



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE BALSAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DANILO ANTÔNIO ZANELLA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM RASTREADOR SOLAR PARA
PLACAS FOTOVOLTAICAS**

Balsas - MA

2021

DANILO ANTÔNIO ZANELLA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM RASTREADOR SOLAR PARA
PLACAS FOTOVOLTAICAS**

TCC apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Examinado por:

Prof. Dr. Raimundo Nonato Diniz Costa Filho
(Universidade Federal do Maranhão)

Prof. Dr. Pedro Bezerra Leite Neto
(Universidade Federal do Maranhão)

Prof. Me. Gustavo Araújo de Andrade
(Universidade Federal do Maranhão)

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Zanella, Danilo Antonio.

IMPLEMENTAÇÃO DE UM RASTREADOR SOLAR PARA PLACAS
FOTOVOLTAICAS / Danilo Antonio Zanella. - 2021.

37 f.

Orientador(a): Raimundo Nonato Diniz Costa Filho.

Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do
Maranhão, BALSAS-MA, 2021.

1. Controle. 2. Eficiência. 3. Placa solar. 4.
Rastreador solar. I. Costa Filho, Raimundo Nonato Diniz.
II. Título.

Dedico este trabalho a todos os que me ajudaram ao longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me proporcionar a possibilidade de cursar Engenharia Elétrica.

Agradeço aos meus pais, irmãos e amigos por me incentivarem e se interessarem no projeto ao longo deste período.

Agradeço ao Professor Raimundo Diniz, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e amizade.

Agradeço a Jonatas, Otavio e Irineu, por dedicarem seus tempos para me ajudarem a montar e emprestarem equipamentos e dispositivos para este projeto.

“Life is like riding a bicycle. To keep your
balance you must keep moving.”

(Albert Einstein)

RESUMO

Neste trabalho é empregado um rastreador solar para aumentar a eficiência energética de uma placa solar. O rastreador solar é construído e testado em um local aberto na cidade de Balsas. O rastreador construído tem somente um grau de liberdade e formado essencialmente pela estrutura mecânica, um motor, um Arduino e sensores. Comparações são realizadas através de gráficos entre a placa solar fixa e em movimento (com a ajuda do rastreador).

Palavras- chave: Rastreador solar; Eficiência; Placa solar; Controle.

ABSTRACT

In this work, a solar tracker is used to increase the energy efficiency of a solar panel. The solar tracker is built and tested in an open site in the city of Balsas. The built tracker has only one degree of freedom and is essentially formed by the mechanical structure, a motor, an Arduino and sensors. Comparisons are performed through graphics between the fixed and moving solar panel (with the help of the tracker).

Keywords: Solar tracker; Efficiency; Solar panel; Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Publicações sobre rastreadores solares de 2013 a 2022.

Figura 2: Modelos de Painéis Solares.

Figura 3: Inversor utilizado em sistemas fotovoltaicos.

Figura 4: Exemplo de string box.

Figura 5: Estrutura de sistema fotovoltaico

Figura 6: Exemplo de medidor bidirecional

Figura 7: Exemplo de bateria usada em sistemas fotovoltaicos

Figura 8: Exemplo de controlador de carga em sistemas fotovoltaicos.

Figura 9: Irradiação global com plano horizontal e inclinado em São Paulo.

Figura 10: Processo de seguimento do sol.

Figura 11: Comparação entre a energia gerada por um sistema sem rastreador e com rastreador.

Figura 12: Rastreador com um único eixo.

Figura 13: Rastreador solar com eixo duplo.

Figura 14: Sistema horizontal de coordenadas.

Figura 15: Fluxograma do algoritmo do Arduino.

Figura 16: Foto Arduino Mega.

Figura 17: Foto Raspberry Pi 3.

Figura 18: Foto Mini Painel Solar.

Figura 19: Foto Servo Motor MG955.

Figura 20: Esquema elétrico do divisor de Tensão.

Figura 21: Foto Sensor de Tensão com resistor de carga acoplado

Figura 22: Esquema com dimensões da base do protótipo.

Figura 23: Foto da base do protótipo pronta.

Figura 24: Foto da fonte de tensão de 5V.

Figura 25: Ilustração das conexões dos componentes eletrônicos.

Figura 26: Foto da configuração eletrônica montada.

Figura 27: Foto acoplamento servo motor e eixo.

Figura 28: Foto protótipo seguidor solar completo.

Figura 29: Foto do protótipo em funcionamento.

Figura 30: Ângulo de inclinação da base.

Figura 31: Foto do protótipo no nascer do sol.

Figura 32: Foto do protótipo no pôr do sol.

Figura 33: Comparação de curvas de tensão do protótipo.

Figura 34: Comparação das curvas de Irradiância do protótipo.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos rastreadores de eixo único e duplo.

Tabela 2: Método para encontrar ângulo de inclinação

Tabela 3: Comparação de tensão entre as configurações

Sumário

Capítulo 1	1
1.1. Introdução	1
1.2. Objetivos	1
1.2.1. Objetivo geral	1
1.2.2. Objetivos específicos	1
1.3. Justificativa	2
1.4. Metodologia	2
1.5. Referencial Teórico.....	2
1.6. Estrutura do Trabalho	4
Capítulo 2	5
2.1. Energia Solar	5
2.2. Sistema Fotovoltaico	6
2.3. Rastreadores Solares	11
2.4. Coordenadas Celestes.....	14
Capítulo 3	17
3.1. Metodologia	17
3.2. Descrição dos componentes para implementação	18
3.3. Funcionamento do protótipo	25
4.1. Resultados	27
Capítulo 5	32
5.1. Conclusões	32
5.2. Trabalhos Futuros.....	32
Referências	33

Capítulo 1

1.1. Introdução

Ao longo da história da humanidade, a utilização da energia elétrica tem sido cada vez mais presente e essencial para a vida de todos. Com os avanços tecnológicos e o aparecimento de novas necessidades, aliado ao crescimento da população mundial, atualmente um dos grandes desafios encontrados é a incerteza com relação à disponibilidade futura de energia para atender a demanda, principalmente devido ao abrangente uso de fontes não-renováveis e a exploração de alta escala dos recursos fornecidos pelo planeta Terra. Diante do exposto, novas fontes têm sido buscadas como forma não só de diversificar a matriz energética dos países, mas também desenvolver alternativas que busquem uma redução dos impactos, principalmente de ordem ambiental, causados pela geração, distribuição e consumo de energia (MAUAD; COSTA FERREIRA; GUIMARÃES TRINDADE, 2015).

Neste contexto, segundo o site Portal solar, até 2050, as fontes de energias renováveis como a solar, eólica, a geotérmica e a marítima, poderão abastecer em 80% a demanda mundial. O setor de energia limpa tem alto potencial de expansão com a gradual substituição dos mecanismos de emissão de energias poluentes, como carvão, petróleo e gás (Portal solar, 2019).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

- Implementar um rastreador para placas solares

1.2.2. Objetivos específicos

Visando atingir o objetivo principal, alguns objetivos específicos são requeridos, entre eles:

- Analisar o desempenho de uma placa solar com o rastreador solar.
- Testar o rastreador solar no Campus da UFMA em Balsas.
- Comparar a eficiência de uma placa solar com e sem o rastreador solar.

1.3. Justificativa

A energia solar é uma das mais abundantes e uma das mais limpas fontes de energia elétrica. Sendo assim, há um grande crescimento em tecnologias para este tipo de fonte de geração. Buscando aumentar a energia gerada por esse tipo de gerador, há várias técnicas utilizadas, sendo o rastreador solar uma delas. Tendo em vista que há um crescimento no número de instalações de geradores fotovoltaicos nos últimos anos, devido a incentivos, na cidade de Balsas – MA, pode-se contribuir com testes na área de geradores solares, especificamente em conjunto com rastreadores solares, avaliando se é vantajoso energeticamente seu uso em Balsas.

1.4. Metodologia

Inicialmente será realizada uma pesquisa bibliográfica para levantar o estado da arte na aplicação dos rastreadores na área de energia solar.

A seguir serão pesquisados e obtidos os materiais mais adequados para a construção do rastreador solar. Após a construção, será a etapa de teste. Os testes serão realizados nas dependências do Campus da UFMA na cidade de Balsas, especificamente no prédio onde se encontram os laboratórios do Curso de Engenharia Elétrica.

Por fim, uma comparação, em termos de eficiência e potência gerada, será implementada com o uso de uma placa solar fixa e com a técnica de rastreamento.

1.5. Referencial Teórico

A utilização de rastreadores solares em sistemas fotovoltaicos não é algo novo, porém é um assunto que é sempre atual e há ainda muitos desafios a serem superados. A Figura 1 apresenta um gráfico mostrando que há uma quantidade crescente de artigos publicados em congressos e revistas especializadas no assunto. O gráfico foi montado através da *Web Of Science* fazendo a pesquisa “Solar” e “Tracker” (em português, rastreador solar).

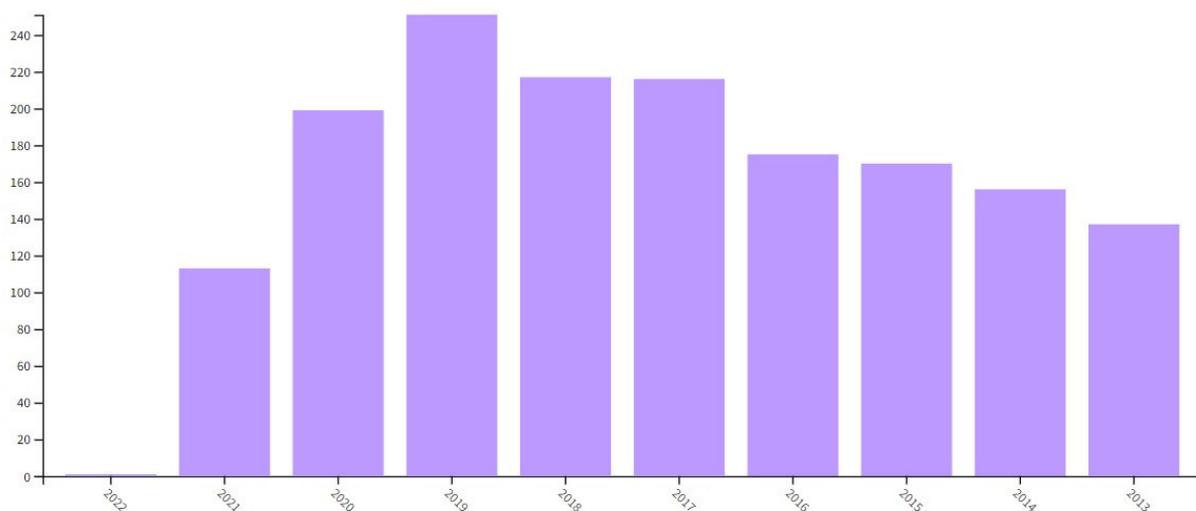


Figura 1: Publicações sobre rastreadores solares de 2013 a 2022.

Fonte: (Acessado em 08/09/2021- *Web of Science*).

Na literatura especializada, os sistemas solares equipados com rastreadores utilizam de várias técnicas em seu funcionamento. Em resumo, as técnicas empregadas podem ser agrupadas (REGES; MOREIRA; BEZERRA; ALEXANDRIA; REBOUÇAS FILHO, 2015):

- Lógica difusa: o rastreamento solar é implementado de maneira probabilística, trabalhando com valores aproximados ao invés de valores fixos e exatos retornando ao sistema solar as coordenadas aproximadas da localização do sol.
- Redes Neurais Artificiais (RNA): o rastreamento solar é baseado em valores históricos e utilizando um sistema inteligente cujo essencial está no treinamento das redes neurais artificiais. A camada de saída das RNA guia o posicionamento do rastreador solar.
- Fotodiodos (LDR): estes componentes realizam a verificação da intensidade de radiação eletromagnética do espectro visível que incide sobre ele e assim ativa o rastreamento do seguidor solar.
- Modelagem matemática: são realizados cálculos para a trajetória do sistema de rastreamento solar através de processos de otimização, onde são determinados os

ângulos de inclinação e a trajetória do ângulo de azimute, propondo assim a trajetória que o rastreador solar irá seguir.

- Processamento digital de imagens: neste método é realizada a aquisição de imagens do sol através de câmeras e lentes especiais, para posteriormente serem segmentadas e realizadas as localizações do sol em uma representação matricial.
- Sistema com piranômetro: sistema que age em conjunto com piranometro, um equipamento que permite mensurar com precisão a irradiação solar recebida pelas placas fotovoltaicas e enviar para um sistema de aquisição de dados para posicionamento do rastreador solar na direção de maior irradiação.
- Sistemas multiuso: este tipo de sistema é utilizado duas ou mais técnicas citadas anteriormente para melhorar a posição dos rastreadores solares.

1.6. Estrutura do Trabalho

O trabalho segue com o capítulo 2 que trata sobre a energia solar e os tipos de rastreadores. Seguidamente, o capítulo 3 aborda a metodologia utilizada na implementação do rastreador solar. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos em campo com e sem rastreador. Por fim, no capítulo 5 temos as conclusões e trabalhos futuros.

Capítulo 2

2.1. Energia Solar

O Sol, o astro no centro do sistema solar é uma fonte de energia virtualmente inesgotável presente para o planeta Terra. Através de sua energia são supridas as necessidades básicas para a vida no planeta, como iluminação, aquecimento e alimentação, esta através da fotossíntese, e o homem utilizou desta energia ao longo de sua história, e nos dias atuais há mais uma maneira de coletar e usar essa energia, através do efeito fotovoltaico, capaz de converter diretamente a energia solar (luz, fótons) em energia elétrica para suprir os equipamentos elétricos e eletrônicos utilizados para o desenvolvimento da humanidade.

A energia solar é transmitida para o planeta Terra por radiação eletromagnética, ao chegar ao referido planeta, a radiação solar sofre influência do ar atmosférico, das nuvens e da poluição antes de chegar ao solo e poder ser captada (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Devido a essas influências há uma dispersão e reflexão dos raios solares antes de chegar ao solo, à radiação que chega diretamente ao solo é chamada de radiação direta e a que chega indiretamente, depois de difratar e refletir na atmosfera, é chamada de radiação difusa, e a soma das duas é chamada de radiação global. Esta última é a que fornece energia para os sistemas fotovoltaicos.

Na literatura há uma grande confusão quanto a alguns termos utilizados para mensurar a energia proveniente do sol, são eles: radiação, irradiação e irradiância. A radiação é a emissão e propagação de energia através de ondas ou partículas. Enquanto que os termos irradiação e irradiância são mais comumente confundidos, sendo a irradiação, também chamada na literatura de insolação, é emissão de radiação em alguma superfície ou área por um determinado período de tempo, sua unidade de medida sendo Wh/m^2 , enquanto que a irradiância é potência em uma superfície ou área, sua unidade de medida sendo W/m^2 .

A energia solar faz parte das chamadas energias limpas e renováveis, ou seja, faz parte do grupo contendo energia hidroelétrica e eólica, no qual a geração da energia não produz poluente e ocasiona o mínimo de prejuízo à natureza. Segundo o ONS (Operador Nacional do Sistema), a energia solar compõe 2,7% (4.696 MW) do Sistema Interligado Nacional (SIN) no ano 2021, tendo previsão de aumento de participação para 3,9% (7.188 MW) no ano de 2025.

2.2. Sistema Fotovoltaico

O principal elemento para a geração fotovoltaica é a célula fotovoltaica. Entretanto, o aproveitamento em escala comercial desse tipo de energia se faz com o auxílio de outros componentes. Existem dois tipos básicos de sistemas fotovoltaicos: sistemas isolados (*off-grid*) e sistemas conectados à rede (*grid-tie*). A seguir, enumeramos os principais componentes de um sistema fotovoltaico e as referências utilizadas para construir as informações desta seção são (Alba energia, 2019; Portal solar, 2019; SELTEC ENERGIA, 2019?; NeoSolar, 2019?; Canal Solar, 2019):

Painel Solar:

Painel solar (também denominado de placa solar fotovoltaica ou ainda painel fotovoltaico) é o principal elemento para a geração da energia solar. O painel solar é uma placa que capta energia solar. Isto é, este componente é utilizado para converter a luz do sol em energia elétrica. O painel solar é composto por células solares fotovoltaicas e tem vida útil (garantia) de até 25 anos. A Figura 2 ilustra alguns modelos de painéis solares.

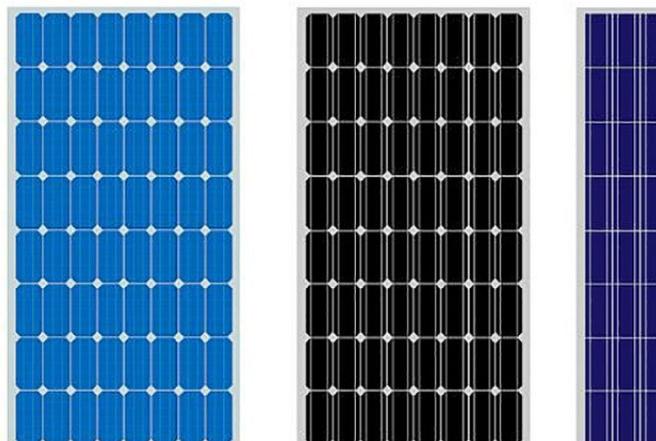


Figura 2: Modelos de Painéis Solares.

Fonte: Portal Solar, 2019.

Inversores:

A função básica de um inversor é transformar a corrente contínua para alternada, alternando o sentido da corrente contínua através de chaveamentos em um circuito ponte H, afim de gerar ondas quadradas que são suavizadas para ondas senoidais. O inversor também pode ter a função de monitoramento e no caso de sistemas conectados são responsáveis pelo sincronismo com a rede elétrica. A Figura 3 apresenta um típico inversor utilizado nos sistemas fotovoltaicos.



Figura 3: Inversor utilizado em sistemas fotovoltaicos.

Fonte: Google Imagens

String Box:

A *string box* é um equipamento responsável pela proteção do sistema de produção de energia e impedir o risco de propagação de acidentes elétricos, como curtos-circuitos e os surtos elétricos. A *string box* não consome energia, pois é composto pelo invólucro (caixa onde os dispositivos de proteção e as conexões elétrica estão alocadas), dispositivo seccionador (chave seccionadora), dispositivo de proteção contra sobretensão (DPS), dispositivo de proteção contra sobrecorrente (disjuntor ou fusível) e cabos. A Figura 4 apresenta um exemplo de *string box*.



Figura 4: Exemplo de *string box*.

Fonte: Canal Solar, 2019.

Estruturas:

Como o nome indica, a estrutura do sistema fotovoltaico é fundamental para o apoio e sustentação dos módulos. As estruturas são tipicamente feitas de aço inoxidável ou alumínio, materiais extremamente resistentes ao tempo. As estruturas podem ser montadas no telhado (tipo mais comum), em lajes (quando instalado em lajes, a placa tem a estrutura em forma de triângulo), no solo (grandes sistemas de geração de eletricidade) ou nos estacionamentos. A Figura 5 ilustra um exemplo de estrutura de sistemas fotovoltaicos.



Figura 5: Estrutura de sistema fotovoltaico.

Fonte: Canal Solar, 2019.

Medidor bidirecional:

O medidor bidirecional é um componente cuja função é mensurar a quantidade de energia consumida e, nas situações em que a sua produção de energia supera o seu consumo, também é o responsável por registrar a quantidade exportada pelo sistema, que é injetada na rede elétrica. Desta maneira, é possível acompanhar a geração de créditos na conta de energia elétrica, caso o consumo seja menor que a energia produzida em casos de rede on-grid. A Figura 6 apresenta um modelo de medidor bidirecional.



Figura 6: Exemplo de medidor bidirecional.

Fonte: Google Imagens.

Baterias:

As baterias armazenam a energia elétrica para que o sistema fotovoltaico possa ser utilizado nos períodos noturnos ou em dias nublados, sendo utilizadas em locais onde não é possível ter acesso a rede de energia, compondo assim um sistema off-grid. A Figura 7 apresenta um exemplo de uma bateria utilizada nos sistemas fotovoltaicos.



Figura 7: Exemplo de bateria usada em sistemas fotovoltaicos

Fonte: Google Imagens.

Controlador de carga:

A função do controlador de carga é evitar sobrecargas ou descargas exageradas na bateria, aumentando sua vida útil e desempenho, utilizada em sistemas off-grid. Além disso, os controladores de carga são capazes determinar quando a bateria está com estado de carga baixo. A Figura 8 apresenta um exemplo de controlador de carga.



Figura 8: Exemplo de controlador de carga em sistemas fotovoltaicos.

Fonte: Google Imagens.

2.3. Rastreadores Solares

O aproveitamento do recurso solar incidente por ser otimizado através da orientação dos painéis solares. O efeito da orientação (inclinação) é mais relevante quanto maior a latitude. O ângulo que usualmente é considerado como adequado é igual à latitude do local, orientado ao norte, no hemisfério sul, de forma que a superfície receptora esteja perpendicular aos raios solares na média anual, fazendo com que a variação da irradiação ao longo do ano seja atenuada, assim como maximizada a quantidade de energia incidente sobre tal superfície nesse período (ver Figura 9) (TOLMASQUIM, 2016).

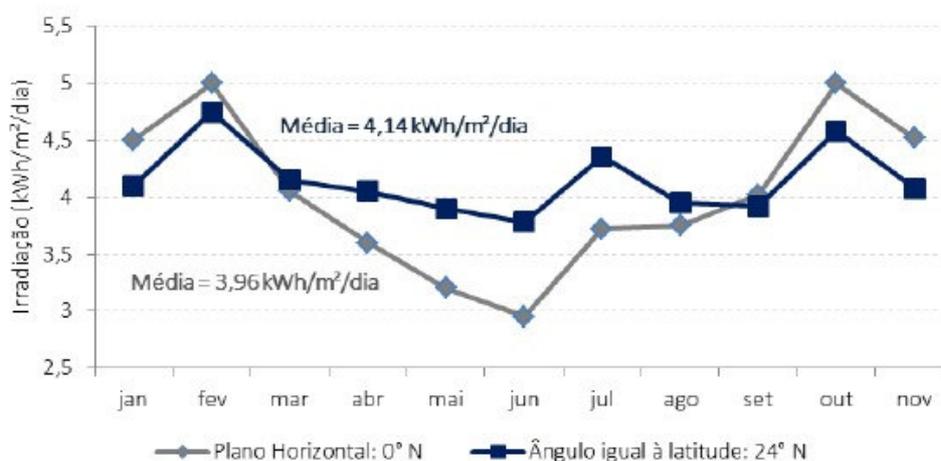


Figura 9: Irradiação global com plano horizontal e inclinado em São Paulo.

Fonte: (TOLMASQUIM, 2016).

Outra forma de maximizar a irradiação solar sobre uma superfície consiste em fazê-la seguir o movimento do Sol, através de mecanismos e estruturas de seguimento de um ou dois eixos. Alguns estudos indicam que o ganho na geração de energia pode variar entre 20% a 50% (TOLMASQUIM, 2016). Na literatura este método ou dispositivo denomina-se de rastreador ou seguidor solar (*solar tracker*). Segundo o site Portalsolar, um rastreador solar é um dispositivo que altera várias vezes a posição dos painéis fotovoltaicos durante o dia, seguindo o caminho do sol para aumentar a produção de energia solar do sistema fotovoltaico. Este processo é exibido na Figura 10 (Portal Solar, 2016).

Sistemas compostos por rastreadores solares geram mais energia do que os sistemas do tipo fixos. O uso dos rastreadores em usinas solares em alguns países está cada vez mais

comum, entretanto, como toda tecnologia, há vantagens e desvantagens. Dentre as principais vantagens, como citado anteriormente, é a geração de mais energia, conseqüentemente, também melhora a forma como a potência é entregue. A Figura 11 apresenta esta característica. A curva cinza (sem o rastreador) é menos “alongada” do que a curva em verde (com o rastreador). Como principal desvantagem pode-se citar a questão da manutenção e custo. Os sistemas com rastreadores são ligeiramente mais caros, devido ao uso de tecnologias mais complexas e peças móveis para seu funcionamento. Relativo à manutenção, o sistema com rastreador apresenta um maior cuidado comparado aos fixos. Entretanto, com os avanços na tecnologia e confiabilidade em eletrônica e mecânica, com o tempo a preocupação com manutenção será reduzida drasticamente para os sistemas com rastreadores (Portal Solar, 2016).

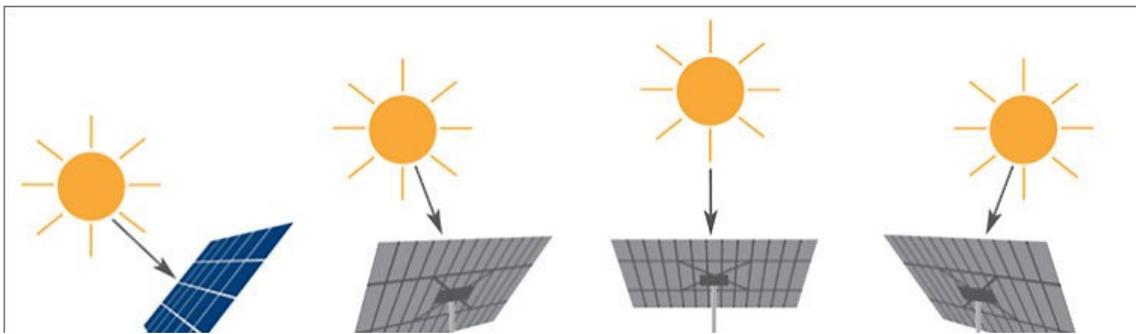


Figura 10: Processo de seguimento do sol.

Fonte: (Portal Solar, 2016).

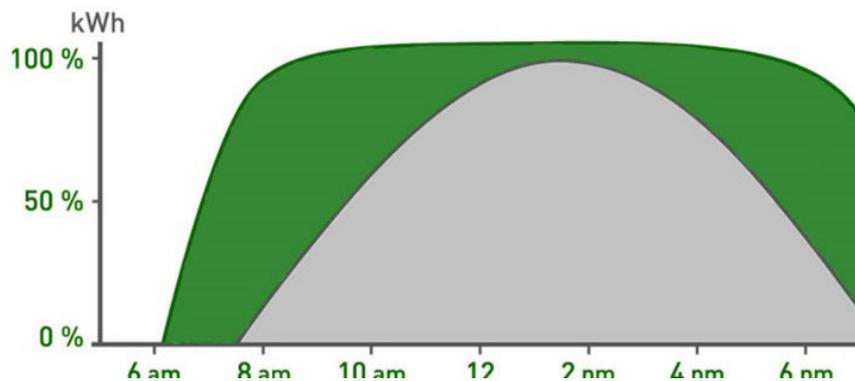


Figura 11: Comparação entre a energia gerada por um sistema sem rastreador e com rastreador.

Fonte: (Portal Solar, 2016).

Atualmente, podem ser encontrados no mercado dois tipos de rastreadores solares: os de eixo único e os de eixo duplo. Nos rastreadores de eixo único as placas fotovoltaicas estão montadas em um eixo livre de rotação, mais frequentemente alinhado ao Norte ou Sul dependendo da latitude do local. Este tipo de rastreador é menos complexo e eficiente comparados com os de eixo duplo. Em contrapartida, os rastreadores de eixo duplo têm dois eixos para rastrear o sol a partir da rotação de dois eixos de liberdade, que necessariamente são perpendiculares entre um eixo e o outro. Este tipo de rastreamento é mais preciso, pois há a garantia da incidência perpendicular os raios solares sobre as células fotovoltaicas. Em contrapartida, eles são mais caros e com mais peças móveis, além de consumir mais energia e necessitam de mais manutenção (Energês, 2021). Nas Figuras 12 e 13 apresentam o rastreador de um único eixo e de eixo duplo, respectivamente. A Tabela 1 apresenta uma comparação resumida entre as principais características dos rastreadores de um único eixo e de eixo duplo.

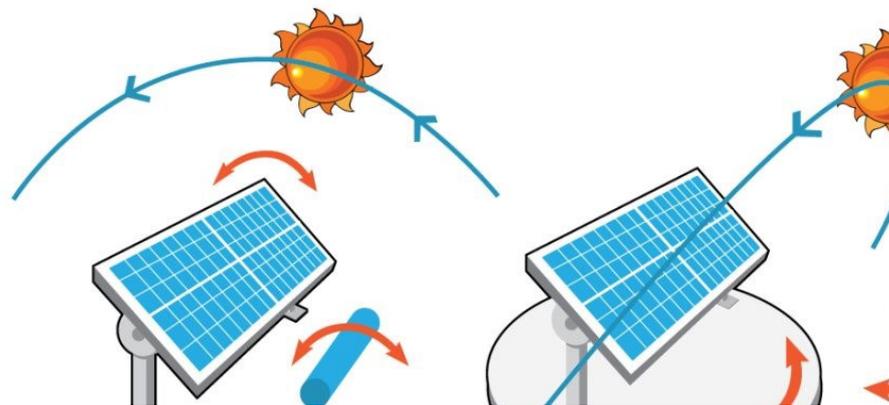


Figura 12: Rastreador com um único eixo.

Fonte: Google Imagens.

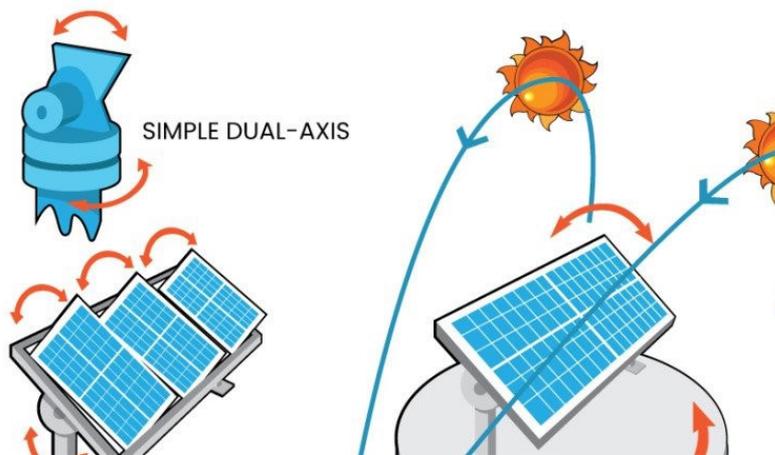


Figura 13: Rastreador solar com eixo duplo.

Fonte: Google Imagens.

Tabela 1: Características dos rastreadores de eixo único e duplo.

Fonte: REIS, 2017.

Eixo Único	Eixo Duplo
Seguem o sol de leste a oeste tendo como base um único ponto.	Seguem o sol de leste a oeste e de norte a sul tendo como base dois pontos.
Aumentam o rendimento do sistema até mais de 34%.	Aumentam o rendimento do sistema até mais de 37%.
Simple e com design eficaz.	Design complexo com mais motores e sensores.
Pouca manutenção.	Maior necessidade de manutenção.
Baixo custo comparando os de eixo duplo.	Custos mais elevados e mais tempo de instalação.
Poucas avarias no sistema.	Tem mais pontos de falhas.

2.4. Coordenadas Celestes

Em cada ponto do planeta Terra a radiação direta incide no solo com uma inclinação diferente. Essa inclinação varia ao longo dos dias e meses do ano, de acordo com a posição da Terra e do Sol no espaço (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Para sistemas fotovoltaicos isso

influencia na eficiência de captação de energia solar, sendo assim, é necessário saber a posição do Sol para obter a máxima captação de energia. Para saber a posição de um astro relativo à terra, é utilizado um sistema de coordenadas esféricas, o sistema horizontal de coordenadas, no qual é utilizado dois ângulos para definir cada posição na superfície da esfera.

As coordenadas locais são divididas em: azimute e altura e o plano fundamental utilizado é o plano do horizonte. O azimute (A) é um ângulo medido a partir do norte ou sul geográfico seguindo em sentido horário até o astro, o ângulo azimutal varia de 0° a 360° , enquanto a altura (h) é medida através do plano vertical do astro, o ângulo é contado a partir do horizonte até o astro e varia de -90° a 90° (BRANDÃO; GUEDES, 2011). A Figura 14 mostra a representação deste sistema de coordenadas.

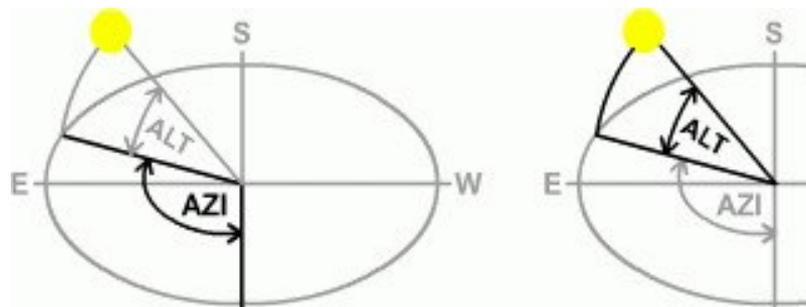


Figura 14: Sistema horizontal de coordenadas.

Fonte: Google Imagens

Para sistemas fotovoltaicos fixos, o melhor aproveitamento da energia solar é obtido quando a inclinação da superfície do painel solar é perpendicular ao sol. No entanto, o movimento do Sol se altera conforme a hora e dia do ano. Deste modo é necessário um método para escolher a inclinação para o melhor aproveitamento energético durante o ano. Um método utilizado para encontrar a inclinação é com base na latitude do local de instalação do sistema fotovoltaico, como o mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Método para encontrar ângulo de inclinação.

Fonte: Adaptado de VILLALVA; GAZOLI, 2012

Latitude geográfica do local	Ângulo de inclinação recomendado
0° a 10°	$\alpha = 10^\circ$
11° a 20°	$\alpha = \text{latitude}$
21° a 30°	$\alpha = \text{latitude} + 5^\circ$
31° a 40°	$\alpha = \text{latitude} + 10^\circ$
41° ou mais	$\alpha = \text{latitude} + 15^\circ$

Capítulo 3

3.1. Metodologia

Neste capítulo serão explicados os procedimentos na elaboração do projeto para o protótipo deste trabalho. Apresentando-se detalhes da construção dos algoritmos utilizados, assim como dos materiais a serem utilizados na montagem do protótipo.

Para construir a base do protótipo utilizou-se de hastes de ferro e rolamentos para a parte fixa, e um eixo de madeira para a parte móvel. Soldou-se as hastes de ferro, posteriormente acoplando-as ao eixo de madeira através dos rolamentos, permitindo a movimentação do eixo.

Para desenvolvimento do algoritmo foram feitos testes com os componentes elétricos e eletrônicos do protótipo, ajustando os parâmetros das variáveis conforme necessário. Para o teste da placa e do sensor de tensão foram feitos testes com algoritmo no Arduino e comparou-se a saída com as medições de um voltímetro, ajustando os parâmetros de resistências internas do sensor do algoritmo divisor de tensão. Para o teste do servo motor, utilizou-se da biblioteca “Servo.h” do Arduino para alterar o ângulo do mesmo, com base no tempo que o dispositivo está ligado, alterando o ângulo em um grau em um período de tempo dado pela divisão do total de horas de sol e cento e oitenta graus de abertura do servo, sendo utilizada uma fonte externa para alimentar o servo para fim de maior estabilidade. O fluxograma da Figura 15 exemplifica o algoritmo final do Arduino.

O algoritmo final do Arduino leva em conta os dois algoritmos anteriores, recebendo os dados do sensor e os enviando para o Raspberry Pi pela porta serial. No Raspberry Pi, o algoritmo recebe os dados da porta serial e os armazena num banco de dados juntamente com o horário recebido.

Os algoritmos usados podem ser encontrados nos Anexos I e II deste trabalho, sendo o primeiro relativo ao Arduino e o segundo relativo ao Raspberry Pi.

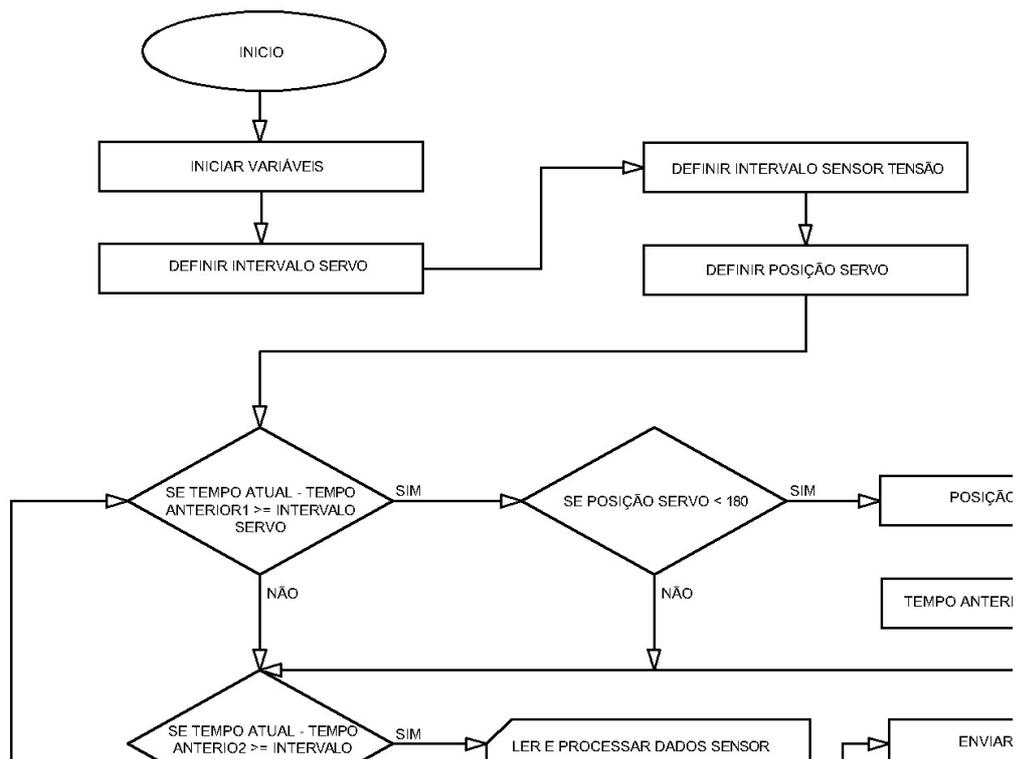


Figura 15: Fluxograma do algoritmo do Arduino.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2. Descrição dos componentes para implementação

Para a montagem do protótipo utilizou-se dos seguintes componentes:

- Arduino Mega;
- Raspberry Pi 3;
- Mini Painel Solar 2 W;
- Sensor de Tensão DC;
- Servo Motor MG955;
- Resistor de carga;
- Fonte de Tensão 5 V;
- Hastes de ferro;
- Eixo de madeira;
- Rolamentos.

O Arduino Mega mostrado na Figura 16 é o componente que atuará como o centro comando dos atuadores e sensores, capaz de enviar e receber dados pela porta serial (USB). O Raspberry Pi 3, mostrado na Figura 17, é um componente cuja função é armazenar os dados de tensão recebidos do Arduino.

Neste contexto, Arduino é um pequeno computador que pode ser programado para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele. O Arduino é o que chamamos de plataforma de computação física ou embarcada, ou seja, um sistema que pode interagir com seu ambiente por meio de hardware e software (MCROBERTS, 2011). Este dispositivo é muito utilizado em projetos de automação devido a sua simplicidade e facilidade de programação em C, facilitada pelo uso de bibliotecas, possuindo entradas e saídas analógicas e digitais, permitindo a conexão com diversos tipos de sensores e atuadores. O Raspberry Pi é um computador de uso geral, de baixo custo de produção voltado para educação, criado por Eben Upton, Rob Mullins, Jack Lang e Alan Mycroft. Este equipamento foi concebido para melhorar o ambiente de programação em escolas e universidades em 2006, devido ao aumento no preço dos computadores, tendo seus componentes internos mais parecidos com um celular que um computador. Possui portas com saídas e entradas digitais, como um Arduino, permitindo a utilização de sensores e atuadores digitais. Diferentemente do Arduino, o Raspberry não possui um microcontrolador, mas um sistema completo, utilizando sistema operacional Linux.

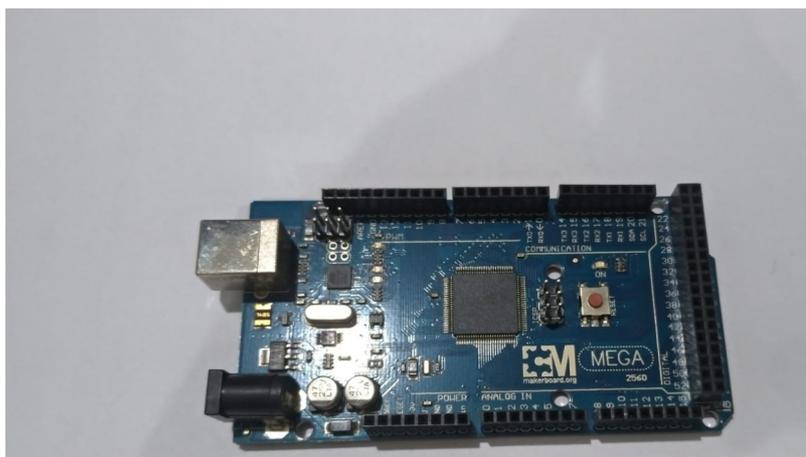


Figura 16: Foto Arduino Mega.

Fonte: Autor



Figura 17: Foto Raspberry Pi 3.

Fonte: Autor

O Mini Painel Solar de 2 W, mostrado na Figura 18, é do modelo PS350, com tensão nominal de 5,5 V, corrente nominal de 350 mA, dimensões de 150x85x3 mm e peso de 50g.

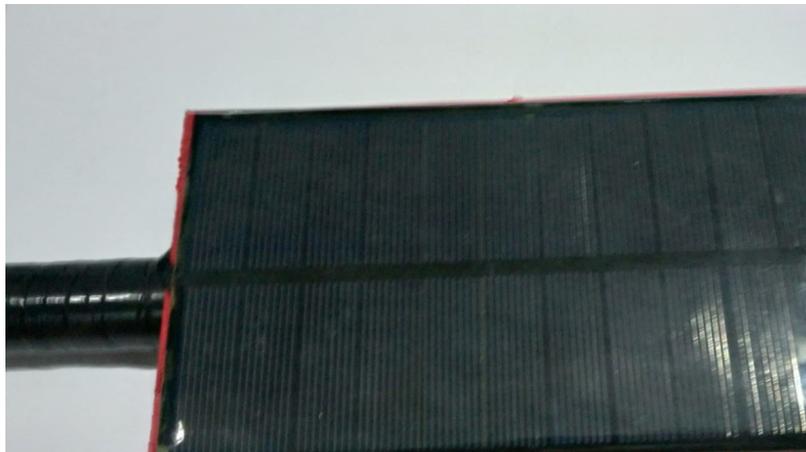


Figura 18: Foto Mini Painel Solar.

Fonte: Autor

O servo motor MG955 da TowerPro, mostrado na Figura 19, é um servo com engrenagens de metal, com alta velocidade de rotação e resposta de controle e abertura de 180°, com torque constante, pesando 55g, com dimensões de 40,7x19,7x42,9 mm, tensão de operação de 4,8 a 7,2 V, torque de 9,4kg/cm (4,8 V) e 11kg/cm (6 V) e faixa de operação de

corrente de 170 mA a 1200 mA. Foi escolhido por ser um servo resistente e forte, capaz de manter-se na mesma posição independentemente da ação de ventos sobre o protótipo.



Figura 19: Foto Servo Motor MG955.

Fonte: Autor.

O sensor de Tensão (Figura XX) é um componente analógico que funciona com base em um divisor de tensão, onde a tensão a ser medida na entrada é escalada para um valor de tensão que pode ser lido como um sinal pelo Arduino na saída do componente. A Figura 20 apresenta a representação esquemática do divisor de tensão. As resistências testadas para os resistores do divisor de tensão R1 e R2 são respectivamente 31,60 k Ω e 6,42 k Ω , enquanto que a resistência de carga R acoplada ao sensor de tensão é 1,5 k Ω , como é mostrado na Figura 21.

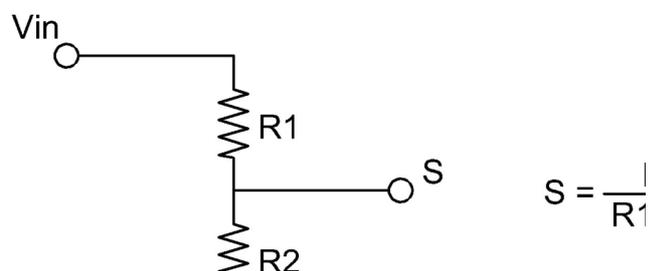


Figura 20: Esquema elétrico do divisor de Tensão.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 21: Foto Sensor de Tensão com resistor de carga acoplado

Fonte: Autor.

A base do protótipo conta com os componentes: hastes de metal, eixo de madeira e rolamentos. A Figura 22 mostra o esquema com dimensões da base e a Figura 23 mostra a base pronta.

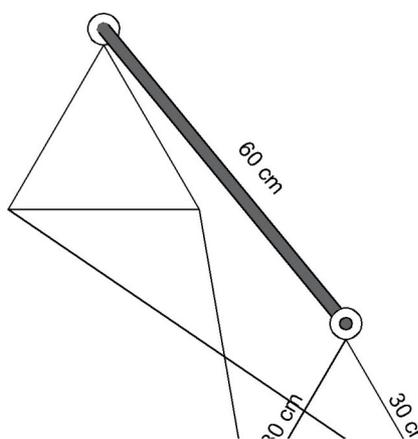


Figura 22: Esquema com dimensões da base do protótipo.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 23: Foto da base do protótipo pronta.

Fonte: Autor.

Como o Arduino e o Raspberry Pi 3 funcionam com tensão de 5 V, foi escolhida uma fonte de 5 V que alimenta o Raspberry Pi, que por sua vez alimenta pelo cabo serial o Arduino, enquanto que optou-se por alimentar o servo motor diretamente pela fonte de 5V, como mostrado na figura 24.

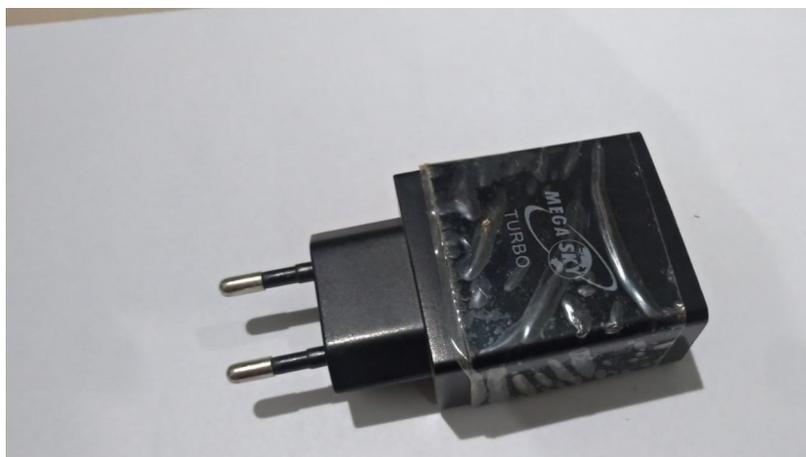


Figura 24: Foto da fonte de tensão de 5V.

Fonte: Autor.

A representação ilustrativa da parte eletrônica do protótipo é mostrada na da Figura 25, a configuração eletrônica montada é mostrada na Figura 26, o acoplamento entre o servo motor e o eixo da base é mostrado na Figura 27, e por fim o protótipo completo é mostrado na Figura 28.

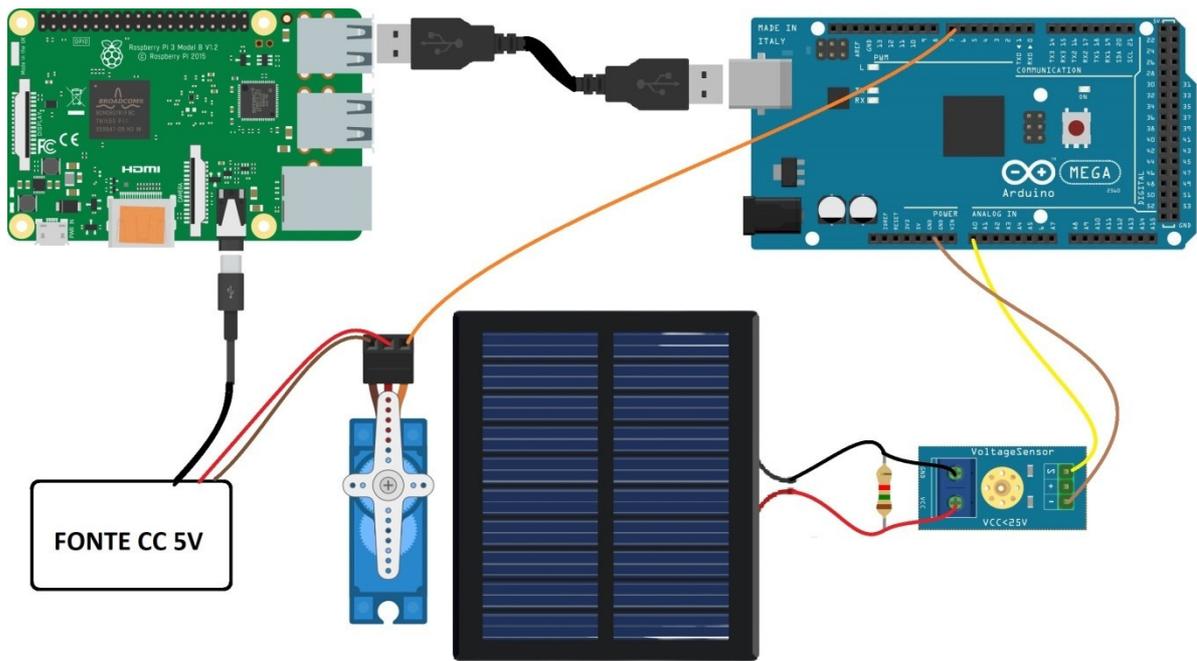


Figura 25: Ilustração das conexões dos componentes eletrônicos.

Fonte: Adaptado pelo autor.



Figura 26: Foto da configuração eletrônica montada.

Fonte: Autor.

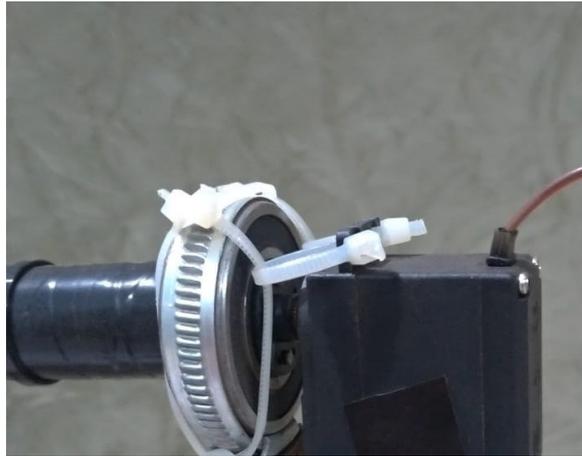


Figura 27: Foto acoplamento servo motor e eixo.

Fonte: Autor



Figura 28: Foto protótipo seguidor solar completo.

Fonte: Autor

3.3. Funcionamento do protótipo

O protótipo é um seguidor solar passivo, onde os dados de ângulo da placa são processados sem ajuda de sensores, Raspberry é alimentado por uma fonte 5V, o Arduino é alimentado pela conexão UBS do Raspberry e o Servo motor é alimentado por uma fonte externa de 5V.

O Arduino funciona como um controlador, comandando o atuador, neste caso o servo motor, e o sensor, neste caso o sensor de tensão DC. O controle do atuador se dá através de

algoritmo que calcula o ângulo de rotação, enviado pela porta PWM (*Pulse Width Modulation*) do Arduino, a cada intervalo de tempo, conforme o tempo passado desde a inicialização do dispositivo. Para a configuração móvel, inicia-se na posição 0° no nascer do Sol, e apontando para o mesmo, e termina na posição 180° durante o pôr do Sol, e o tempo para se rotacionar um grau é dado pela divisão do total de horas de sol do dia pelo grau de liberdade de movimentação do seguidor, neste caso, 180°. Para a configuração fixa, o protótipo o inicia e termina na posição de 90° graus, sendo perpendicular ao sol durante o período de maior incidência solar.

O sensor recebe do painel solar o sinal analógico de tensão e o converte em digital na porta de entrada analógica do Arduino, esta que possui uma resolução de ADC (*Analogic Digital Converter*) de 10 bits, sendo a resolução do sensor dada pela divisão da tensão de alimentação do Arduino por dois elevados à resolução ADC ($V_{\text{arduino}}/2^{10}$), para realizar a conversão é necessário reduzir o valor do sinal de entrada, utilizando-se um divisor de tensão. O sinal recebido através da porta é posteriormente tratado no Arduino reavendo o seu valor de tensão original. Esse valor de tensão é transmitido ao Raspberry Pi pela porta serial presente nos dois controladores, onde é armazenado em um banco de dados com a hora que o dado foi transmitido.

A comunicação entre o Raspberry Pi e o Arduino se dá pela porta serial de ambos os dispositivos, para isso deve haver sincronização entre as portas, ou seja, elas devem operar na mesma taxa de transferência de dados, no caso deste trabalho optou-se pela taxa de transferência de 9600 bps (bits por segundo), valor padrão do Arduino. O protótipo completo e em funcionamento é ilustrado na Figura 29.



Figura 29: Foto do protótipo em funcionamento.

Fonte: Autor.

Capítulo 4

4.1. Resultados

Inicialmente, o protótipo foi testado nas dependências na UFMA no Campus Balsas, especificamente no prédio dos laboratórios, cujas coordenadas são: latitude igual a -7.55603° e longitude correspondente à -46.08968° . Os testes foram realizados durante os dias 23 e 24 de agosto, mas devido à presença de nuvens, sombras causadas por árvores e lâmpadas dos postes que não apagavam durante o dia, os resultados encontrados não condiziam com a literatura, principalmente por haver sombras causadas por árvores durante as horas seguintes ao nascer do sol e anteriores ao por do sol, inviabilizando a utilização plena do rastreador solar em configuração móvel.

Tendo vista os problemas citados anteriormente, o protótipo foi testado na cidade de Balsas, em um local aberto (latitude e longitude iguais à -7.53811° e -46.06828° , respectivamente). Estes testes foram realizados durante os dias 27 e 28 de agosto, sendo o dia 27 na configuração móvel e 28 na configuração fixa, pois por limitações de orçamento, só foi disponibilizado um painel solar para a pesquisa. O ângulo de inclinação da placa em relação ao azimute 0° , ou seja, aponta-a para o norte geográfico, é de 10° , devido a latitude do local escolhido para os testes, conforme indicado na Tabela 2. A Figura 30 exemplifica o ângulo de inclinação da base.

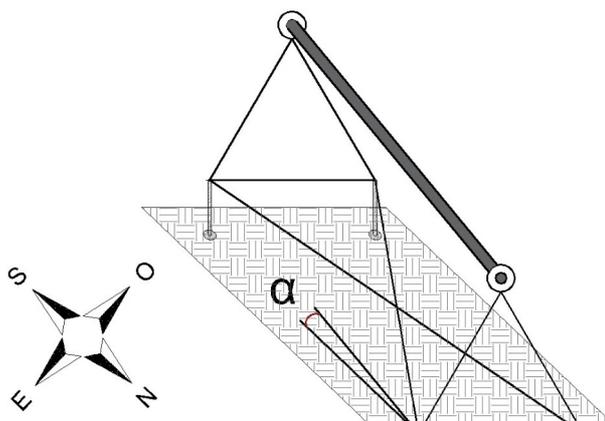


Figura 30: Ângulo de inclinação da base.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 31 mostra o protótipo atuando no dia 27 de agosto, na configuração móvel durante o nascer do sol e a Figura 32 mostra o protótipo no pôr do sol.



Figura 31: Foto do protótipo no nascer do sol.

Fonte: Autor.



Figura 32: Foto do protótipo no pôr do sol.

Fonte: Autor.

Com os dados preparados e tratados, foram feitas as curvas de tensão geradas pelo mini painel solar, mostradas na Figura 33. Nota-se que quando o painel está na configuração móvel, o mesmo alcança o valor de tensão máximo mais rapidamente formando uma curva degrau, enquanto que na configuração móvel, demora mais para chegar a seu valor de tensão máximo, formando uma curva exponencial para alcançar este valor.

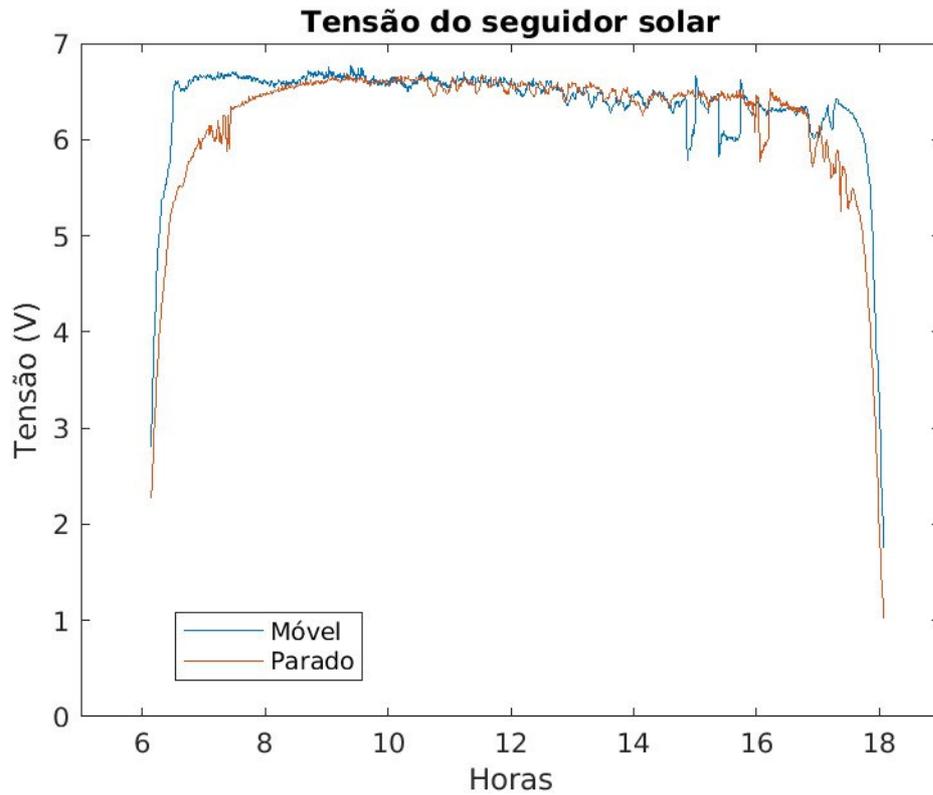


Figura 33: Comparação de curvas de tensão do protótipo.

Fonte: Autor.

Tabela 3: Comparação de tensão entre as configurações.

Fonte: Autor.

HORA	TENSÃO (V) DO PAINEL SOLAR	
	CONFIGURAÇÃO FIXA	CONFIGURAÇÃO MÓVEL
06:09	2,2795 V	2,8133 V
08:00	6,4655 V	6,5985 V
10:00	6,5788 V	6,5788 V
12:00	6,5898 V	6,6332 V
14:00	6,4099 V	6,4099 V
16:00	6,4056 V	6,3897 V
18:04	1,0141 V	1,7445 V

Na Figura 33 e na Tabela 3 há variações na tensão das duas configurações em horários esperados pra serem iguais devido a presença de nuvens e sombras, ou seja, ruído, no entanto é possível de se notar que suas curvas seguem o padrão degrau para o móvel e exponencial para o fixo, principalmente considerando-se a primeira parte do dia. Devido a essas irregularidades a média de tensão da configuração móvel foi de 6,38 V e a média de tensão da configuração fixa de 6,22 V.

A Figura 34 mostra as curvas de Irradiância das configurações móvel e fixa, nota-se que as diferenças são mais acentuadas, embora seguindo o mesmo padrão das curvas de tensão, isso dá pela potência ser obtida a partir do quadrado da tensão dividido pela carga, ou seja, $P=V^2/R$, sendo a carga uma resistência de 1,5 k Ω . Tendo que o mini painel possui área de 0,0128 m², a irradiância captada é dada pela potência dividida pela área do mini painel.

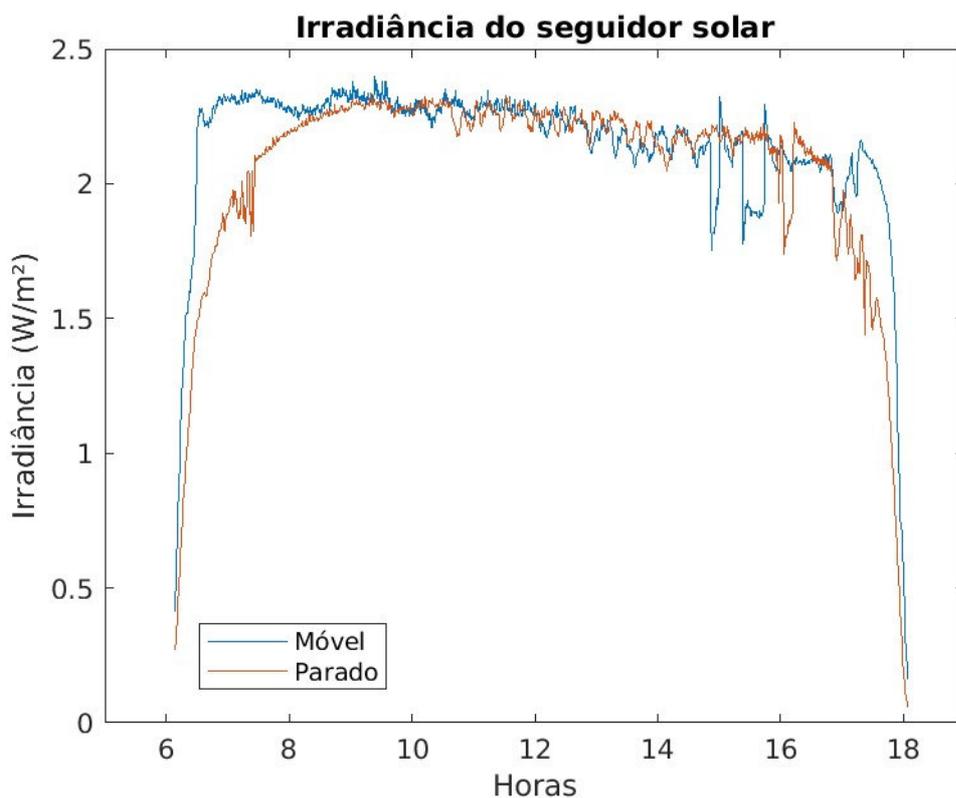


Figura 34: Comparação das curvas de Irradiância do protótipo.

Fonte: Autor.

A Figura 34 mostra o efeito mais acentuado do ruído nos dados captados, principalmente no final da tarde. Como dito anteriormente isso se dá pela amostragem em dias diferentes de cada uma das configurações.

Para achar o ganho fez-se a média das amostras da irradiância captada de cada configuração, e dividiu-se a média da amostra móvel pela fixa, e achou-se a porcentagem de ganho que a configuração móvel possui em relação a configuração fixa. A equação a seguir mostra como é encontrada o ganho:

$$Ganho = \frac{\sum IrradiânciaCaptadaMóvel}{\sum IrradiânciaCaptadaFixa} - 1$$

Deste modo, a relação de ganho entre a configuração móvel e fixa, dos dados da figura 34, encontrada foi de 5,24%, sendo um valor razoável, tendo em vista que há ruídos, além de que os dados foram captados em dias diferentes. Levando em consideração somente as amostras do período da manhã, o qual teve pouco ruído, o ganho é de 6,37%.

Capítulo 5

5.1. Conclusões

Neste trabalho foi apresentado o projeto e a prototipação de um seguidor solar de um eixo, um tipo de equipamento que busca aumentar a eficiência de geração de energia solar durante o dia, onde a placa solar busca sempre ficar perpendicular aos raios solares. Primeiramente foi projetado e construído o sistema mecânico do seguidor, e posteriormente projetou-se e programou-se seus sensores e atuadores, assim como a comunicação entre o microcontrolador Arduino e o computador Raspberry Pi 3.

Os resultados encontrados foram consistentes com os encontrados na literatura especializada, havendo um ganho de 5,28% em cima da potência em um dia utilizando o seguidor solar na configuração móvel. Nota-se que esse valor de ganho poderia ser ainda maior em condições adequadas de poucas nuvens, tendo em vista que havia mais nuvens no dia da realização dos testes com a configuração móvel, o que poderia aumentar ainda mais o ganho de potência comparado com a configuração fixa. Deve-se levar em consideração que o painel solar utilizado é um painel amador, com baixa precisão e não usado comercialmente.

Para a realização deste trabalho foi gasto R\$ 400,00 com servos motores, placas solares e sensores, o valor é alto pois houve avarias em alguns dos equipamentos, precisando serem trocados ou descartados. Tanto o microcontrolador Arduino quanto o computador Arduino não entraram no orçamento pois os memos já eram disponíveis para uso.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi concluído, pois foi montado um seguidor solar de um eixo e foram obtidos resultados satisfatórios quanto ao seu ganho em potência durante o dia.

5.2. Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, pretende-se fazer uma melhor interação entre as interfaces Arduino e Raspberry, afim de que se possa fazer o controle automaticamente, pegando os dados necessários da internet, assim como um método ativo para encontrar a posição de máxima eficiência mesmo em dias com nuvens.

Referências

Energias renováveis devem suprir 80% da demanda mundial até 2050. **Portal solar**, 2019. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/energias-renovaveis-devem-suprir-80-da-demanda-mundial-ate-2050.html>>. Acesso em: 21 ago. de 2021.

REGES, J. P.; MOREIRA, F. D. L.; BEZERRA, L. D. S.; ALEXANDRIA, A. R.; REBOUÇAS FILHO, P. P. **Thermographic image processing application in solar followers**, IEEE Latin America Transactions, vol. 13, no. 10, 2015.

MAUAD, F. F.; COSTA FERREIRA, L. C.; GUIMARÃES TRINDADE, T. C. **Energia Renovável no Brasil- Análise das principais fontes energéticas renováveis brasileiras**. EESC/USP, 2017.

CONHEÇA OS COMPONENTES DE UM SISTEMA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICO!. **Alba Energia**, 2019. Disponível em: <<https://albaenergia.com.br/conheca-os-componentes-de-um-sistema-de-energia-solar-fotovoltaico/>>. Acesso em: 07 de SET. de 2021.

Tipos de Painel Solar Fotovoltaico. **Portal Solar**, 2019?. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 07 de SET. de 2021.

Você conhece todos os componentes de um sistema fotovoltaico?. **SELTEC ENERGIA SOLAR**, 2019?. Disponível em: <<https://seltecbrasil.com.br/Voce-conhece-todos-os-componentes-de-um-sistema-fotovoltaico/48>>. Acesso em: 07 de SET. de 2021.

SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E SEUS COMPONENTES. **NeoSolar**, 2019?. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>>. Acesso em: 07 de SET. de 2021.

Entenda as especificações básicas dos componentes da string box. **Canal Solar**, 2019. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/entenda-as-especificacoes-basicas-string-box/>>. Acesso em: 07 de SET. de 2021.

TOLMASQUIM, M. T. et al. Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. EPE, Rio de Janeiro, 2016.

SEGUIDOR SOLAR – TRACKER: VANTAGENS E DESVANTAGENS PARTE 1. **Portal Solar**, 2016. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/seguidor-solar---tracker-vantagens-e-desvantagens-parte-1.html>>. Acesso em: 07 de SET. de 2021.

ENTENDA COMO FUNCIONA O SEGUIDOR SOLAR (TRACKER). **Energês**, 2021. Disponível em: <<https://energes.com.br/seguidor-solar-tracker/>>. Acesso em: 07 de SET. de 2021.

REIS, Pedro. Diferenças entre seguidores solares de eixo único e eixo duplo. **PortalEnergia**, 2017. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/diferencas-seguidores-solares-eixo-unico-eixo-duplo/>>. Acesso em: 07 de SET. de 2021.

VILLALVA, M. G; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

BRANDÃO, W. Q.; GUEDES, G . P. **Cálculo das coordenadas horizontais do Sol**. Repositório UEFS, [s. l.], 2011.

MCROBERTS, Michael. **Arduino básico**. 1. ed. São Paulo: Novatec Editora Ltda, 2011.

Anexo I: Código Arduino

```
#include <Servo.h>

#define SERVO 7 // Porta Digital 7 PWM

Servo s; // Variável Servo
long millisAnterior1 = 0;
long millisAnterior2 = 0;
long nsol = 6*60+9;
long psol = 18*60+4;
long intervalo2 = (((psol)-(nsol))*60000/180);
long intervalo1 = 0.5*60000;
float pos; // Posição Servo
int analogInput = A0;
float vout = 0.0;
float vin = 0.0;
float R1 = 31600.0;
float R2 = 6420.0;
int value = 0;
int i = 0.0;
float vmed = 0.0;

void setup(){
  pinMode(analogInput, INPUT);
  Serial.begin(9600);
  s.attach(SERVO);
  s.write(0);
  delay(2500);
  s.write(180);
  delay(2500);
  s.write(90);
  delay(2500);
  s.write(pos);
}

void loop(){

  long millisAtual = millis();

  if(millisAtual - millisAnterior1 >= intervalo1){
    lerTensao();
    millisAnterior1 = millisAtual;
  }
  if(millisAtual - millisAnterior2 >= intervalo2){
    if(pos <= 180){
      movServo();
    }
    pos = pos + 1;
    millisAnterior2 = millisAtual;
  }
}

void lerTensao(){
  vmed = 0.0;

  for (i=0; i<100; i++){
```

```
value = analogRead(analogInput);
vout = (value * 5) / 1024.0;
vin = vout / (R2/(R1+R2));
delay(5);
vmed=vmed+vin;
}
vmed=vmed/100;
Serial.print(pos);
Serial.print(" ");
Serial.println(vmed,5);
}

void movServo(){
s.write(pos);
}
```

Anexo II: Código Raspberry

```
import serial # importacao do modulo serial
import datetime

ser = serial.Serial('/dev/ttyACM0', 9600)

while True:

    dados = str(ser.readline().decode("utf-8"))
    dados = dados.replace('\n', '')
    print(dados)

    dhora = ('[{}#{}];\n'.format(dados, str(datetime.datetime.now())))

    try:
        arquivo = open('final.txt', 'a')
        arquivo.write(dhora)
    except:
        print("Ocorreu um erro na hora de montar o arquivo")
```