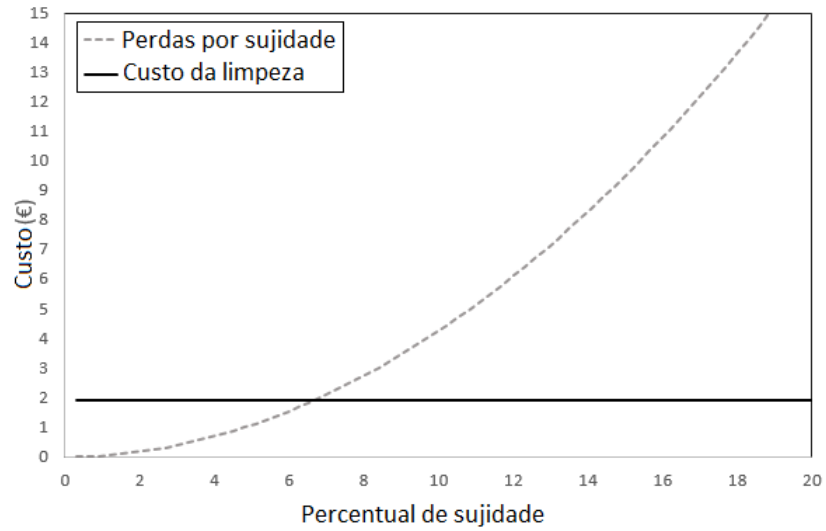


Figura 4.5: Ponto ótimo de frequência de limpeza do sistema neste estudo.

Para a aplicação deste estudo em outros sistemas, os parâmetros de custo de limpeza devem ser ajustados de acordo com a realidade do local do estudo; bem como os parâmetros tarifários e de geração do sistema.

Capítulo 5

Conclusões e trabalho futuros

Neste capítulo é apresentado as conclusões percebidas a partir dos resultados obtidos, assim como os trabalhos futuros proporcionados por esta tese.

Ao longo deste trabalho foi elaborado um controle de seguidor horizontal com limpeza automática dos painéis fotovoltaicos. Foi estudado uma forma de aumentar a robustez do sistema de forma a simplificar a sua implementação, minimizar os recursos utilizados no mesmo, e tentar diminuir ou até mesmo erradicar a necessidade de abastecimento de recursos para limpeza, tornando-o um sistema fechado.

5.1 Conclusões

Foi comprovado a validade de aplicar um seguidor na geração PV, demonstrando o grande aumento na geração utilizando este componente. Simulando o sistema do seguidor horizontal por meio do software PVSyst foi obtido uma melhora na geração elétrica de 22.04% em relação ao sistema fixo para a cidade de Bragança.

Foi possível determinar a robustez e simplicidade do sistema por; não necessitar de conexão a internet; não perder a orientação do sol em dias nublados e pela validade no sistema de segurança contra ventos.

Neste trabalho concluiu-se que o Raspberry Pi apresenta processamento suficiente para gerenciar de forma inteligente o controle do sistema, além do fato deste hardware ter o

sistema livre para programação e boa aceitação nas linguagens mais utilizadas.

Para aprimorar o sistema, foi desenvolvido uma forma de monitorizar o nível de sujidade dos módulos a partir da variação de uma modelagem já existente na literatura. Foi feito, testado e verificado por meio do software PVSyst, e foi obtido um erro relativo médio de 2.04% neste método; comprovando sua eficiência.

Observando a literatura foi verificado a não existência do método de limpeza utilizado, utilizando a água em sistema fechado, utilizando-se de jatos de água pressurizado para eliminação de detritos.

Por meio dos teste do software elaborado foi verificado a boa funcionalidade do sistema de movimentação, segurança contra ventos fortes e sistemas de armazenamentos de dados de segurança e limpeza.

Esta dissertação deu origem a um artigo, que abordou a metodologia e o sistema, desenvolvidos para monitoramento de sujidade nos painéis FV; o artigo foi elaborado em conjunto com o aluno Victor Paganni e o pesquisador Wellington Maidana, sob orientação do professor Paulo Leitão, o estudo foi submetido no congresso CONTROLO'2020.

5.2 Trabalhos futuros

Na realização deste trabalho foi possível observar diversos pontos que possibilitam trabalhos futuros, tais como:

- A implementação do sistema na prática, uma vez que esta etapa do projeto foi impossibilitada pela ausência do apoio da empresa a partir de um certo momento, se torna o principal ponto de trabalho futuro, centrado na verificação na prática dos resultados obtidos em simulação.
- A realização de testes para verificação da eficácia do método de limpeza utilizado, afim de estimar os valores de melhora após a realização da limpeza automática dos painéis.

- Realizar estudo sobre quais os produtos de limpeza mais eficazes para este método de limpeza baseado em jatos de água pressurizados.
- Realizar o estudo de frequência ótima de limpeza, com valores reais de custo e perdas, obtidos na implementação, para otimizar ainda mais a utilização da limpeza automatizada.
- Adaptar o sistema para o modelo de seguidor polar, uma vez que foi o seguidor de eixo único que apresentou melhor rendimento na região onde foi realizado o estudo de caso.

Bibliografia

- [1] O. W. in Data, *Global primary energy consumption*, <https://ourworldindata.org/grapher/global-primary-energy>, 2018.
- [2] N. R. NEWS, *Carbon dioxide levels hit record peak in May*, <https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2461/Carbon-dioxide-levels-hit-record-peak-in-May>, 2019.
- [3] B. Parida, S. Iniyar e R. Goic, “A review of solar photovoltaic technologies”, *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 15, n.º 3, pp. 1625–1636, 2011.
- [4] F. G. Gil, M. Martin, J. P. Vara, J. R. Calvo, L. Perlovsky, D. Dionysiou, L. Zadeh, M. Kostic, C. Gonzales-Concepcion, H. Jaberg et al., “A review of solar tracker patents in Spain”, *Proceedings of the Energy Problems and Environmental Engineering*, pp. 292–297, 2009.
- [5] R. J. M. Cortez et al., “Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica”, 2013.
- [6] P. A. Lynn, *Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics*. 2010.
- [7] B. P. for Outstanding merits in Photovoltaics, *Alexandre Edmond Becquerel*, <https://www.becquerel-prize.org/about-the-becquerel-prize/alexandre-edmond-becquerel/>.
- [8] M. Green, “Silicon photovoltaic modules: A brief history of the first 50 years”, *Progress in Photovoltaics Research and Applications* 13(5):447 - 455 DOI: 10.1002/pip.612, 2005.

- [9] Cresesb, *As energias solar e eólica no Brasil*, <https://http://cresesb.cepel.br/download/casasolar/casasolar2013.pdf>.
- [10] M. Abdelkader, A. Al-Salaymeh, Z. Al-Hamamre e F. Sharaf, “A comparative Analysis of the Performance of Monocrystalline and Multi-crystalline PV Cells in Semi Arid Climate Conditions: the Case of Jordan.”, *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*, vol. 4, n.º 5, 2010.
- [11] E. Safe, *Monocrystalline and polycrystalline solar panels: what you need to know*, <https://www.energysage.com/solar/101/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>.
- [12] G. M. Masters, *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons, 2013.
- [13] A. Hafez, A. Soliman, K. El-Metwally e I. Ismail, “Tilt and azimuth angles in solar energy applications—A review”, *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 77, pp. 147–168, 2017.
- [14] J. Wu, H. Hou e Y. Yang, “Annual economic performance of a solar-aided 600 MW coal-fired power generation system under different tracking modes, aperture areas, and storage capacities”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 104, pp. 319–332, 2016.
- [15] N. J. Parmar, A. N. Parmar e V. S. Gautam, “Passive solar tracking system”, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 5, n.º 1, pp. 138–145, 2015.
- [16] M. C. Brito, J. M. Pó, D. Pereira, F. Simões, R. Rodriguez e J. C. Amador, “Passive solar tracker based in the differential thermal expansion of vertical strips”, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 11, n.º 4, p. 043 701, 2019.
- [17] J. R. V. Lira, “Desenvolvimento de um rastreador solar do tipo polar com ajuste do ângulo de inclinação”, tese de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.

- [18] T. Huld, T. Cebecauer, M. Šúri e E. D. Dunlop, “Analysis of one-axis tracking strategies for PV systems in Europe”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 18, n.º 3, pp. 183–194, 2010.
- [19] R. Tolbert e J. Arnett, “Design, installation and performance of ARCO solar photovoltaic power plants”, em *Conf. Rec. IEEE Photovoltaic Spec. Conf.;(United States)*, Arco Solar Industries, Woodland Hills, California, 1984.
- [20] K. S. Karimov, M. Saqib, P. Akhter, M. Ahmed, J. Chattha e S. Yousafzai, “A simple photo-voltaic tracking system”, *Solar energy materials and solar cells*, vol. 87, n.º 1-4, pp. 49–59, 2005.
- [21] V. Poulek e M. Libra, “New solar tracker”, *Solar energy materials and solar cells*, vol. 51, n.º 2, pp. 113–120, 1998.
- [22] M. Veerachary e N. Yadaiah, “ANN based peak power tracking for PV supplied DC motors”, *Solar energy*, vol. 69, n.º 4, pp. 343–350, 2000.
- [23] X. Xiaoli e Q. Daoc, “Remote monitoring and control of photovoltaic system using wireless sensor network”, em *2011 International conference on electric information and control engineering*, IEEE, 2011, pp. 633–638.
- [24] C. Sungur, “Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey”, *Renewable energy*, vol. 34, n.º 4, pp. 1119–1125, 2009.
- [25] E. Ritchie, A. Argeseanu e K. Leban, “Robust solar position sensor for tracking systems”, em *WSEAS International Conference. Proceedings. Mathematics and Computers in Science and Engineering*, World Scientific, Engineering Academy e Society, 2009.
- [26] D. Industry, *Atuador linear / Eléctrico / com fusão de esfera para rastreadores solar*, https://www.directindustry.com/pt/prod/venture/product-39592-1675225.html#product-item_1675069, 2020.
- [27] A. L. López e V. M. Andreev, *Concentrator photovoltaics*. Springer, 2007, vol. 130.

- [28] sunrise-and-sunset, *Nascer e pôr do sol Braga, Portugal*, <https://www.sunrise-and-sunset.com/pt/sun/portugal/braga>, 2020.
- [29] A. K. Mondal e K. Bansal, “A brief history and future aspects in automatic cleaning systems for solar photovoltaic panels”, *Advanced Robotics*, vol. 29, n.º 8, pp. 515–524, 2015.
- [30] ver Calendário, *Calendário Solar Fevereiro 2019 (Portugal)*, <https://www.vercalendario.info/pt/sol/portugal-mes-fevereiro-2019.html>, 2016.
- [31] R. Grena, “An algorithm for the computation of the solar position”, *Solar Energy*, vol. 82, n.º 5, pp. 462–470, 2008.
- [32] S. A. Said, G. Hassan, H. M. Walwil e N. Al-Aqeeli, “The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 743–760, 2018.
- [33] R. J. M. Cortez et al., “Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica”, 2013.
- [34] S. Racharla e K. Rajan, “Solar tracking system – a review”, *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 10, n.º 2, pp. 72–81, 2017. DOI: 10.1080/19397038.2016.1267816. eprint: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/19397038.2016.1267816>. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19397038.2016.1267816>.
- [35] I. Scaletchi, I. Visa e R. Velicu, “Modeling wind action on solar tracking PV platforms”, *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Engineering Sciences. Series I*, vol. 3, p. 115, 2010.
- [36] P. magazine, *Long read: What broke at Oakey*, <https://www.pv-magazine-australia.com/2019/12/07/long-read-what-broke-at-oakey/>, 2019.
- [37] M. Clifford e D. Eastwood, “Design of a novel passive solar tracker”, *Solar Energy*, vol. 77, n.º 3, pp. 269–280, 2004.

- [38] C. M. Jubayer e H. Hangan, “Numerical simulation of wind effects on a stand-alone ground mounted photovoltaic (PV) system”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 134, pp. 56–64, 2014.
- [39] M. J. Adinoyi e S. A. Said, “Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules”, *Renewable energy*, vol. 60, pp. 633–636, 2013.
- [40] W. Javed, B. Guo e B. Figgis, “Modeling of photovoltaic soiling loss as a function of environmental variables”, *Solar Energy*, vol. 157, pp. 397–407, 2017.
- [41] N. Kishor, M. G. Villalva, S. R. Mohanty e E. Ruppert, “Modeling of PV module with consideration of environmental factors”, em *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, IEEE, 2010, pp. 1–5.
- [42] B. Laarabi, O. M. Tzuc, D. Dahlioui, A. Bassam, M. Flota-Bañuelos e A. Barhdadi, “Artificial neural network modeling and sensitivity analysis for soiling effects on photovoltaic panels in Morocco”, *Superlattices and Microstructures*, vol. 127, pp. 139–150, 2019.
- [43] B. Hammad, M. Al-Abed, A. Al-Ghandoor, A. Al-Sardeah e A. Al-Bashir, “Modeling and analysis of dust and temperature effects on photovoltaic systems’ performance and optimal cleaning frequency: Jordan case study”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2218–2234, 2018.
- [44] C.-K. Lin, C.-Y. Dai e J.-C. Wu, “Analysis of structural deformation and deformation-induced solar radiation misalignment in a tracking photovoltaic system”, *Renewable energy*, vol. 59, pp. 65–74, 2013.
- [45] M. Anderson, A. Grandy, J. Hastie, A. Swezey, R. Ranky, C. Mavroidis e Y. P. Markopoulos, “Robotic device for cleaning photovoltaic panel arrays”, em *Mobile Robotics: Solutions and Challenges*, World Scientific, 2010, pp. 367–377.
- [46] W. Panel, *Washpanel applications*, <http://www.washpanel.com/en/documenti.php>, 2018.

- [47] S. Al-Dhaheri, L. Lamont, L. El-Chaar e O. Al-Ameri, “Automated design for boosting offshore Photovoltaic (PV) performance”, em *IEEE PES T&D 2010*, IEEE, 2010, pp. 1–6.
- [48] M. N. Horenstein, M. K. Mazumder, R. C. Sumner, J. Stark, T. Abuhamed e R. Boxman, “Modeling of trajectories in an electrodynamic screen for obtaining maximum particle removal efficiency”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, n.º 2, pp. 707–713, 2013.
- [49] J. P. Bock, J. R. Robison, R. Sharma, J. Zhang e M. K. Mazumder, “An efficient power management approach for self-cleaning solar panels with integrated electrodynamic screens”, em *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics*, 2008, O2.
- [50] Heliotex, *Solar Panel Cleaning Services*, <https://www.solarpanelcleaningsystems.com/solar-panel-cleaning-services.html>, 2020.
- [51] Z. M. Salameh, B. S. Borowy e A. R. Amin, “Photovoltaic module-site matching based on the capacity factors”, *IEEE transactions on Energy conversion*, vol. 10, n.º 2, pp. 326–332, 1995.
- [52] Y. SOLAR, *Datasheet placas solares*, http://www.yinglisolar.com/static/assets/uploads/products/downloads/DS_YLM-VG.
- [53] H. S. Rauschenbach, *Solar cell array design handbook: the principles and technology of photovoltaic energy conversion*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [54] E. S. Kumar, B. Sarkar e D. Behera, “Soiling and dust impact on the efficiency and the maximum power point in the photovoltaic modules”, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 2, n.º 2, pp. 1–8, 2013.
- [55] A. K. Tripathi, M. Aruna e C. S. Murthy, “Output power loss of photovoltaic panel due to dust and temperature”, *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 7, n.º 1, pp. 439–442, 2017.
- [56] PVSyst, *PVSyst - Logiciel Photovoltaïque*, <https://www.pvsyst.com/>, 2020.

Apêndice A

Testes do Software

Texto/imagens produzidos por testes complementares do software desenvolvido.

```
Valor de corrente devia ser de 7.844043898354323 e eh de 6.876751352114668

Valor de eficiencia eh de 87.66844552664229
precisa LIMPAR
Limpando... 3 segundos
Limpando... 2 segundos
Limpando... 1 segundos
Limpeza ja foi realizada neste dia.
  SE DURANTE O DIA A EFICIENCIA NAO MELHORAR, FAVOR visitar o seguidor

Agora sao 18 horas e 32 minutos
velocidade do vento eh 121 km/h por questao de seguranca a posicao do seguidor esta em 125.0
  SEGURANCA

velocidade do vento eh 84 km/h, esta normal, atual limite eh de 120 km/h
posicao da placa esta em 0 graus
```

Figura A.1: Resultado do teste de limpeza. Autoria própria.

