



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE SEGUIDOR SOLAR BIAXIAL

Gustavo de Faria Duarte

Projeto de Graduação apresentado ao Curso
de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica,
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
título de Engenheiro.

Orientador: Jorge Luiz do Nascimento

Rio de Janeiro
Março de 2019

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE SEGUIDOR SOLAR
BIAXIAL

Gustavo de Faria Duarte

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Examinado por:

Prof. Jorge Luiz do Nascimento, Dr.Eng.

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

Prof. Marcos Vicente de Brito Moreira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
MARÇO DE 2019

de Faria Duarte, Gustavo

Desenvolvimento de um protótipo de Seguidor Solar biaxial/Gustavo de Faria Duarte. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2019.

XII, 65 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Jorge Luiz do Nascimento

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Elétrica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 59 – 60.

1. Energia Solar. 2. Rastreador Solar. 3. Protótipo de rastreamento. I. do Nascimento, Jorge Luiz. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Elétrica. III. Título.

*"Hard work beats talent when
talent doesn't work hard."
- Tim Notke*

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço aos meus amados pais, Sheila e José Luiz, por todo o incentivo e apoio nessa caminhada. Independente da distância física que por alguns momentos nos separou, cada palavra, gesto e sorriso vindo de vocês me serviu de inspiração e me deu forças para levantar a cabeça e seguir em frente.

À minha querida irmã, Ana Carolina, por ser a melhor gêmea do mundo. Seu coração enorme e sua certeza nos caminhos que escolhera só me fizeram ter a convicção de que profissionalmente tomei a decisão certa.

Aos demais familiares que através de uma simples conversa ou por vezes de uma singela mensagem me estimularam em diversos momentos distintos. Em especial aos meus avós, primos, tios e à família Neves.

Ao meu bem, Mariana, por todo o companheirismo, atenção e carinho nos momentos em que mais precisei.

Ao meu orientador, Jorge Luiz do Nascimento, por me fazer acreditar em uma ideia e ter me dado a possibilidade de desenvolver um projeto prático que trouxesse tantos conhecimentos importantes.

Aos membros da banca, pelo apoio e por terem aceitado participar desta etapa tão importante da minha vida acadêmica.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), à University of Toledo (UT), à San Diego State University (SDSU) e a todos os professores que me tiveram como aluno por todos os ensinamentos e momentos inesquecíveis dos quais serei eternamente grato.

Aos colegas tanto da Turbo Power Systems quanto da Siglasul que me passaram diversas experiências para que eu pudesse iniciar minha trajetória profissional com aprendizados que levarei para o resto da vida.

Aos meus amigos de faculdade por todos os momentos bons e por outros um tanto quanto desafiadores que com muita dedicação e trabalho em equipe ultrapassamos juntos.

A todos os autores que de alguma forma foram citados neste trabalho, cujas publicações foram fundamentais para que eu pudesse dissertar sobre o tema.

Por fim, agradeço aos demais amigos por tudo aquilo que passamos juntos na espera dos próximos capítulos que estão por vir.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE SEGUIDOR SOLAR BIAXIAL

Gustavo de Faria Duarte

Março/2019

Orientador: Jorge Luiz do Nascimento

Curso: Engenharia Elétrica

Neste trabalho apresentam-se os resultados de um estudo realizado com o intuito de comparar dois métodos diferentes de rastreamento solar. Essa tecnologia é capaz de acompanhar o movimento do Sol ao longo do dia com o intuito de ordenar a superfície das placas fotovoltaicas com o ângulo de incidência da estrela central do Sistema Solar.

O projeto foi pautado na construção de um protótipo capaz de rastrear o movimento do Sol a partir de dois eixos de rotação ou com seus eixos fixos. Objetivou-se ter em mãos um sistema compacto e de boa confiabilidade que possibilitasse a análise da captação dos raios solares em cada uma das disposições do protótipo.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

DEVELOPMENT OF A 2-AXIS SOLAR TRACKER PROTOTYPE

Gustavo de Faria Duarte

March/2019

Advisor: Jorge Luiz do Nascimento

Course: Electrical Engineering

In this work is presented the results of a study carried out with the purpose of comparing two different methods of solar tracking. This technology is able to follow the movement of the Sun throughout the day in order to order the surface of the photovoltaic plates with the angle of incidence of the central star of the Solar System. The project was based on the construction of a prototype capable of tracking the movement of the Sun from two axes of rotation or with its fixed axes. The objective was to have in hand a compact and reliable system that would allow the analysis of the capture of the solar rays in each one of the prototype dispositions.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Justificativa	3
1.3 Organização do trabalho	4
2 Grandezas geográficas e variação solar	5
2.1 Pontos Cardeais	5
2.2 Coordenadas Geográficas	7
2.3 Potencial Solar	8
2.3.1 Energia Solar	8
2.3.2 Radiação Solar	9
2.3.3 Propagação dos raios solares	11
2.3.4 Geometria Solar	12
2.3.5 Geometria Astronômica	13
2.4 Efeito fotovoltaico	15
3 Rastreadores e medidores de radiação solar	16
3.1 Sistema fixo	16
3.2 Seguidor Solar	17
3.2.1 Vantagens e desvantagens	17
3.3 Heliotropismo nas plantas	19
3.3.1 Caso particular: o girassol	20
3.4 Instrumentos de medição	21
3.4.1 Piranômetro	21
3.4.2 Pireliômetro	22
3.4.3 Heliógrafo	23
3.4.4 Actinógrafo	24

4	Tecnologias existentes de Rastreamento Solar	25
4.1	Quanto ao número de eixos	25
4.1.1	Um eixo rotativo	25
4.1.2	Dois eixos rotativos	26
4.2	Quanto à estrutura	27
4.2.1	Estrutura com pedestal	27
4.2.2	Estrutura com plataforma giratória	28
4.2.3	Estrutura do tipo Roll-Tilt	29
4.3	Quanto ao tipo de Controle	30
4.3.1	Rastreadores Passivos	31
4.3.2	Rastreadores com controle Eletro-Óptico	32
4.3.3	Rastreadores microprocessados sem o uso de sensores	33
4.4	Quanto à estratégia de rastreamento	34
4.4.1	Rastreamento Polar	34
4.4.2	Rastreamento Azimutal	35
4.4.3	Rastreamento Horizontal	35
5	Estudo de caso: Desenvolvimento do protótipo de um Seguidor Solar	37
5.1	Fluxograma de funcionamento	38
5.2	Componentes do sistema	40
5.2.1	Sensor de Luminosidade LDR	41
5.2.2	Servo motor	43
5.2.3	Microcontrolador	45
5.3	Arquitetura e Montagem do projeto	47
5.4	Ensaio proposto e resultados	52
6	Conclusões	57
Referências Bibliográficas		59
A	Código do protótipo de 2 eixos	61

Listas de Figuras

2.1	Identificação dos 4 pontos cardeais. Fonte: Portal Blog de Geografia.	6
2.2	Rosa dos ventos. Fonte: Portal Wikipédia.	6
2.3	Latitude no planeta Terra. Fonte: Portal Todo Estudo.	7
2.4	Longitude no planeta Terra. Fonte: Portal Todo Estudo.	8
2.5	Movimento de rotação e translação da Terra. Fonte: Portal CRE-SESB da CEPEL.	10
2.6	Componentes da radiação solar. Fonte: ABRAVA.	11
2.7	Geometria Solar. Fonte: SunFields Europe.	12
2.8	Plano da Eclíptica. Fonte: Portal Wikipédia.	13
2.9	Representação de um Sistema eclíptico de coordenadas. Fonte: Portal Uranometria Nova.	14
3.1	Posição do seguidor solar em relação ao Sol. Fonte: Solar Motors.	17
3.2	Comparação de energia gerada: sistemas fixos vs. seguidor solar. Fonte: VALLDOREIX GREENPOWER.	18
3.3	Modelo de um Piranômetro. Fonte: NRGSystems.	22
3.4	Modelo de um Pireliômetro. Fonte: Portal DirectIndustry.	23
3.5	Ilustração de um heliógrafo mostrando em detalhe a fita queimada. Fonte: Portal Meteorópole.	23
3.6	Exemplo de um Actinógrafo. Fonte: NEAS/UFRB.	24
4.1	Rastreador Solar de um eixo. Fonte: LSF do IEE/USP.	26
4.2	Rastreador Solar de dois eixos. Fonte: LSF do IEE/USP.	27
4.3	Rastreador Solar com pedestal. Fonte: Portal SeguidorSolar.	28
4.4	Estrutura com plataforma giratória. Fonte: Portal Wikipédia.	29
4.5	Seguidor Solar com estrutura Roll-Tilt. Fonte: LSF do IEE/USP.	30
4.6	Rastreador solar do tipo passivo. Fonte: ZOMEWORKS CORPORATION.	31
4.7	Exemplo de Solar Tracker com controle Eletro-Óptico. Fonte: [15]	33
4.8	Exemplo de Solar Tracker com controle microprocessado. Fonte: Portal Instructables.	33

4.9	Solar Tracker do tipo Polar com 1 eixo. Fonte: University of Pune.	34
4.10	Solar Tracker do tipo Azimutal com 1 eixo. Fonte: LSF do IEE/USP.	35
4.11	Solar Tracker do tipo Horizontal. Fonte: University of Pune.	36
5.1	Exemplo da disposição física dos componentes. Fonte: Portal PARU Solar (adaptado).	38
5.2	Fluxograma do Rastreador Solar. Fonte: Elaboração própria.	39
5.3	Diagrama de blocos do projeto. Fonte: Elaboração própria.	40
5.4	Curva característica do LDR. Fonte: Portal PCexpertos (adaptado). .	41
5.5	Divisor de tensão do LDR. Fonte: [17] (adaptado).	42
5.6	Construção física e símbolo elétrico de um LDR. Fonte: [18].	43
5.7	Estrutura interna de um Servo motor. Fonte: Portal Cisisystems. . .	44
5.8	Diagrama de tempo do sinal MLP de um Servo Motor. Fonte: Portal PK2Lab (adaptado).	45
5.9	Pinagem da placa de Arduino UNO. Fonte: Portal Eletrônica para Artistas.	46
5.10	Simulação do projeto. Fonte: Elaboração própria.	47
5.11	Diagrama esquemático do projeto. Fonte: Elaboração própria.	48
5.12	Posicionamento dos sensores. Fonte: Elaboração própria.	49
5.13	Configuração final do protótipo de Rastreador Solar. Fonte: Elaboração própria.	50
5.14	Vista da estrutura metálica com os Servos e sensores. Fonte: Elaboração própria.	50
5.15	Vista da placa de Arduino UNO e protoboard. Fonte: Elaboração própria.	51
5.16	Vista do protótipo no momento do ensaio. Fonte: Elaboração própria. .	52
5.17	Demonstração da coleta de dados do ensaio. Fonte: Elaboração própria. .	53
5.18	Tensão do sensor LDR central obtida durante o ensaio. Fonte: Elaboração própria.	55

Lista de Tabelas

1.1	Consumo e número de consumidores de energia no Brasil. Fonte: Anuário Estatístico de 2018 da EPE.	1
4.1	Aspectos do tipo de Controle empregado em Rastreadores Solares. Fonte: Elaboração própria.	30
5.1	Valores obtidos no ensaio do dia 31/01/19. Fonte: Elaboração própria.	54
5.2	Valor médio de tensão para cada caso estudado. Fonte: Elaboração própria.	56

Capítulo 1

Introdução

No mundo moderno, existe uma tendência da sociedade em exigir o fornecimento de eletricidade de forma segura e eficiente. A energia elétrica tornou-se uma necessidade para diversos setores da economia como indústria, agricultura e serviços. Por ser tão importante nos dias de hoje, ela é responsável por proporcionar conforto, bem-estar, segurança e lazer para toda a população.

O aumento da demanda energética tem como uma de suas principais causas o crescimento populacional acelerado tanto no Brasil quanto no mundo. Em 2017, cerca de 1,8 milhões de novos consumidores começaram a fazer parte do sistema elétrico brasileiro em comparação ao ano anterior. O consumo de energia, durante esse mesmo período de tempo, teve um incremento de aproximadamente 5.300 GWh, vide Tabela 1.1. Além disso, o consumo que deveria ser feito de forma sustentável não está ocorrendo como deveria. Desse modo, recursos naturais básicos têm tendência, em futuro próximo, a não existir em uma escala tão abundante. O rápido crescimento demográfico, portanto, é um dos fatores chave para os sérios problemas ambientais enfrentados atualmente pelos cidadãos.

Tabela 1.1: Consumo e número de consumidores de energia no Brasil. Fonte: Anuário Estatístico de 2018 da EPE.

ANO	2013	2014	2015	2016	2017	Δ%(2017/2016)
CONSUMO (GWh)	463.142	474.823	465.708	461.780	467.161	1,2
CONSUMIDORES (mil)	74.814	77.171	79.107	80.624	82.464	2,3

Esses obstáculos ambientais possuem diversas causas. Uma delas, diz respeito à produção de energia por meio de alguns métodos responsáveis por poluir o ar e contribuir para alguns acontecimentos marcantes. Um exemplo claro é o aumento considerável do chamado efeito estufa – interferindo na temperatura terrestre de forma a intensificar o aquecimento global. Além do mais, incidentes conhecidos mundialmente que resultaram na proliferação de radioatividade ocorreram em Fukushima, no Japão, e em Chernobyl, na Rússia. Com isso, diversos países têm dado ênfase à criação de políticas públicas que incentivem o desenvolvimento de fontes energéticas alternativas. Estas são caracterizadas por possuírem uma capacidade de agressão ao meio ambiente menor do que as fontes ditas tradicionais. Nesse cenário, a produção de energia a partir dos raios solares, considerada como pura e inesgotável, cumpre seu papel como uma opção de produção energética viável e barata.

A energia solar, atualmente, é uma das fontes de energia com maior índice de crescimento em termos de geração energética no mundo. Hoje, o Brasil possui cerca de 2,3 GW de potência instalada de sistemas fotovoltaicos (incluindo tanto a geração centralizada através das usinas solares de grande porte quanto a micro e minigeração distribuída) [1] – fato este que nos coloca entre os 30 países que mais produzem energia proveniente do Sol [2]. Desse montante, aproximadamente metade teve sua instalação feita em 2018 [3]. Além disso, a ABSOLAR, associação brasileira de energia solar fotovoltaica, estabeleceu uma meta de pelo menos 30 GW de potência instalada da fonte solar fotovoltaica em 2030, no Brasil [4].

Por mais que a geração de energia solar esteja em constante crescimento, ainda existem barreiras importantes responsáveis por impedir uma maior difusão dessa tecnologia. Uma dessas diz respeito às baixas eficiências que as placas solares comercialmente disponíveis possuem, ou seja, a capacidade que um painel solar tem de converter a luz solar em eletricidade. Atualmente, as placas solares mais eficientes no mercado possuem um índice em torno de 22%. Desta forma, o rastreamento solar surge como uma opção por vezes até mais em conta de aumento da eficiência dos painéis.

Além do mais, as variações na intensidade da insolação durante o dia e a noite, o ângulo de inclinação do eixo da terra em relação ao sol, durante as diferentes estações do ano, e a distância entre a Terra e o Sol, fazem com que a energia elétrica média produzida por uma célula solar estática, durante o ano, seja de aproximadamente 20% da capacidade instalada [5]. Nesse cenário, a tecnologia de rastreamento é um aditivo importante aos sistemas de geração fotovoltaica, pois tem como uma de suas principais características assegurar a perpendicularidade entre a superfície receptora de energia e a radiação solar incidente.

1.1 Objetivos

Com base na argumentação exposta neste capítulo o objetivo principal levado em conta no desenvolvimento deste trabalho foi de projetar, construir e analisar um protótipo de Seguidor Solar de dois eixos compacto, de baixo custo e de boa confiabilidade. Além disso, outra finalidade do projeto foi de analisar e provar que o sistema com rastreamento consegue captar uma quantidade maior de raios solares do que o sistema com uma abordagem de eixo fixo.

1.2 Justificativa

O uso de um rastreador solar, além de conseguir aumentar a captação dos raios solares, necessita de menos espaço para gerar a mesma quantidade de energia do que os sistemas fixos. Ou seja, o sistema com seguidor precisa de menos painéis solares e, por consequência, menos espaço para sua instalação. Ademais, devido ao fato de o sistema ser capaz de seguir o movimento do Sol durante uma boa parte do dia, ele consegue entregar uma potência mais uniforme para a carga a qual ele está conectado.

Além das vantagens discriminadas sobre a tecnologia em questão, o estudante via na elaboração de um protótipo a oportunidade de aplicar diversos conhecimentos adquiridos durante o curso. Para tal, foi feita a escolha de desenvolver um projeto

prático que fosse ao encontro da tendência mundial de foco na construção de inovações que aumentem a produtividade das fontes renováveis de energia. Neste caso em particular, da fonte solar fotovoltaica.

1.3 Organização do trabalho

Este documento divide-se em 6 capítulos, incluindo esta introdução. O segundo capítulo apresenta uma revisão de conceitos relativos a grandezas geográficas e variação solar. O terceiro aborda um estudo sobre os principais sistemas de rastreamento existentes bem como uma explicação acerca dos instrumentos de medição solar no mercado. O quarto traz informações sobre as tecnologias existentes de rastreamento solar. O quinto detalha o processo de desenvolvimento do protótipo de Seguidor Solar além dos ensaios realizados. Por fim, o sexto e último capítulo aborda as conclusões do trabalho.

Capítulo 2

Grandezas geográficas e variação solar

2.1 Pontos Cardeais

Os quatro pontos cardeais (Norte, Sul, Leste e Oeste), ora também denominados pontos de referência, representam um dos principais instrumentos de localização e orientação geográfica. Foram muito utilizados nas grandes navegações, em importantes rotas comerciais e guerras ao redor do mundo.

Como pode ser observado na Figura 2.1, uma das mais conhecidas formas de identificação dos quatro pontos cardeais, em relação ao lugar que estamos, é através do Sol. O método é aplicado tendo em mente a direção da nascente do Sol, a Leste, e seu poente, a Oeste. No entanto, é bom frisar que o Sol não nasce e nem se põe sempre no mesmo ponto do horizonte. Isso ocorre em, aproximadamente, apenas dois dias do ano.

Além dos 4 pontos cardeais principais já citados, existem também os pontos colaterais (nordeste, sudeste, noroeste e sudoeste) e os subcolaterais (norte-nordeste, norte-noroeste, leste-nordeste, leste-sudeste, sul-sudeste, sul-sudoeste, oeste-sudoeste e oeste-noroeste). Esses outros conjuntos auxiliam na obtenção de uma medida com um índice ainda maior de exatidão em relação aos pontos no espaço.

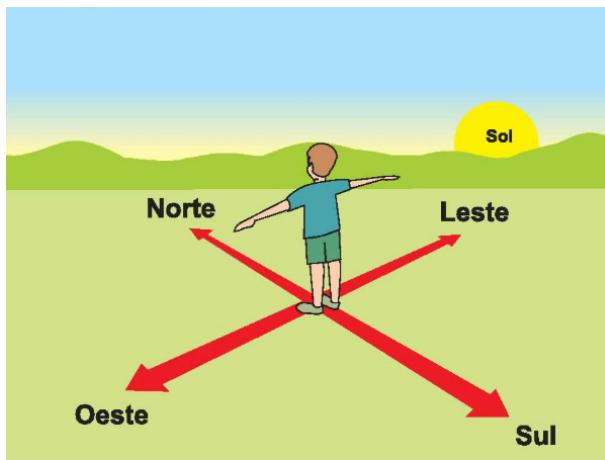


Figura 2.1: Identificação dos 4 pontos cardeais. Fonte: Portal Blog de Geografia.

Na Figura 2.2, encontra-se a imagem com todos os pontos cardeais e auxiliares – conhecida como rosa dos ventos.

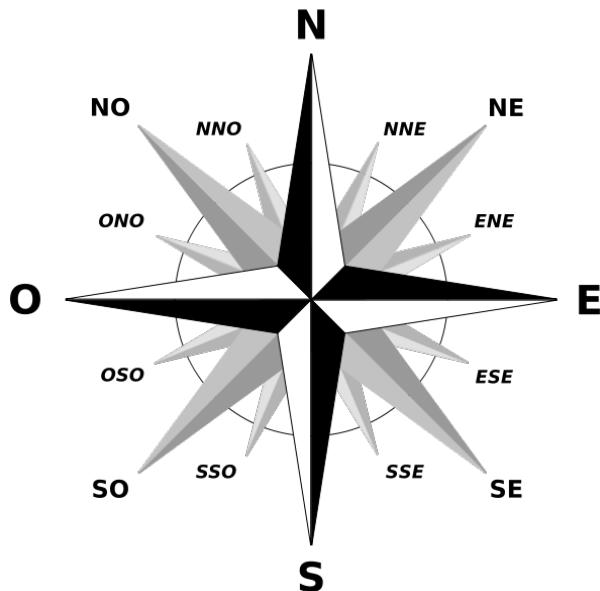


Figura 2.2: Rosa dos ventos. Fonte: Portal Wikipédia.

Por mais que a rosa dos ventos ainda tenha grande uso, principalmente nas navegações, o uso de coordenadas geográficas mostra-se muito mais eficaz quando a exatidão e a acurácia são exigidas quando queremos localizar algum lugar no espaço.

2.2 Coordenadas Geográficas

Com o objetivo de localizarmos todo e qualquer ponto existente na superfície terrestre utilizamos um conjunto de linhas imaginárias denominadas coordenadas geográficas. Estas, cortam o planeta Terra tanto no sentido horizontal – latitude – quanto no vertical – longitude. Suas distâncias são medidas em unidades como graus, minutos e segundos. Para fins de cálculo, um grau corresponde a 60 minutos e um minuto equivale a 60 segundos.

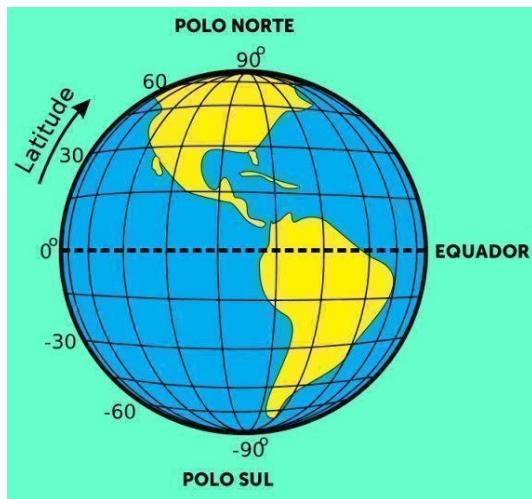


Figura 2.3: Latitude no planeta Terra. Fonte: Portal Todo Estudo.

A latitude diz respeito às linhas que tracejam o planeta Terra no sentido horizontal, também denominadas paralelas. Uma paralela específica, chamada Equador, localiza-se na latitude 0° . Sua localização é responsável por dividir o planeta em dois hemisférios principais: Norte e Sul. Conforme a Figura 2.3, as latitudes variam de 0° a 90° tanto ao Norte quanto ao Sul da linha do Equador. Essa grandeza também tem importante papel no estudo dos diversos tipos de clima existentes no planeta Terra visto que a incidência dos raios solares tende a ser maior nas regiões com menores latitudes.

Por outro lado, a longitude – também conhecida como meridiano – pode ser entendida como a coordenada geográfica responsável por cortar a Terra no sentido vertical. Suas variações vão de 0° a 180° tanto para o Leste quanto para o Oeste.

Para fins de normalização o Meridiano de Greenwich foi adotado internacionalmente como a longitude referente a 0° . A Figura 2.4 traz, a partir do meridiano central, a divisão do planeta Terra em sua parte Ocidental, a Oeste de Greenwich, e Oriental, a Leste da longitude 0° .

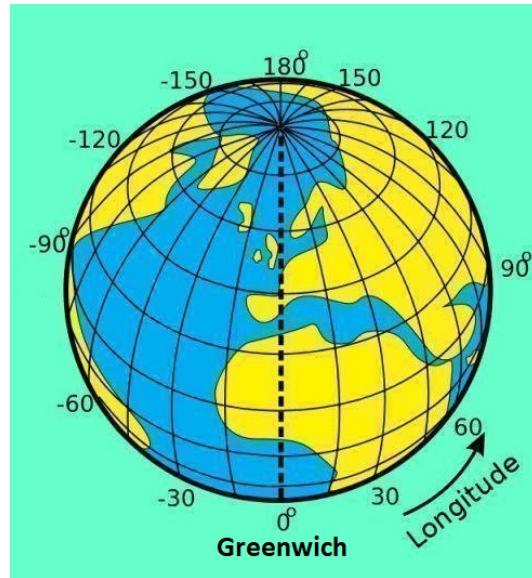


Figura 2.4: Longitude no planeta Terra. Fonte: Portal Todo Estudo.

2.3 Potencial Solar

2.3.1 Energia Solar

O sol é conhecido por ser a fonte de toda a vida na Terra, de acordo com o astrônomo Galileu Galilei [6]. A energia solar é uma fonte primária de energia e dá origem a muitas outras fontes existentes, ditas secundárias, como: hidráulica, eólica, biomassa e o próprio petróleo.

A energia proveniente do sol mostra-se como uma das fontes de geração de eletricidade mais promissoras para os próximos anos por possuir um potencial enorme de utilização através de sistemas para captação e conversão em outras formas de energia, como térmica e elétrica. Ela é abundante, não necessita de extração, não necessita de transporte para o local de geração e não emite gases poluentes ou ruí-

dos quando em operação [7]. Ademais, tem papel fundamental em determinados aspectos como no processo de fotossíntese, ao manter uma temperatura no planeta compatível com as formas de vida que aqui habitam.

A energia irradiada pelo Sol leva o nome de Radiação Solar e fornece anualmente cerca de $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia para a atmosfera terrestre. A emissão deste tipo de energia é feita tanto na forma de luz visível quanto na de espectro infravermelho e radiação ultravioleta.

2.3.2 Radiação Solar

A radiação solar é formada por uma mistura de três regiões de comprimentos de onda distintos, dos quais se destacam:

- A radiação visível (42%), fruto de tudo que a visão humana consegue perceber além de conter a energia adequada para ser aproveitada na fotossíntese;
- A radiação ultravioleta (9%), não perceptível pelas pessoas e, por ter um caráter energético associado, ser capaz de provocar a quebra de algumas ligações químicas;
- A radiação infravermelha (49%) que, além de também não ser visível a olho nu, possui uma capacidade de produzir pequenas agitações térmicas visto que tem pouca energia associada.

É importante citar alguns conceitos básicos para o entendimento do tema. O primeiro deles é a Irradiância (unidade $\frac{W}{m^2}$) que se caracteriza pela razão entre a densidade de potência radiante incidente e a superfície da área medida. Por outro lado, a Irradiação (unidade $\frac{Wh}{m^2}$) configura-se por ser a medida de uma determinada quantidade de irradiância em um dado intervalo de tempo.

A Terra recebe apenas uma parcela mínima e constante referente à quantidade de energia que o Sol irradia em todas as suas direções. Portanto, é válido dizer que, em média, a Terra adquire $1366\frac{W}{m^2}$ do Sol – valor este conhecido como constante

solar. O valor real recebido sofre influência de fatores astronômicos em razão da latitude, da época do ano e da transparência da atmosfera sobre o lugar.

O movimento de rotação, ou seja, o giro com duração aproximada de 24 horas que a Terra realiza em torno de si mesma, configura a sucessão de noites e dias em diferentes pontos da superfície terrestre. Na Figura 2.5, nota-se que essa forma de iluminação progressiva dos diversos pontos da superfície não é feita de forma homogênea durante o ano. Isto ocorre devido à inclinação de cerca de $23,45^{\circ}$ entre o eixo imaginário ao qual a Terra rotaciona em relação ao plano da órbita terrestre. Além da inclinação existente, o movimento de translação realizado pelo globo terrestre ao redor do Sol origina as estações do ano (Verão, Inverno, Outono e Primavera).

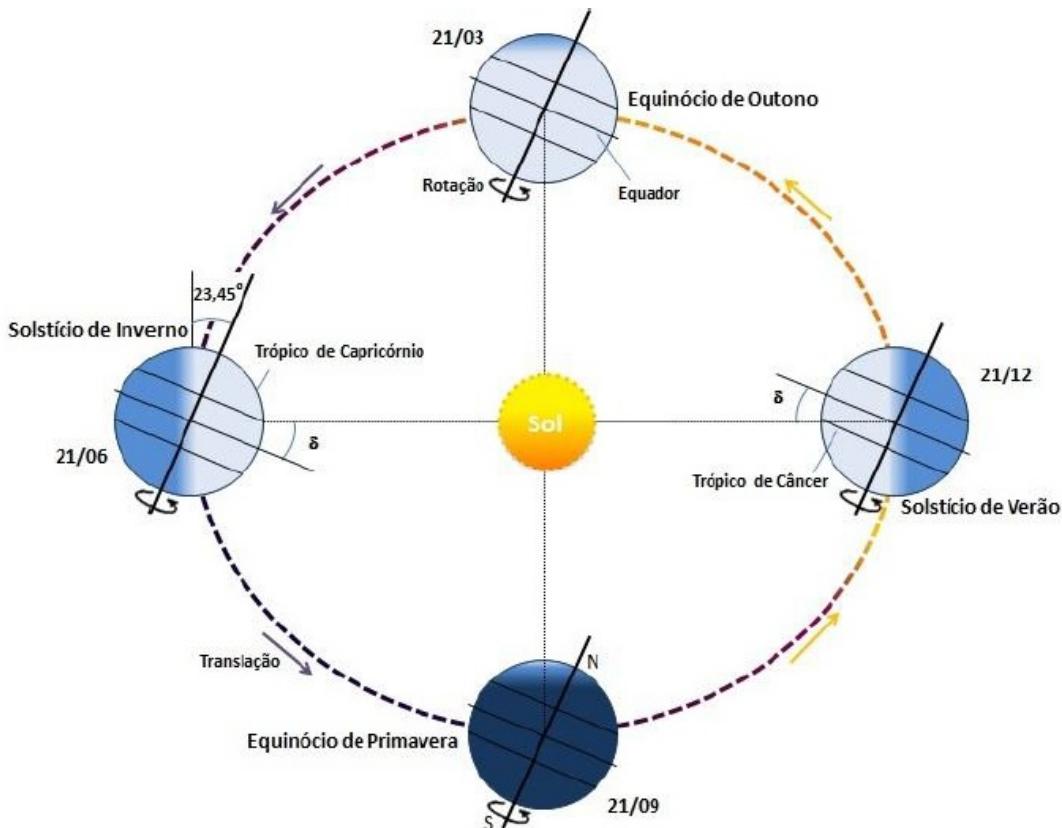


Figura 2.5: Movimento de rotação e translação da Terra. Fonte: Portal CRESESB da CEPEL.

2.3.3 Propagação dos raios solares

Apenas uma parte da radiação solar que chega na atmosfera atinge a superfície terrestre. O restante da radiação proveniente do Sol é refletido ou absorvido na atmosfera. A fração que consegue chegar ao solo é decomposta basicamente em três componentes, como ilustra a Figura 2.6. São eles:

- A radiação direta responsável por atingir, em linha reta, a superfície terrestre;
- A radiação indireta ou difusa responsável pelo processo de espalhamento da luz do Sol na atmosfera;
- O albedo – parcela da radiação solar que é refletida por materiais e superfícies e retorna ao espaço. Isto ocorre quando a superfície receptora (solo, vegetação, planta, painel fotovoltaico, etc.) estiver inclinada em relação à horizontal.



Figura 2.6: Componentes da radiação solar. Fonte: ABRAVA.

2.3.4 Geometria Solar

Para o presente caso estudado, vamos considerar a incidência dos raios solares em um painel fotovoltaico. A partir daí, é interessante termos o conhecimento das relações geométricas entre os raios incidentes, o painel solar e a superfície a qual este se encontra. As principais relações angulares, também encontradas na Figura 2.7, são:

- Inclinação (β): ângulo entre a horizontal e o plano da placa solar fotovoltaica;
- Altura do sol (α): ângulo da altitude aparente do Sol;
- Ângulo de Azimute da superfície (γ): é descrito tomando-se o eixo da Terra como referência, e atribuindo-se angulação zero para o sul. Ângulos para leste são atribuídos com sinal negativo e a oeste com sinal positivo;
- Ângulo de Azimute do Sol (Ψ): ângulo entre a projeção do raio solar no plano horizontal e a direção Norte-Sul. Respeita a convenção citada acima;
- Ângulo Zenital (Θ_z): ângulo formado entre o Zênite (vertical) e os raios do Sol.

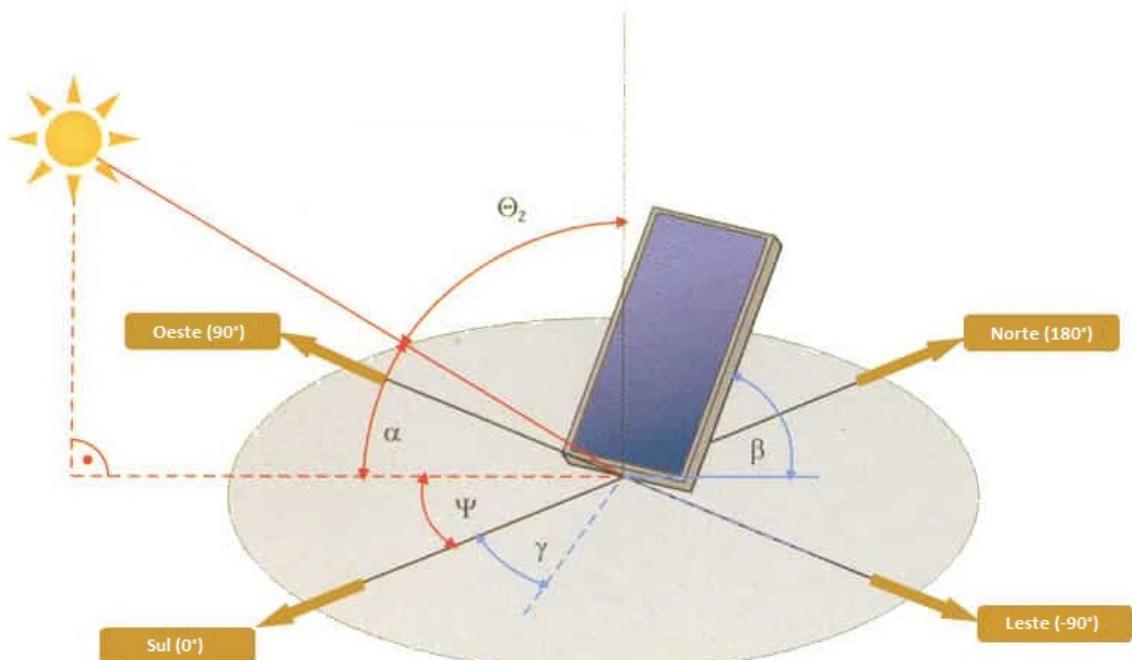


Figura 2.7: Geometria Solar. Fonte: SunFields Europe.

2.3.5 Geometria Astronômica

Dentro da Astronomia existem diferentes sistemas de coordenadas que também são utilizados nos estudos de geometria relativos ao Sol – a este conjunto é dado o nome de coordenadas celestes. Estas tratam da posição de um corpo celeste no céu terrestre ou de sua posição relativa a partir de um sistema de coordenadas específicas. Dos sistemas de coordenadas específicas, um dos mais utilizados é o chamado sistema eclíptico.

O sistema eclíptico de coordenadas é definido a partir de um plano fundamental chamado de Eclíptica. Este, como pode ser observado na Figura 2.8, nada mais é do que a projeção sobre a esfera celeste da trajetória aparente do Sol vista de um referencial na Terra.

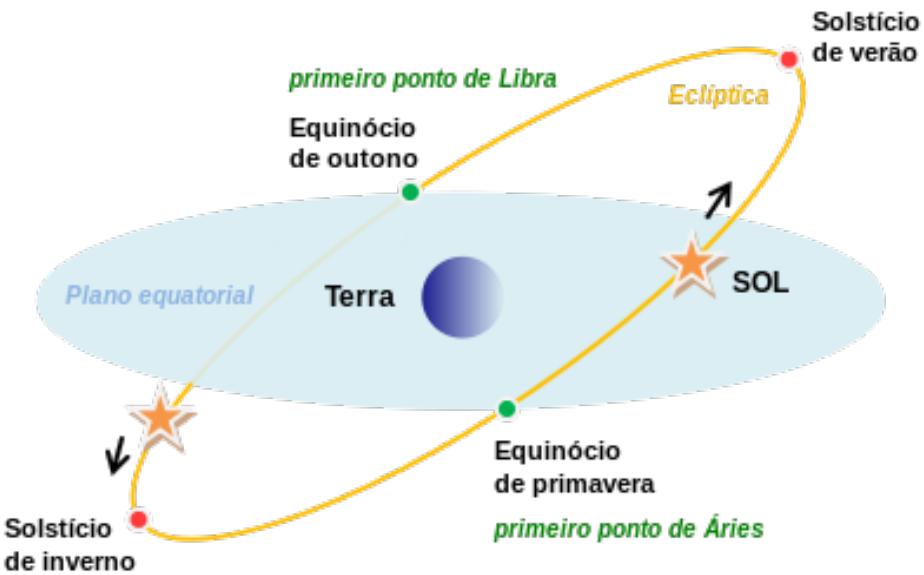


Figura 2.8: Plano da Eclíptica. Fonte: Portal Wikipédia.

O eixo perpendicular a esse plano define dois polos, conhecidos como polos eclípticos. Na Figura 2.9, uma das coordenadas desse sistema aqui tratado é responsável por medir o afastamento angular do semicírculo de longitude de um astro em relação ao semicírculo de longitude do ponto vernal (ponto de Áries) ou ponto gama (γ), representado pelo ponto P. É expressa em graus sendo compreendida entre 0° e 360° . À esta coordenada dá-se o nome de longitude eclíptica (λ). A segunda coordenada,

neste caso chamada latitude eclíptica (β), tem como função indicar o afastamento angular de um astro em relação à Eclíptica. A latitude é também expressa em graus e dita positiva para os astros situados ao norte da Eclíptica e negativa para os que estão ao sul. Portanto, diz-se que as latitudes celestes estão compreendidas entre -90° até $+90^\circ$. Por fim, a última coordenada denominada distância polar (B) tem como característica apontar o afastamento angular do astro em relação ao polo norte da Eclíptica (PNE). Novamente, seu valor é medido em graus além de configurar-se uma variação de 0° a 180° .

Para o sistema de coordenadas eclípticas, para quaisquer pontos da esfera celeste, é válida a seguinte relação:

$$B + \beta = 90^\circ \quad (2.1)$$

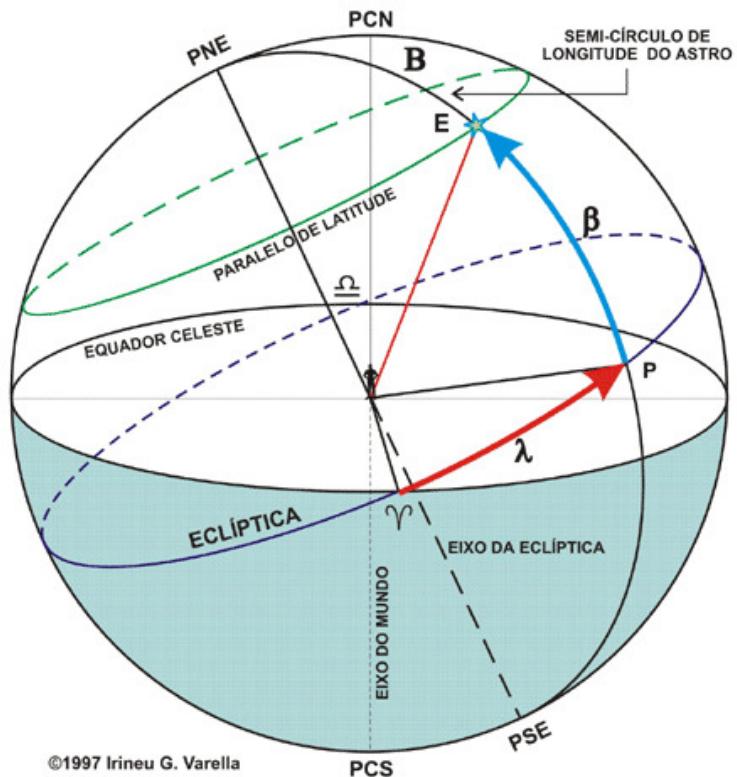


Figura 2.9: Representação de um Sistema eclíptico de coordenadas. Fonte: Portal Uranometria Nova.

2.4 Efeito fotovoltaico

O chamado efeito fotovoltaico diz respeito ao processo de conversão de energia solar em energia elétrica. Para que esse processo seja possível faz-se necessário o uso de uma superfície composta de material semicondutor, chamada célula fotovoltaica, ou um arranjo de centenas dessas células, denominado de painel fotovoltaico [8].

Ao incidir em uma célula fotovoltaica, a radiação solar é absorvida pelo material semicondutor de forma que os pacotes de fótons são transferidos para os painéis fotovoltaicos. Neste processo, alguns elétrons são excitados. Estes, pertencentes à camada de valência, passam à camada de condução no processo de excitação com o intuito de aumentarem sua condutividade – fenômeno denominado fotocondutividade.

Alguns fatores devem ser levados em conta nessa técnica de conversão de energia como a quantidade, a qualidade e o tamanho das placas fotovoltaicas. Além dessas características, outra forma de melhorar a eficiência desse sistema energético é adequá-lo, da melhor forma possível, à captação solar [9]. Para isso, é imprescindível que a incidência dos raios solares seja o mais perpendicular possível ao painel fotovoltaico.

Um método para auxiliar na correção da captação solar é a utilização de um dispositivo de rastreamento solar – também chamado de *Solar Tracker*. Esse procedimento permite uma orientação do painel solar na direção do Sol por meio de deslocamentos constantes realizados pela placa fotovoltaica.

Capítulo 3

Rastreadores e medidores de radiação solar

Uma das formas mais utilizadas atualmente para otimizar a captação solar é o rastreamento solar ou heliotropismo. Esse método diz respeito ao movimento tanto de plantas quanto de equipamentos mecânicos e elétricos na direção do Sol.

O sistema formado por equipamentos mecânicos e elétricos pode possuir um ou dois eixos e tem por objetivo posicionar o captador solar de forma perpendicular aos raios solares incidentes. Desta forma, permite-se um melhor aproveitamento da captação [10].

3.1 Sistema fixo

Por mais que alguns sistemas de painéis fotovoltaicos possam não apresentar nenhum tipo de rastreamento solar – como é o caso dos sistemas fixos – é possível que estejam posicionados com um ângulo otimizado. Numa situação padrão, a nível do mar, este ângulo seria o ponto médio da variação de ângulo do posicionamento do Sol, nos sentidos norte-sul e leste-oeste [8].

Para que o sistema venha a funcionar na mais perfeita ordem é necessário um estudo prévio da região. Fatores como mudanças na altitude, no relevo ou até características climáticas da região são causas possíveis para a alteração do ângulo

ótimo do projeto. Como exemplo, é sabido que por não ter mobilidade nos painéis solares, o sistema fixo acomoda condições ambientais mais severas que os sistemas de rastreamento - justamente por possuir uma quantidade menor de componentes mecânicos susceptíveis a falhas.

3.2 Seguidor Solar

Um Seguidor Solar funciona alterando diversas vezes durante o dia a posição dos painéis fotovoltaicos com o intuito de aumentar a produção de energia solar. A Figura 3.1 traz o funcionamento do Seguidor Solar em relação ao movimento do Sol durante um dia.

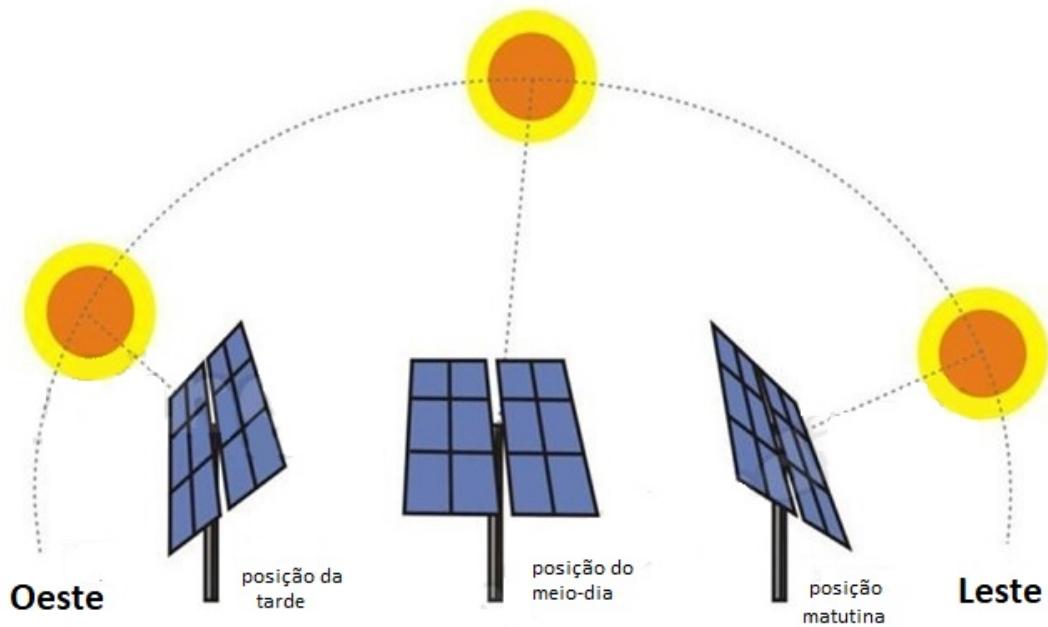


Figura 3.1: Posição do seguidor solar em relação ao Sol. Fonte: Solar Motors.

3.2.1 Vantagens e desvantagens

Ao aumentar a captação de radiação solar direta os sistemas com seguidores solares, ou seja, que ajustam o ângulo das placas fotovoltaicas de acordo com a posição do Sol no decorrer do dia, geram mais energia que os sistemas com a placa fotovoltaica fixa (sem movimentação da estrutura). A utilização de um seguidor

solar traz a possibilidade de aumentar, em média, 25% a produção total de energia gerada em relação ao sistema de eixo fixo.

Outra vantagem de um *Solar Tracker* diz respeito à forma como a potência é entregue à rede. Conforme a Figura 3.2, em um sistema fixo ocorre um aumento gradual na quantidade gerada de energia durante o dia de modo que em torno do meio-dia atinge-se o pico máximo de produção de energia. Por outro lado, nos sistemas com rastreadores a produção é mantida constante desde o início da manhã até o fim da tarde. Além disso, os constantes avanços em relação à tecnologia e confiabilidade em eletrônica tem reduzido de forma expressiva a preocupação com a manutenção dos sistemas com seguidores solares.

Atualmente, um dos principais problemas do sistema com rastreamento é o custo para sua implantação. Isto acontece pois são utilizadas tecnologias mais complexas e um número maior de peças que garantam a mobilidade da estrutura. Além disso, outros fatores podem influenciar bastante o projeto como a preparação adequada do local de instalação e os cuidados necessários a serem tomados com o cabeamento.

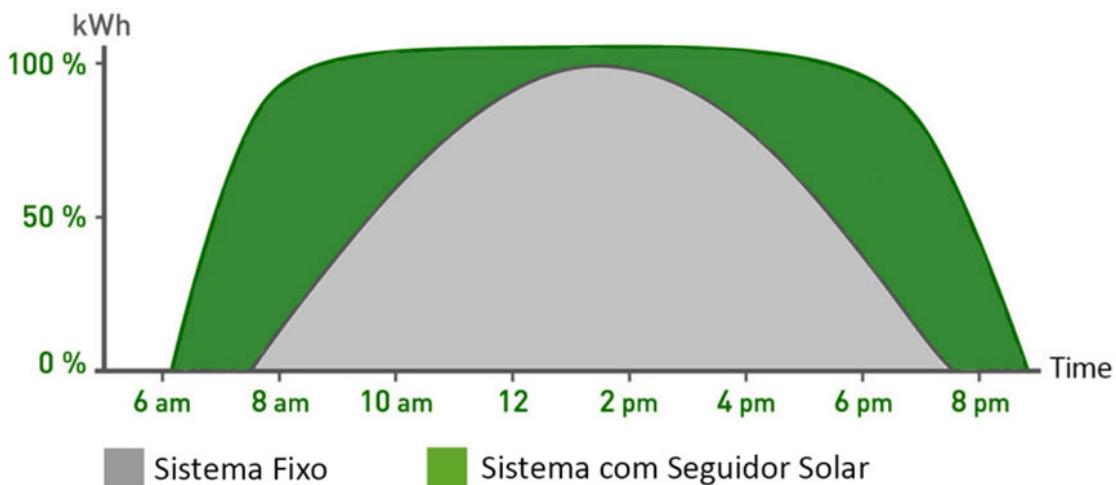


Figura 3.2: Comparação de energia gerada: sistemas fixos vs. seguidor solar. Fonte: VALLDOREIX GREENPOWER.

3.3 Heliotropismo nas plantas

O fenômeno do heliotropismo diz respeito ao movimento das plantas na direção do Sol. Esse processo tem uma relação próxima ao movimento foliar que, por sua vez, está também suscetível à ação de fatores como as condições da água e do solo, a temperatura da folha e a disponibilidade de nitrogênio.

Por via de regra, a planta pode ter um heliotropismo tanto positivo quanto negativo. O positivo diz respeito àquelas em que seu crescimento ocorre ao movimentar-se em direção ao Sol. Por outro lado, o negativo ocorre caso o crescimento da planta seja na direção oposta ao Sol.

Existem, na atualidade, dois tipos de heliotropismo que são definidos a partir da estrutura foliar das plantas [11]. São eles:

- Diaheliotropismo: este mecanismo possibilita o acompanhamento da luz solar pela lâmina foliar das plantas. Dessa forma, ao manter-se perpendicular aos raios solares, aumenta-se o ganho de carbono e a captação de luz;
- Paraheliotropismo: esta técnica faz com que a lâmina foliar das plantas acompanhe a incidência dos raios solares mantendo-se paralela a eles. Com isso, reduz-se o efeito de fatores desfavoráveis como o transporte de água, a fotoinibição dos raios UVB além da diminuição da temperatura da folha. Por isso, diz-se que este método facilita o processo de transpiração da planta.

Com o objetivo de realizar o balanceamento da absorção de radiação fotossinteticamente ativa bem como a perda de água por transpiração, muitas plantas combinam os movimentos paraheliotrópicos e diaheliotrópicos ao longo do dia.

O grau de orientação foliar pode ser medido através do cosseno do ângulo de incidência (variação entre zero e um). Esta orientação representa o cosseno do ângulo entre uma normal dos raios solares diretos e a lâmina foliar além de medir a proporção de raios solares diretos que atingem a folha. Assim sendo, o cosseno do ângulo de incidência igual a um representaria uma folha na qual sua superfície superior estaria perpendicular à direção da radiação solar direta. Por outro lado,

um valor zero representaria uma folha com sua superfície superior paralela aos raios solares diretos. Os valores compreendidos entre zero e um representam orientações intermediárias [12].

Algumas plantas em particular, como o girassol, são dotadas de mecanismos peculiares e que merecem um esclarecimento adicional no processo de heliotropismo.

3.3.1 Caso particular: o girassol

O girassol é uma planta originária da América do Norte e Central caracterizada por ser uma planta de caule grosso e robusto, com uma coloração um tanto quanto esverdeada. Ela recebeu este nome popular pois acompanha o deslocamento do Sol ou de quaisquer outras fontes de luz a qual esteja continuamente exposta.

Este movimento particular muito se dá pela ação de um hormônio de crescimento chamado auxina ou ácido indolacético, capaz de manifestar-se através da incidência de luz. Este ácido tem sua produção originária nas células jovens de várias regiões da planta além de estar presente nas laterais do caule. Seu movimento tende a ser no sentido de deslocamento para as partes do girassol que não sofrem contato da luz do Sol. Por causa disso, tais regiões acabam com um maior percentual de desenvolvimento de forma a ocasionar um crescimento desigual responsável por fazer a planta pender para o lado contrário (iluminado). A contínua movimentação do Sol durante o dia faz com que o processo se repita nas várias faces do caule de forma a aparecer um acompanhamento ao movimento solar por parte da planta. Durante a noite, quando a luz se encontra ausente, o girassol retorna à sua posição normal virando-se para o Leste com o intuito de reiniciar o ciclo no dia seguinte.

É bom frisar que este movimento diário do relógio interno do girassol, chamado ritmo circadiano, é quem determina quando a planta gira e quando deixa de fazê-lo. Ao atingir a vida adulta, o relógio interno dessa planta para de girar fazendo com que ela se volte para o oriente até a sua morte.

O movimento do heliotropismo é de vital importância para o crescimento do girassol. É um sistema muito eficiente de desenvolvimento capaz de fazer com que a

planta aproveite ao máximo a luz solar – de suma importância para a fotossíntese – ao mesmo tempo em que contribui com a produção dos hormônios do crescimento. Além disso, plantas que atingem um grau de crescimento maior desprendem um calor adicional, tornando-as mais atrativas aos polinizadores.

Por fim, o grande valor comercial dessa planta também vem do fato da extração do óleo de suas sementes. Este, popularmente chamado de óleo de girassol, possui diversas aplicações como a alimentícia, cosmética e, principalmente, para a produção de biodiesel.

3.4 Instrumentos de medição

Com o intuito de criar um histórico de grandezas que possibilite a formação de instalações tanto de sistemas térmicos quanto fotovoltaicos usam-se instrumentos capazes de realizar a medição da quantidade de radiação solar existente. Culmina-se, então, com o grande objetivo de assegurar o máximo aproveitamento ao longo do ano em regiões que tipicamente sofrem variações consideráveis de intensidade de radiação.

A Organização Mundial de Meteorologia (OMM) determina através de normas alguns limites de precisão para quatro tipos de instrumentos: de referência (ou padrão), instrumentos de primeira, segunda ou terceira classe. As medições padrões são: radiação global e difusa no plano horizontal e radiação direta normal [13].

A seguir, listam-se alguns dos mais importantes instrumentos de medida da radiação.

3.4.1 Piranômetro

Este instrumento tem como finalidade medir a radiação total seja ela difusa, direta ou refletida. Caracteriza-se pelo uso de uma termopilha responsável por medir a diferença de temperatura entre duas superfícies igualmente iluminadas – uma pintada de branco e a outra com a coloração preta, conforme a Figura 3.3. Um dife-

rencial de potencial (ddp) é formado a partir da expansão sofrida pelas superfícies. Desse modo, a medida dessa ddp é capaz de nos retornar o valor instantâneo da energia solar.

Outro modelo usualmente utilizado consiste no uso de uma célula fotovoltaica de silício monocristalino para coletar medidas ditas solarimétrias. Por mais que este modelo tenha um custo menor e, até por isso, seja amplamente utilizado, a limitação em relação a sua sensibilidade – apenas 60% da radiação solar incidente – torna-o um instrumento sem uma eficácia elevada. Usualmente é encontrado com precisão de 2% ou 5%.



Figura 3.3: Modelo de um Piranômetro. Fonte: NRGSystems.

3.4.2 Pireliômetro

O Pireliômetro é um instrumento que mede a radiação direta. Esse dispositivo, encontrado na Figura 3.4, caracteriza-se por ter uma pequena abertura responsável por garantir que a luz solar seja direcionada para uma termopilha que converte o calor gerado em sinal elétrico. Esse equipamento é constantemente ajustado de acordo com a trajetória do Sol com o intuito de focalizar melhor a região do sensor. Sua precisão é em torno de 0,5% quando utilizado de forma correta.

Algumas de suas aplicações são pesquisas para teste de materiais, observações de nível científico tanto meteorológicas quanto climáticas e avaliação da eficiência de coletores solares e dispositivos fotovoltaicos.



Figura 3.4: Modelo de um Pireliômetro. Fonte: Portal DirectIndustry.

3.4.3 Heliógrafo

O Heliógrafo é um instrumento que registra a duração do brilho solar, ou seja, o número de horas de insolação. O foco é feito por uma esfera de cristal de 10cm de diâmetro sobre uma fita que é energizada a partir da ação da radiação. Desse modo, a medida do número de horas de insolação é feita realizando-se uma leitura do comprimento da fita. É imprescindível que o aparelho seja instalado em um local de altura elevada, para que não seja sombreado por construções e árvores, por exemplo.

O registro heliógrafo torna-se importante em diferentes segmentos da ciência como energia solar, previsão do tempo, aviação e agricultura. A Figura 3.5 traz um exemplar deste instrumento.

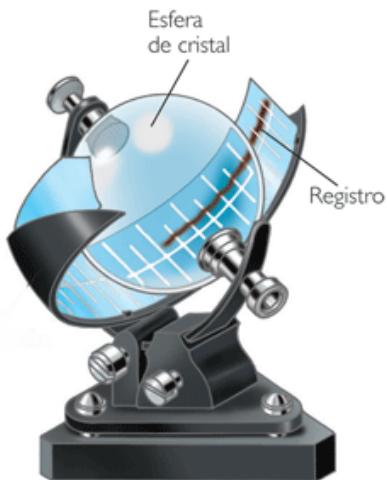


Figura 3.5: Ilustração de um heliógrafo mostrando em detalhe a fita queimada. Fonte: Portal Meteorópole.

3.4.4 Actinógrafo

Este instrumento, representado na Figura 3.6, também realiza a medição da radiação global. Sua composição é feita por um sensor baseado na expansão diferencial de uma tira bimetálica. Esta, ao possuir uma dupla fenda, é dita constituída por três tiras. As duas tiras externas são da cor branca e a central, conectada ao registrador, é representada pela cor negra. Além disso, o sensor é protegido das intempéries por uma cúpula de vidro. Ao ser conectado a uma pena, o sensor se expande e registra o valor instantâneo da radiação solar.



Figura 3.6: Exemplo de um Actinógrafo. Fonte: NEAS/UFRB.

Capítulo 4

Tecnologias existentes de Rastreamento Solar

Este capítulo descreve as principais características de funcionamento dos rastreadores solares existentes atualmente no mercado. Além disso, discutem-se as tecnologias relacionadas à sua construção através do número de eixos rotativos, do tipo de estrutura, do tipo de controle e da estratégia de rastreamento utilizada.

4.1 Quanto ao número de eixos

Os seguidores solares têm dois tipos diferentes de classificação referentes ao ali- cerce do movimento. Estes equipamentos podem ser compostos por um ou dois eixos em sua estrutura.

4.1.1 Um eixo rotativo

Este modelo tem como principal característica a sua simplicidade tanto relacio- nada aos movimentos mecânicos envolvidos em sua constituição quanto em relação ao controle utilizado. Utiliza-se um atuador elétrico, que em muitos casos tem sua alimentação feita de forma externa, com o intuito de aumentar a eficiência total de geração. Os sistemas, como na Figura 4.1, fazem uso de apenas um eixo rotativo e têm a possibilidade de um posicionamento na horizontal, vertical ou com inclina-

ção. Ademais, sua orientação pode seguir dois sentidos já estabelecidos: norte-sul ou leste-oeste.

Por mais que este tipo de tecnologia apresente um menor custo em relação ao *Solar Tracker* de dois eixos, a precisão, consequentemente, também tende a ser inferior.

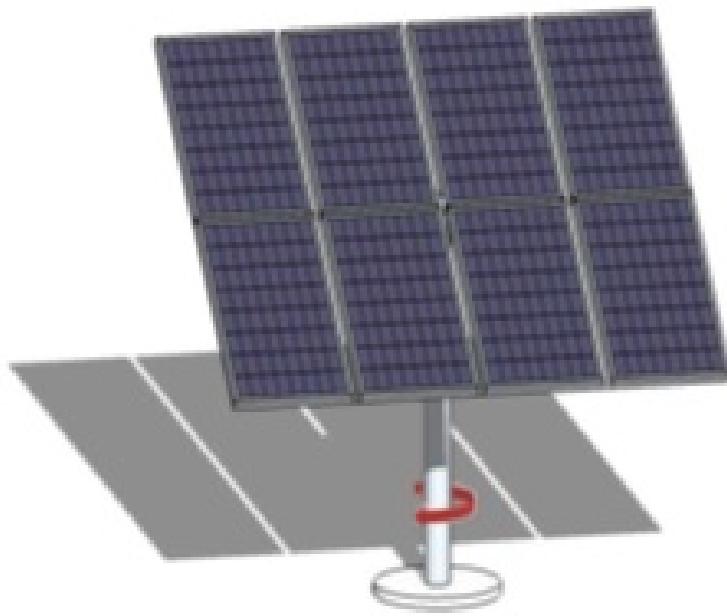


Figura 4.1: Rastreador Solar de um eixo. Fonte: LSF do IEE/USP.

4.1.2 Dois eixos rotativos

Este tipo de rastreador, até por possuir características mecânicas e de controle mais complexas que o rastreador solar com um único eixo, necessita de uma área maior de terreno para sua instalação. Na Figura 4.2, observa-se que seus dois eixos rotativos de movimentação, vitais para proporcionar um grande rendimento de captação da energia solar, têm funcionalidades diferentes. Um desses eixos é utilizado para acompanhar a trajetória do Sol enquanto o outro é responsável por ajustar a sua inclinação. Desta forma, diz-se que esta topologia apresenta a melhor taxa de conversão de energia pois possibilita o acompanhamento de todos os movimentos solares.

Uma das desvantagens deste tipo de tecnologia diz respeito ao esforço que este

equipamento está sujeito. Isto ocorre devido ao seu peso e ao fato do seu bloqueio em situações em que se registram ventos com velocidades elevadas [6].

Como analogia ao caso anterior, um maior custo para a obtenção desta tecnologia e para sua manutenção resulta em uma precisão superior.

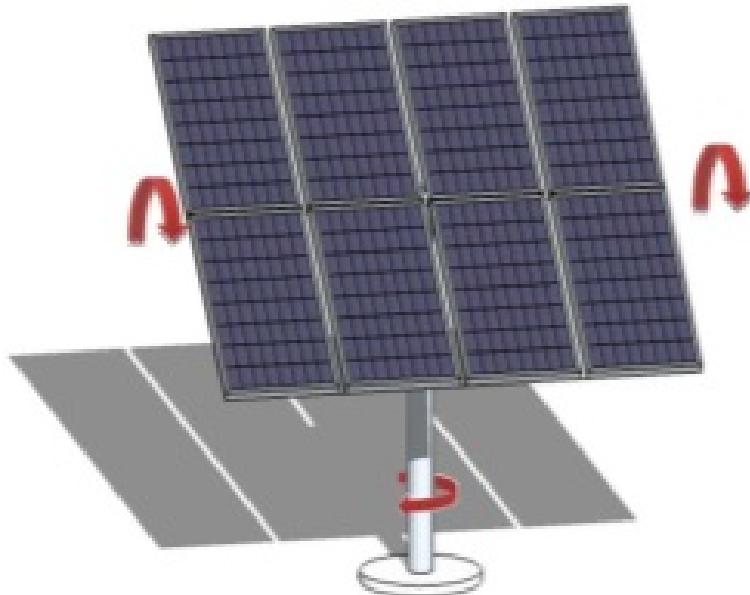


Figura 4.2: Rastreador Solar de dois eixos. Fonte: LSF do IEE/USP.

4.2 Quanto à estrutura

Em relação ao tipo de estrutura que servirá de suporte para os seguidores solares, a classificação é feita de acordo com suas bases de fixação. Estas, podem ser com pedestal, de plataforma giratória ou do tipo *Roll-Tilt*.

4.2.1 Estrutura com pedestal

Este sistema é formado por um eixo posicionado na vertical responsável por dar suporte aos módulos fotovoltaicos. É uma estrutura utilizada para ajustar a rotação do equipamento, feita por meio de engrenagens, em torno do seu eixo vertical (ângulo de azimute).

Como pode ser observado na Figura 4.3, esta estrutura é de simples instalação pois o pedestal pode ser fixado ao solo sobre uma base de concreto usada como forma

de sustentação. Entretanto, devido aos esforços mecânicos impostos por regiões com ventos fortes, é necessária uma maior fundação e uma caixa de engrenagem mais robusta a fim de inibir qualquer tipo de problema que possa surgir. Além disso, esta tecnologia tem um bom desempenho em estações do ano as quais os dias são mais longos.

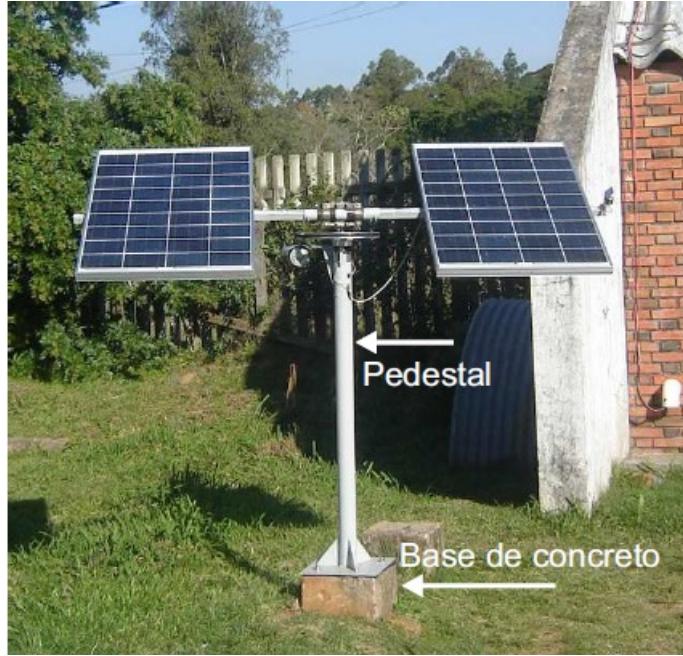


Figura 4.3: Rastreador Solar com pedestal. Fonte: Portal SeguidorSolar.

4.2.2 Estrutura com plataforma giratória

O Seguidor Solar que possui uma estrutura com plataforma giratória tem sua projeção em estruturas de grande porte. Como pode ser observado na Figura 4.4, este sistema é composto por diversos módulos fotovoltaicos ou concentradores parabólicos. Uma de suas principais finalidades diz respeito à possibilidade de ser utilizado em sistemas que demandam uma alta concentração de raios solares para o processo de conversão em energia elétrica.



Figura 4.4: Estrutura com plataforma giratória. Fonte: Portal Wikipédia.

A base dessa estrutura, caracterizada por seu formato circular e com possibilidade de realizar movimentos giratórios, tem como uma de suas principais atribuições servir de suporte para estruturas pesadas orientadas no sentido do movimento solar. Deste modo, o movimento se dá do leste até o oeste. O intuito, neste caso, é obter a maior eficiência possível ao acompanhar o movimento do Sol durante as 24 horas que norteiam um dia na Terra.

4.2.3 Estrutura do tipo Roll-Tilt

Este tipo de estrutura, encontrada na Figura 4.5, é composta por dois eixos. Um destes eixos é responsável por realizar a rotação do conjunto com o intuito de acompanhar da forma mais fidedigna possível o movimento solar. O outro eixo, incumbido de controlar o ajuste da inclinação dos painéis fotovoltaicos dispostos no sistema, posiciona-se de forma perpendicular ao eixo de rotação. Esta estrutura é conhecida por possuir uma quantidade maior de acoplamentos e partes rodantes, o que torna sua elaboração – principalmente quando falamos de seus componentes mecânicos – mais complexa em comparação com os outros dois conjuntos já explicitados nesta seção.

Em relação ao seu alicerce, é sabido que esta estrutura é a que possui a menor fundação das três estudadas nessa seção. Isto ocorre, pois, este sistema é formado

por um grande número de módulos fotovoltaicos pequenos dispostos de forma que os esforços mecânicos devido ao vento não são tão elevados quando comparados às outras estruturas.

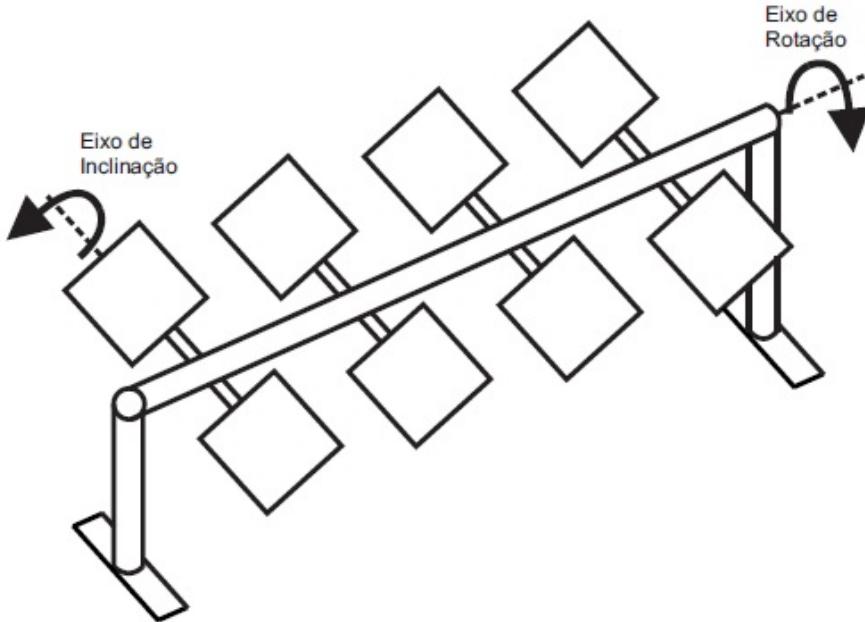


Figura 4.5: Seguidor Solar com estrutura Roll-Tilt. Fonte: LSF do IEE/USP.

4.3 Quanto ao tipo de Controle

O controle empregado em rastreadores solares pode ser classificado em três níveis diferentes: passivo, eletro-óptico e microprocessado (sem o uso de sensores).

Por não possuir motores nem circuitos eletrônicos o controle passivo traz um custo menor e uma manutenção menos frequente ao sistema. Por outro lado, ao possuirem um aparato mecânico e eletroeletrônico mais robusto, as estratégias de controle eletro-óptico e microprocessado (sem o uso de sensores) trazem uma eficiência maior ao projeto (vide Tabela 4.1).

Tabela 4.1: Aspectos do tipo de Controle empregado em Rastreadores Solares. Fonte: Elaboração própria.

TIPO DE CONTROLE	CUSTO	MANUTENÇÃO	EFICIÊNCIA	MOTOR/ELETRÔNICOS	SENSORES
PASSIVO	X	X			
ELETRO-ÓPTICO				X	X
MICROPROCESSADO			X	X	

A seguir, serão avaliadas cada uma dessas técnicas.

4.3.1 Rastreadores Passivos

Uma grande vantagem deste tipo de equipamento é o fato dele não utilizar motores elétricos tampouco circuitos eletrônicos. Além disso, seu movimento é baseado no processo de expansão e contração térmica com uma ocasional mudança de estado do gás utilizado – usualmente Freon. Por não possuir nenhuma fonte externa de energia, este conjunto é estimulado por um atuador mecânico tal que seu funcionamento se dá por meio da radiação solar.

Como pode ser visto na Figura 4.6, o processo de montagem deste rastreador inicia-se ao colocarmos um suporte acoplado a um eixo localizado exatamente no centro de uma barra móvel. Nas extremidades da parte móvel localizam-se reservatórios de gás. O sistema, então, equilibra-se quando há a mesma quantidade de radiação direta nos dois lados da parte móvel. Conforme a intensidade muda, o sistema se adequa e posiciona-se perpendicularmente à radiação incidente [14].



Figura 4.6: Rastreador solar do tipo passivo. Fonte: ZOMEWORKS CORPORATION.

Por mais que essa tecnologia tenha um custo baixo, seja de fácil manutenção e

se configure como uma opção muito viável para locais com uma incidência baixa de ventos, torna-se necessária a exposição de alguns fatores para levar-se em conta antes do início de um projeto. São eles:

- Manutenção simples, porém, constante;
- Movimentação ocorre em apenas um eixo de direção;
- Influência grande de ventos acentuados, pouso de aves e radiação difusa na parte móvel;
- Eficiência muito pequena em dias com pouca radiação;
- Por ter uma baixa precisão, sua aplicação restringe-se em locais de instalação os quais sofram variações térmicas consideráveis para que o gás consiga se expandir.

4.3.2 Rastreadores com controle Eletro-Óptico

A tecnologia existente nos seguidores solares com controle eletro-óptico tem seu funcionamento baseado na detecção da posição do Sol por meio de fotosensores. Estes enviam os dados adquiridos ao circuito de controle principal que é responsável por acionar o motor da estrutura. A partir daí a mudança dos ângulos de inclinação dos painéis fotovoltaicos é realizada a fim de maximizar a absorção dos raios solares.

Este tipo de tecnologia traz resultados satisfatórios quando as condições climáticas são adequadas. Já em dias nublados, por exemplo, os sensores tendem a não funcionar de forma correta, o que contribui para uma eficiência baixa em relação à taxa de conversão de energia do conjunto. Na Figura 4.7, pode ser visto um exemplo de projeto com esse tipo de desenvolvimento.



Figura 4.7: Exemplo de Solar Tracker com controle Eletro-Óptico. Fonte: [15]

4.3.3 Rastreadores microprocessados sem o uso de sensores

Este sistema, ao contrário da tecnologia exemplificada na seção anterior, não necessita de sensores para detectar a posição do Sol, o que diminui os custos do rastreador. Seu mecanismo de funcionamento opera baseado em algoritmos responsáveis por calcular a posição solar e a atuação dos motores para posicionar a estrutura de conversão em direção ao Sol [16]. Neste caso, o conjunto é definido por funcionalidades em que o tempo determinará a posição dos painéis.

A alta precisão deste equipamento é um dos diferenciais que o controle por meio de microprocessadores traz a esta tecnologia. Além disso, a estrutura de controle é capaz de controlar vários módulos fotovoltaicos simultaneamente, contribuindo com uma maior eficiência do sistema. Um exemplo deste desenvolvimento encontra-se na Figura 4.8.



Figura 4.8: Exemplo de Solar Tracker com controle microprocessado. Fonte: Portal Instructables.

4.4 Quanto à estratégia de rastreamento

Nesta seção será abordada a classificação de seguidores solares em relação à técnica utilizada no rastreamento do equipamento. Esta pode ser do tipo Polar, Azimutal ou Horizontal.

4.4.1 Rastreamento Polar

O seguidor com esse tipo de acompanhamento pode possuir um ou dois eixos. Para aqueles que possuem um único eixo, a estrutura de fixação dos módulos fotovoltaicos posiciona-se sobre um eixo inclinado (sentido norte-sul), com ângulo fixo de inclinação, e dependência da latitude do local ao qual ele foi instalado. Na Figura 4.9, encontra-se um exemplo deste sistema. O eixo faz com que os módulos FV sigam a trajetória diária do Sol desde a sua nascente, a Leste, até seu poente, a Oeste. Por mais que esse conjunto seja simples e eficiente, esta tecnologia produz uma quantidade maior de sombra do que os rastreadores do tipo Horizontal e Azimutal.



Figura 4.9: Solar Tracker do tipo Polar com 1 eixo. Fonte: University of Pune.

4.4.2 Rastreamento Azimutal

Este tipo de *Solar Tracker*, assim como o de rastreamento Polar, é encontrado em soluções com um ou dois eixos. Nas soluções de eixo único a montagem mecânica e elétrica do equipamento é dita simples além dele produzir menos sombra que o rastreador Polar. Mesmo existindo uma limitação no seu movimento ele é capaz de ter uma inclinação ajustável além de ter um bom desempenho em locais com dias mais longos. A Figura 4.10 traz uma amostra desta solução.



Figura 4.10: Solar Tracker do tipo Azimutal com 1 eixo. Fonte: LSF do IEE/USP.

4.4.3 Rastreamento Horizontal

O seguidor solar com rastreamento do tipo horizontal é normalmente utilizado no tracionamento de sistemas que possuem muitos módulos fotovoltaicos. Nestes, um único motor é necessário para realizar a movimentação de todo o sistema. Como indica a Figura 4.11, a montagem deste equipamento é robusta e simples, fato este que permite uma fácil modularização desta estrutura para utilização em soluções de grande escala. Por ter seu posicionamento inicial com ângulo de inclinação 0° em relação ao solo, esta solução tem seu rendimento reduzido com o aumento da latitude. Por fim, outra característica interessante é a baixa quantidade de sombra que uma estrutura produz em módulos adjacentes quando comparada às outras

duas soluções de rastreamento já tratadas – Polar e Azimutal.



Figura 4.11: Solar Tracker do tipo Horizontal. Fonte: University of Pune.

Capítulo 5

Estudo de caso: Desenvolvimento do protótipo de um Seguidor Solar

Neste capítulo serão detalhadas as etapas relativas à construção de um protótipo de Seguidor Solar. Após, serão discriminados os testes realizados a fim de compararmos a eficiência de um Rastreador Solar de dois eixos com um Rastreador Solar de eixo fixo.

O protótipo desenvolvido apresenta um conjunto com cinco sensores luminosos LDR (*Light Dependent Resistor*), dois Servo motores responsáveis pela movimentação da estrutura, uma placa de Arduino UNO, que contém um microcontrolador embutido, e um *protoboard*.

Para que o movimento do Sol possa ser seguido pelo protótipo, quatro LDRs são posicionados em um formato que se assemelha a um quadrado de forma que a variação de suas resistências seja ocasionada a partir da variação de luminosidade que o componente esteja sujeito. A partir daí os sensores fornecem uma tensão variável de sinal de entrada para o microcontrolador. Fica a cargo deste, então, julgar se o conjunto fará algum tipo de rastreamento nos sentidos norte-sul ou leste-oeste. O quinto LDR é posicionado no centro do quadrado formado pelos outros resistores dependentes de luz com a única finalidade de ser utilizado nas medições realizadas no teste proposto.

A Figura 5.1 traz um exemplo da disposição física das principais partes que formam um sistema de Seguidor Solar. Nela, vemos os seguintes componentes e suas funcionalidades:

- Controlador: processar e controlar o sistema;
- Atuador: realizar a movimentação do painel;
- Engrenagens: auxiliar na montagem do projeto;
- Sensores: captar os raios solares.



Figura 5.1: Exemplo da disposição física dos componentes. Fonte: Portal PARU Solar (adaptado).

5.1 Fluxograma de funcionamento

O código do Rastreador Solar segue a lógica presente na Figura 5.2.

O sistema indica que, a partir do momento em que o programa é iniciado, será feita a leitura das tensões dos quatro sensores LDR. Além disso, estes valores lidos provenientes da entrada analógica do microcontrolador passam por um processo de conversão para valores digitais. A partir daí, ocorre um processo de comparação

entre estes valores com o intuito de identificarmos se os mesmos estão dentro da tolerância escolhida para o projeto. A primeira etapa do processo de comparação se dá quando o código checa se a diferença entre a média das tensões dos dois sensores posicionados no canto superior da placa com a média das tensões dos outros dois sensores localizados no canto inferior da mesma encontra-se dentro da tolerância. Caso não estejam, é enviado um comando para que o Servo motor responsável pelo eixo vertical mude seu ângulo. Após, realiza-se procedimento semelhante na checagem da diferença entre a média das tensões dos dois sensores posicionados no canto esquerdo da placa com a média das tensões referentes aos sensores no lado direito. Caso não estejam dentro da tolerância, desta vez o movimento realizado será feito pelo Servo que comanda o eixo horizontal da estrutura. Na situação em que os sensores voltem a apresentar tensões diferentes, o processo será reiniciado.

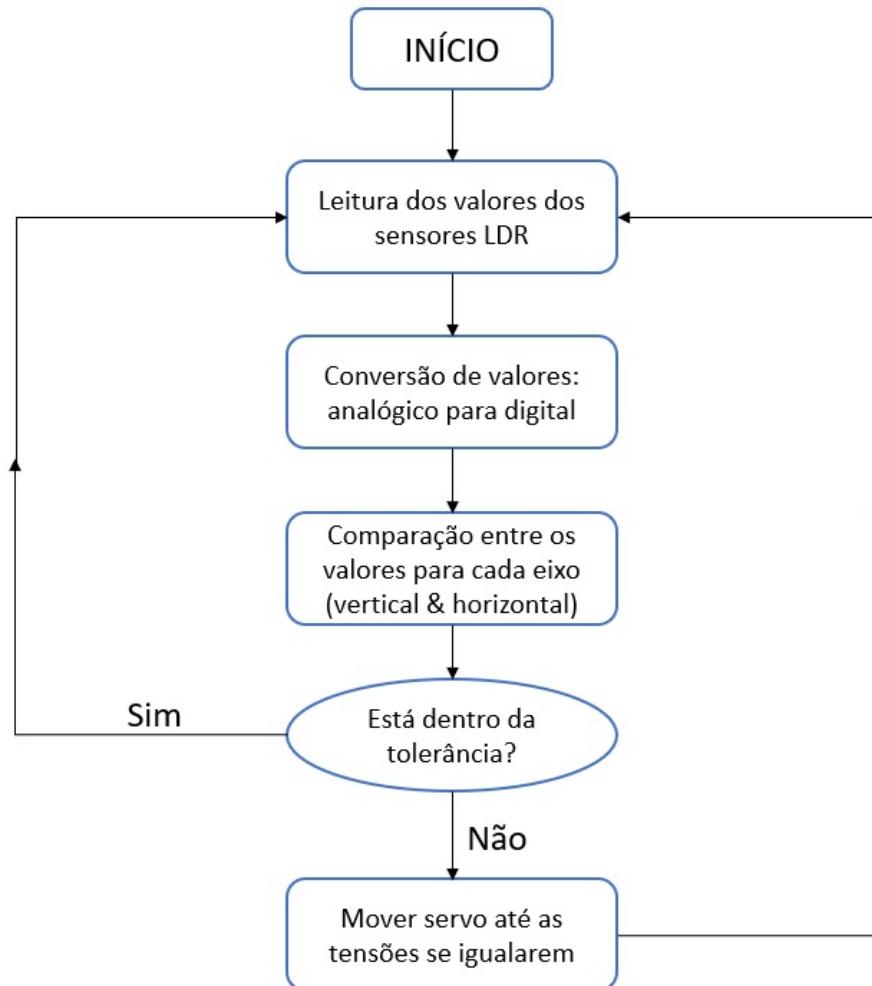


Figura 5.2: Fluxograma do Rastreador Solar. Fonte: Elaboração própria.

O diagrama de blocos do projeto, presente na Figura 5.3, indica os estágios de entrada, intermediário e final do sistema. A entrada diz respeito aos sensores LDR que são responsáveis por converter os raios solares em valores de tensão. Já no estágio intermediário, o microcontrolador embutido na placa de Arduino UNO é encarregado de colaborar com as tomadas de decisão do sistema. Por fim, os Servo motores representam o estágio final onde serão incumbidos de movimentar ou não a estrutura criada.

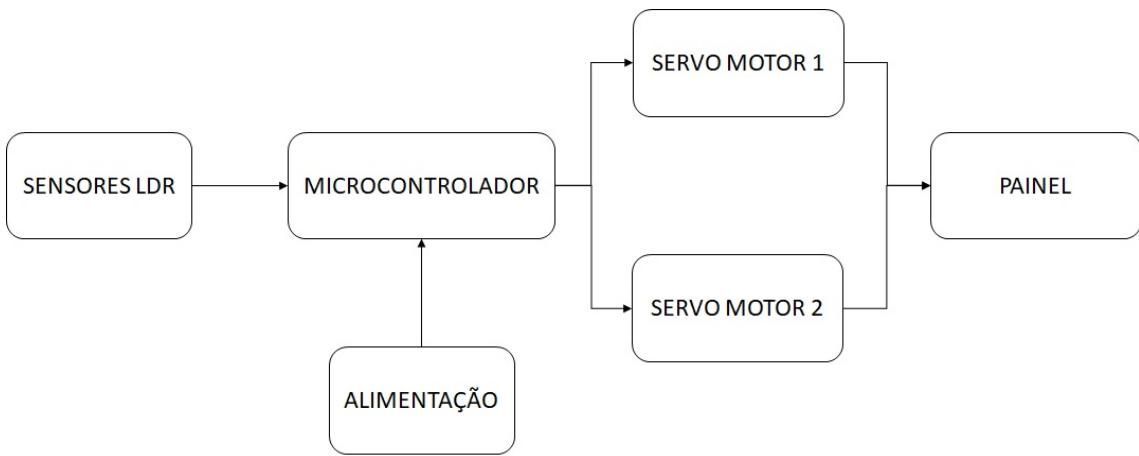


Figura 5.3: Diagrama de blocos do projeto. Fonte: Elaboração própria.

5.2 Componentes do sistema

Esta seção trata das informações necessárias dos principais componentes do projeto. Especificamente, serão dadas informações sobre a teoria dos sensores LDR, dos Servo motores e da placa de Arduino UNO com o intuito de facilitar o entendimento e de relacioná-los ao Rastreador Solar. Para a construção do projeto foram necessários alguns dispositivos, como:

- Sensores LDR responsáveis por detectar a luz solar e enviar um sinal ao microcontrolador;
- Servo motores de 5v com possibilidade de rotação de até 180°;
- Placa de Arduino UNO para servir de interface entre os Servos e os LDRs;

- Bateria de 9v para prover energia ao sistema.

5.2.1 Sensor de Luminosidade LDR

Os sensores usados na construção do protótipo são foto-resistivos do tipo LDR, os quais variam a sua resistência através da variação de luz [9]. O material responsável por formar este sensor, o Sulfeto de Cádmio, possui um comportamento em que a resistência do sensor diminui à medida que exista um incremento na luminosidade. Ou seja, em locais com maior incidência de luz o sensor apresentará uma resistência baixa (aproximadamente dezenas de ohms). O inverso também ocorre em ambientes mais escuros quando a resistência do LDR será elevada (geralmente mega ohms). Esta particularidade pode ser vista na curva característica do componente encontrada na Figura 5.4.



Figura 5.4: Curva característica do LDR. Fonte: Portal PCexpertos (adaptado).

Por ser um equipamento transdutor passivo, será utilizada a característica de divisor de tensão do sensor para que obtenhamos o valor da tensão correspondente à sua resistência. Um resistor de $10k\Omega$ será conectado em série ao sensor de forma que a configuração resultante, encontrada na Figura 5.5, seja responsável por fazer com que a tensão de saída do sensor aumente à medida que exista um incremento na luminosidade. Além disso, outra função importante deste resistor é servir como um elemento condicionador de sinal para que o sinal advindo dos sensores interaja

de forma adequada com o restante do circuito. A partir da comparação dos valores obtidos, a lógica do programa definirá o comando a ser dado para a movimentação ou não do Servo motor.

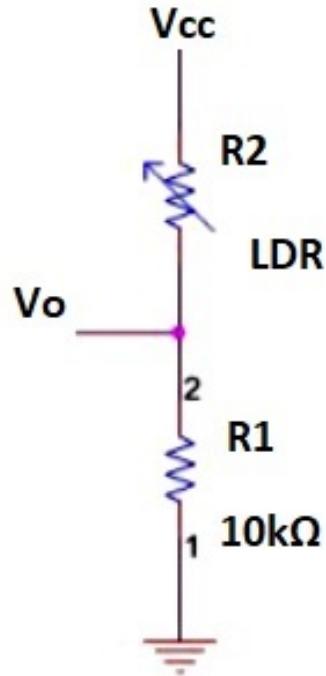


Figura 5.5: Divisor de tensão do LDR. Fonte: [17] (adaptado).

Com isso, nota-se a Equação 5.1 como uma relação entre as tensões do divisor de tensão:

$$V_o = V_{cc} \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (5.1)$$

Tal que:

- V_o = Tensão de saída do divisor de tensão que será conectada à entrada analógica da placa de Arduino UNO;
- V_{cc} = Tensão de fornecimento do sistema de 5v;
- R_1 = Resistência pré-definida de $10k\Omega$;
- R_2 = Resistência variável do LDR.

Os LDRs do projeto estão dispostos de forma que quatro encontram-se em cada um dos vértices de um quadrado imaginário. Estes, serão responsáveis por realizar a captação da luminosidade bem como seus valores de tensão serão utilizados como entrada da lógica de comparação do sistema. O quinto e último sensor localiza-se exatamente no centro do quadrado de forma a ser utilizado como o elemento de medição do teste de campo realizado no projeto. A Figura 5.6 traz uma imagem do sensor LDR bem como seu símbolo elétrico.

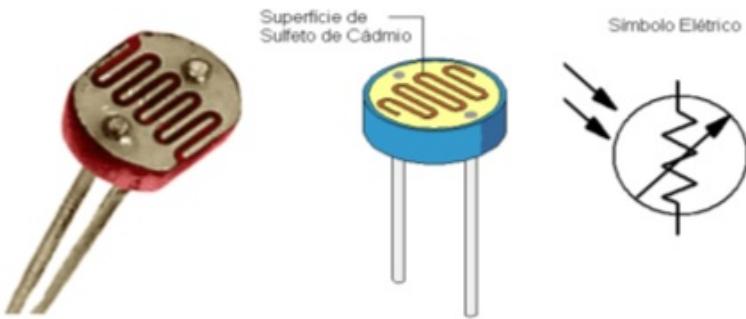


Figura 5.6: Construção física e símbolo elétrico de um LDR. Fonte: [18].

5.2.2 Servo motor

Como a estrutura do projeto não exige uma demanda alta de potência, foram utilizados dois micro Servo motores 9g de baixo custo capazes de suprir as necessidades do sistema. O circuito deste dispositivo está dentro da estrutura do motor e contempla um eixo equipado com uma engrenagem, vide Figura 5.7.

Os três principais constituintes desse componente são: o motor DC, o potenciômetro e o circuito de controle. À medida que o motor rotaciona, a resistência do potenciômetro também varia, possibilitando a atuação do circuito de controle ao regular a quantidade necessária de movimento e a direção requisitada para a rotação.

O fornecimento de energia para o motor cessa quando o seu eixo atinge a posição desejada. Esta posição é enviada por meio de pulsos elétricos através do sinal de controle. Além disso, a velocidade que o motor rotaciona é proporcional a diferença entre sua posição atual e a desejada. Portanto, quando o Servo se aproxima da

posição desejada ele tende a diminuir sua velocidade.

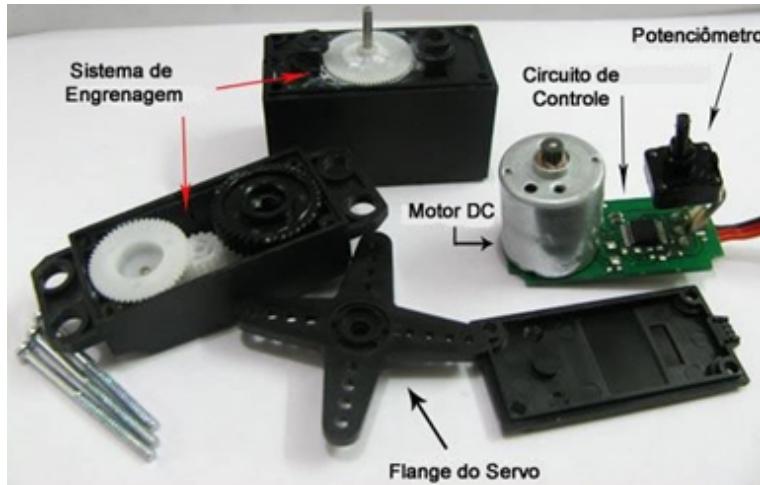


Figura 5.7: Estrutura interna de um Servo motor. Fonte: Portal Citisystems.

Os Servo motores enviam pulsos elétricos de largura variável – fenômeno este chamado de Modulação por Largura de Pulso (MLP). O conceito parte do princípio que existe um pulso mínimo, um pulso máximo e uma taxa de repetição. Servos normalmente são responsáveis por rotacionar 90° em uma das direções (movimento total de 180°). Sua posição é dita neutra quando o dispositivo tem a mesma quantidade de rotação potencial tanto no sentido horário quanto no anti-horário.

O sinal de MLP enviado ao motor, também conhecido como *Pulse Width Modulation* (PWM), determina a posição do eixo rotacional e, de acordo com a duração do pulso enviada, o rotor se movimentará para a posição desejada. Este processo acontece a cada 20 milissegundos (período do sinal) de forma que a largura do pulso enviado determinará o sentido de rotação do motor. Por exemplo, um pulso em torno de 1,5 milissegundos faz com que o motor gire para a sua posição neutra de 90° . Se o pulso for menor que 1,5 milissegundos fará com que o motor rotacione para a posição 0° bem como um pulso maior que o correspondente ao valor neutro contribuirá para uma rotação de 180° . A Figura 5.8 ilustra este mecanismo.

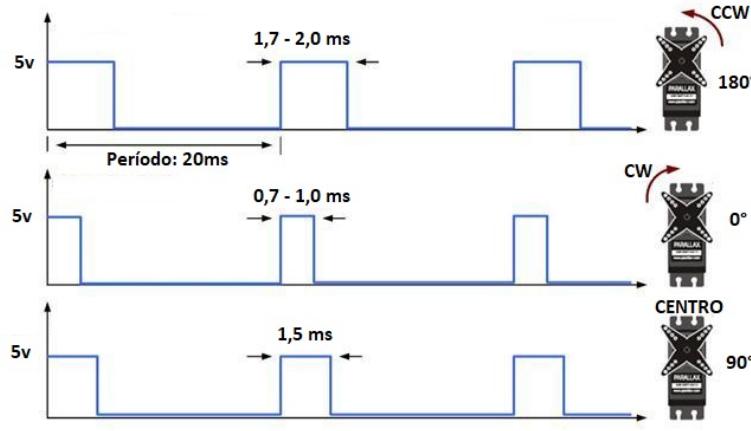


Figura 5.8: Diagrama de tempo do sinal MLP de um Servo Motor. Fonte: Portal PK2Lab (adaptado).

5.2.3 Microcontrolador

Um microcontrolador pode ser entendido como um circuito integrado que contém memória, unidade de processamento e circuitos de entrada/saída. Estes dispositivos são capazes de executar o programa carregado em sua memória flash.

Para o controle do sistema e sua programação utiliza-se neste projeto uma placa de Arduino UNO que contém um microcontrolador de 8 bits do tipo Atmega328 baseado em arquitetura RISC (com algumas modificações). Este chip opera, normalmente, com tensão de alimentação de 1,8v a 5,5v.

Do total de 28 pinos da placa, 14 são responsáveis pela entrada/saída digital dos quais 6 podem ser usados como saída da MLP. Além desses pinos existem mais 6 encarregados pela entrada/saída analógica totalizando 20 pinos de entrada/saída.

Dois pinos, especificamente, representam o oscilador de cristal e tem como função fornecer um pulso de *clock*, necessário para sincronização, entre o dispositivo conectado e o chip Atmega. A pinagem da placa Arduino UNO pode ser vista na Figura 5.9.

O chip em questão possui um conversor analógico-digital (A/D) de 10 bits para que seja possível a interpretação de sinais analógicos. Com isso, ele consegue prover valores digitais em uma faixa que vai de 0 a 1023 (pois $2^{10} = 1024$).

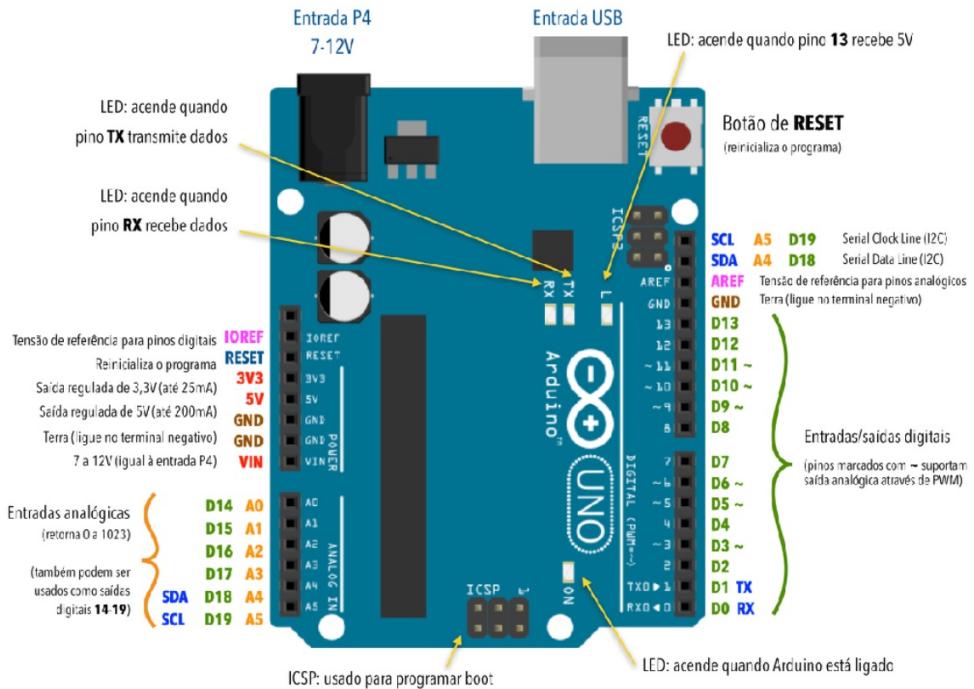


Figura 5.9: Pinagem da placa de Arduino UNO. Fonte: Portal Eletrônica para Artistas.

Este conversor possui três pinos característicos na placa: VIN, AREF e GND. O pino VIN nada mais é do que a fonte de alimentação necessária do conversor A/D. O pino AREF simboliza a tensão de referência utilizada no processo de conversão. Ou seja, quando a tensão analógica é superior à tensão de referência o nível lógico digital atribuído será 1. Para tensões abaixo da referência, o nível será 0. Por fim, o pino GND é o aterramento da fonte de alimentação.

O Servo motor entra em funcionamento ao receber um sinal PWM da placa que é normalmente obtido com o uso da função timer de um microcontrolador. Como o Arduino possui um gerador PWM de 8 bits, temos a nossa disposição até 256 sinais distintos (pois $2^8 = 256$). Fato este, que facilita bastante a configuração do projeto. Além disso, o Arduino possui uma biblioteca exclusiva para o Servo que se encarrega de manipular todos os cálculos de modulação. Com isso, temos apenas que discriminar o código para a rotação do ângulo do motor (de 0° a 180°) e o programa se encarrega de rotacionar o Servo pelo ângulo escolhido.

Por fim, o último pino a ser analisado é o de RESET. Sua função é possibilitar uma reinicialização manual do programa.

5.3 Arquitetura e Montagem do projeto

A primeira montagem do projeto, para fins de teste e estudo, foi feita com o uso de um *protoboard* além de todos os outros componentes já discriminados, vide Figura 5.10. Os objetivos alcançados nesta etapa foram: a calibração dos Servo motores por meio do código desenvolvido para que rotacionassem de forma adequada e a escolha final, após alguns testes, do diagrama esquemático do projeto. Este, encontra-se na Figura 5.11.

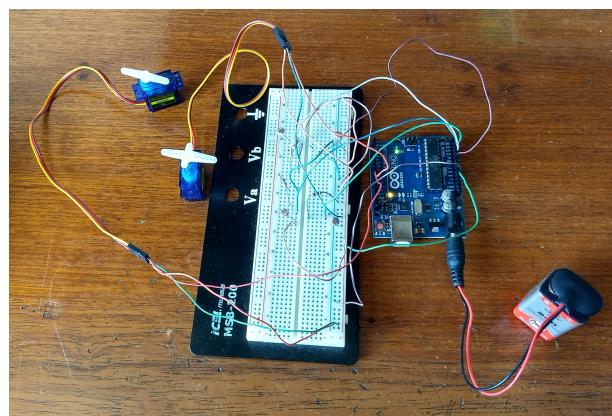


Figura 5.10: Simulação do projeto. Fonte: Elaboração própria.

Já na fase de construção do protótipo, a conexão dos Servo motores à placa do Arduino UNO se dá nos pinos digitais que possuem a capacidade de enviar sinais em *PWM*. Portanto, o Servo motor responsável pela rotação na horizontal é conectado ao pino 9 (Servo 2) e o Servo encarregado da rotação na vertical conecta-se ao pino 10 (Servo 1).

Em relação à energização do circuito, a pinagem utilizada é a responsável por suprir uma saída regulada de 5 *volts* ao projeto.

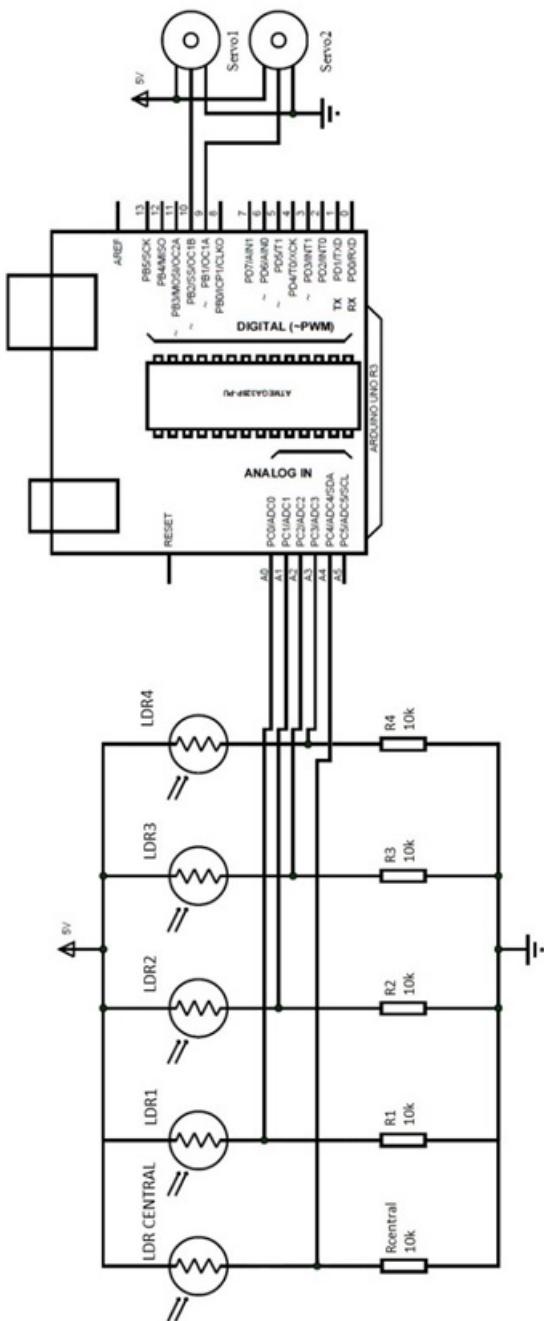


Figura 5.11: Diagrama esquemático do projeto. Fonte: Elaboração própria.

As entradas do sistema são analógicas e correspondem aos pinos A0, A1, A2, A3 e A4. Cada uma dessas entradas são relacionadas à uma posição específica dos sensores na placa. Desta forma: A0 diz respeito ao sensor localizado no canto esquerdo superior, A1 ao LDR no canto direito superior, A2 ao correspondente no canto esquerdo inferior, A3 ao sensor no canto direito inferior e, por fim, A4 é a conexão do sensor central o qual será utilizado na realização das medidas (vide Figura 5.12).

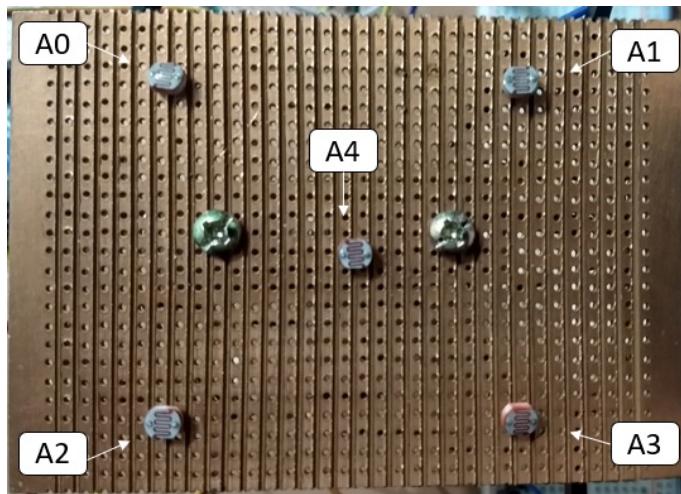


Figura 5.12: Posicionamento dos sensores. Fonte: Elaboração própria.

A programação foi realizada no ambiente de desenvolvimento próprio do Arduino, chamado Arduino IDE. A linguagem de programação utilizada foi a C++ (com pequenas modificações). O código pode ser acessado no Apêndice A.

A montagem do Rastreador Solar foi feita levando-se em consideração uma angulação inicial de 45° do protótipo. Para a montagem, foi utilizada uma estrutura metálica flexível e resistente que fosse ao encontro das demandas do projeto. Ademais, um *protoboard* foi novamente utilizado para facilitar as conexões dos pinos de VCC e GND entre a placa Arduino UNO e o circuito formado pelos sensores LDR. Uma base de madeira foi utilizada para dar sustentação aos componentes do projeto. Por fim, todas as ligações foram estabelecidas entre os componentes do sistema de forma a possibilitar seu funcionamento e a análise dos resultados do rastreamento. O protótipo final pode ser encontrado na Figura 5.13.

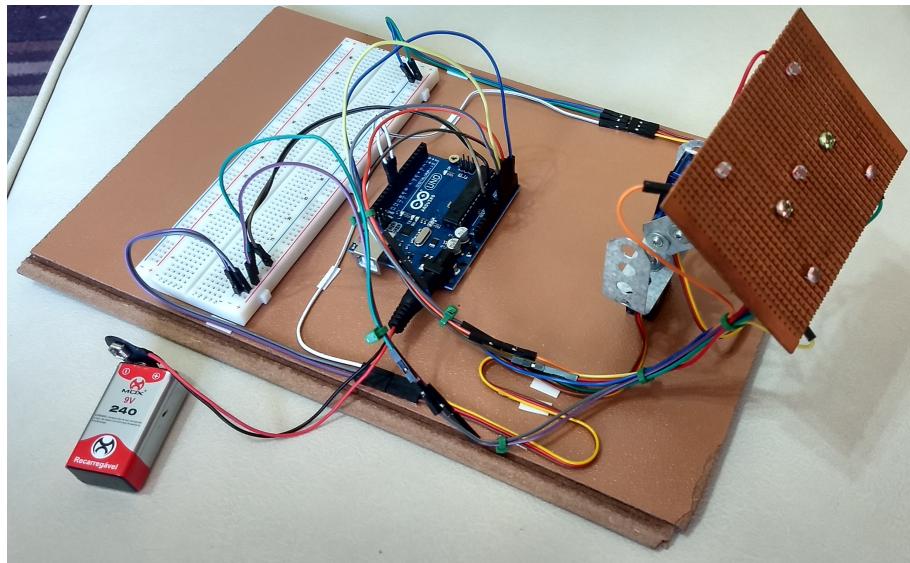


Figura 5.13: Configuração final do protótipo de Rastreador Solar. Fonte: Elaboração própria.

A Figura 5.14 detalha toda a estrutura metálica proposta para o projeto como forma de suporte para a rotação dos dois Servo motores acoplados aos sensores LDR.

Por fim, especificamente em relação à placa de Arduino UNO e à *protoboard*, a Figura 5.15 nos mostra todas as conexões realizadas. Vale ressaltar que Servo 1 refere-se ao responsável pelo movimento vertical e Servo 2 ao encarregado do movimento horizontal.

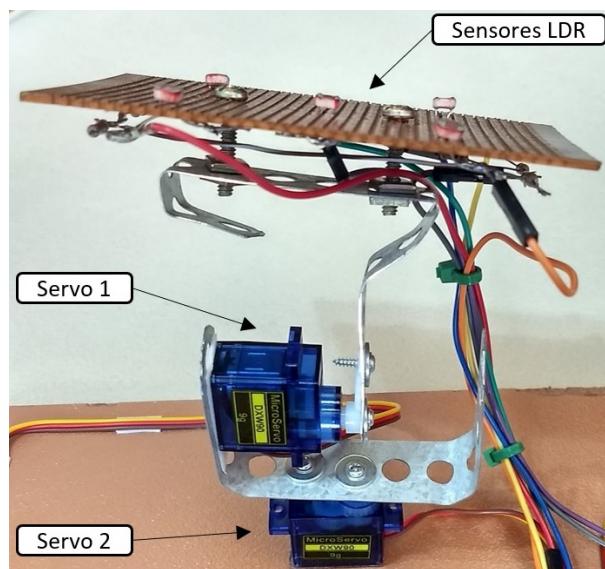


Figura 5.14: Vista da estrutura metálica com os Servos e sensores. Fonte: Elaboração própria.

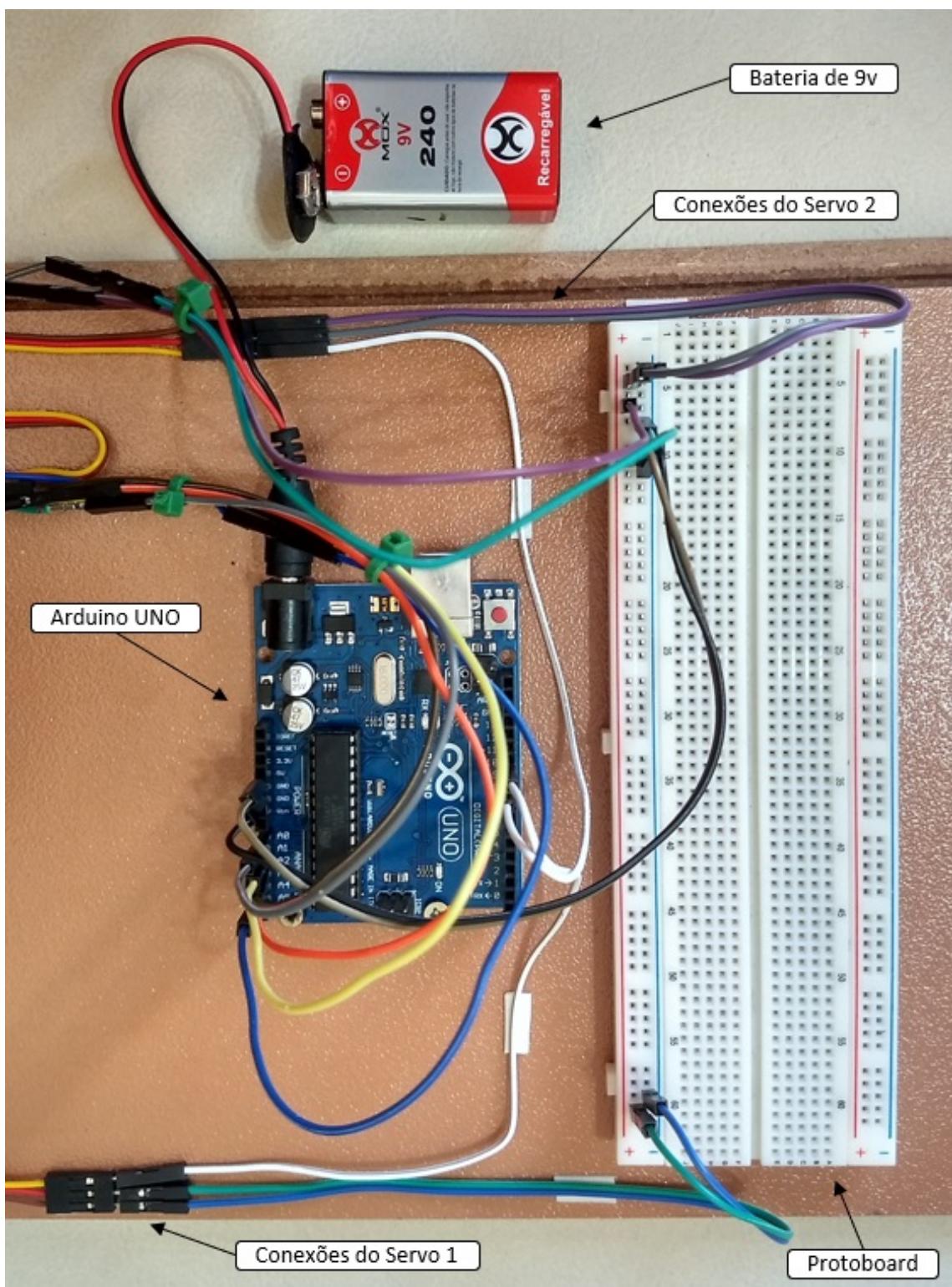


Figura 5.15: Vista da placa de Arduino UNO e protoboard. Fonte: Elaboração própria.

5.4 Ensaio proposto e resultados

Com o protótipo construído, a próxima etapa do projeto foi a realização dos testes com o intuito de avaliar a eficiência do sistema de Rastreamento Solar de dois eixos em comparação a uma estrutura de eixo fixo. Como pode ser visto na Figura 5.16, os ensaios foram realizados no telhado de um prédio no bairro da Tijuca, zona norte da cidade do Rio de Janeiro (Latitude -22.92 e Longitude -43.22). O experimento foi conduzido entre os dias 27 e 31 de janeiro de 2019. Durante esses dias o nascer do Sol ocorria em torno das 6h40 e o pôr do sol por volta das 19h40.

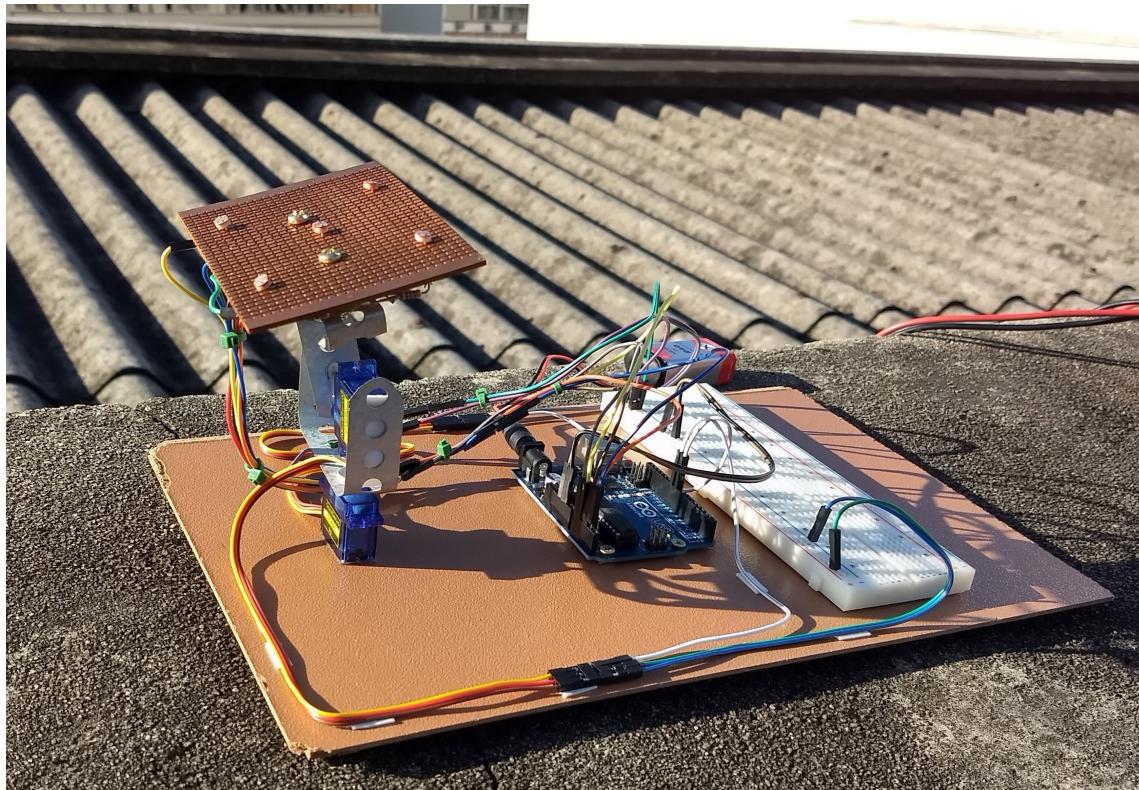


Figura 5.16: Vista do protótipo no momento do ensaio. Fonte: Elaboração própria.

A avaliação da intensidade de luz por meio dos sensores LDR faz com que tenhamos uma indicação válida da quantidade de energia que chega ao sistema. Neste caso, foram feitas medições da tensão de entrada analógica do microcontrolador referente ao sensor LDR central. O intervalo entre cada uma das medições foi de 60 minutos. Para este procedimento foi utilizado um multímetro digital da marca ICEL Manaus modelo MD-6510. Uma ilustração do processo utilizado para

a aquisição de dados encontra-se na Figura 5.17.

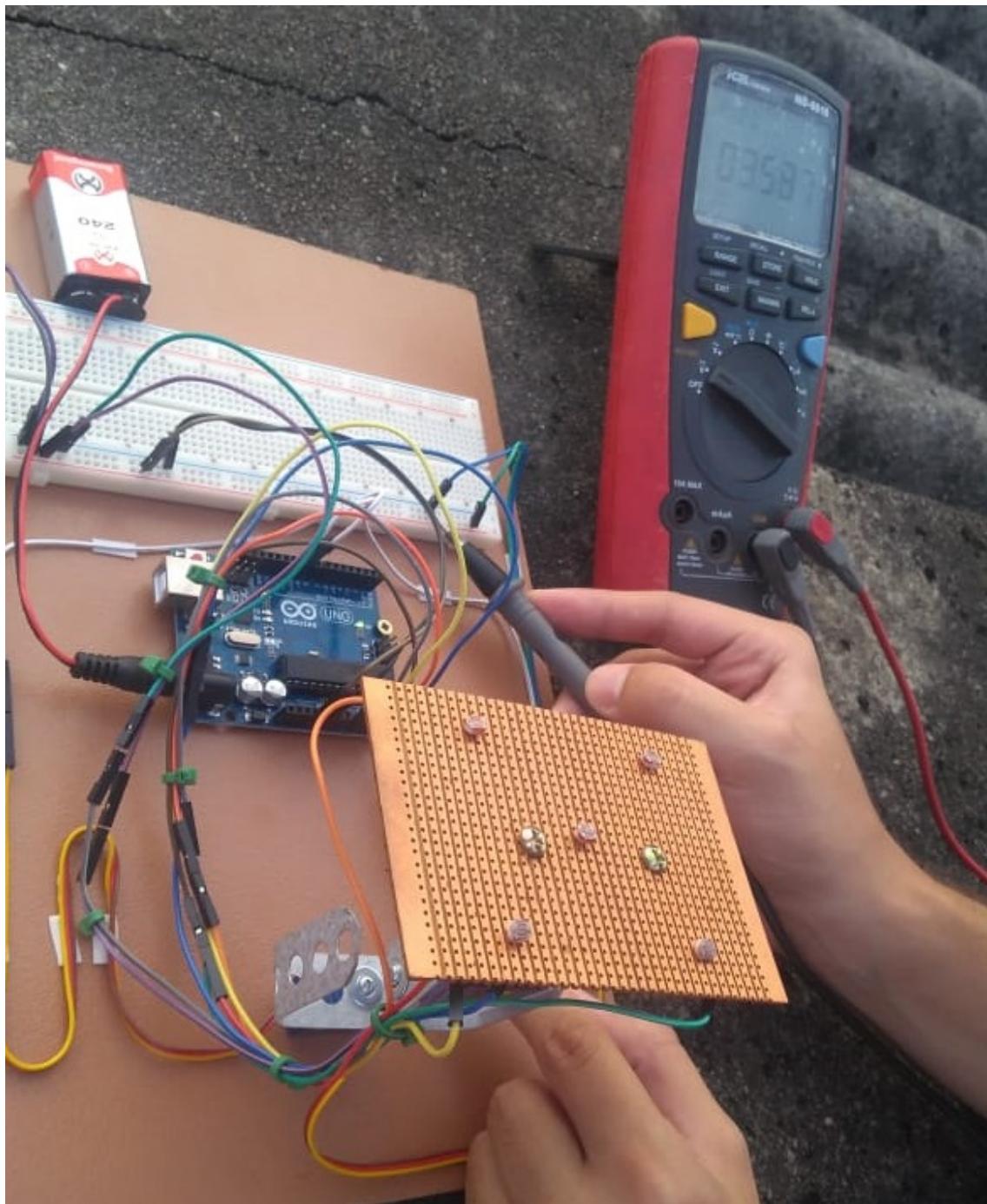


Figura 5.17: Demonstração da coleta de dados do ensaio. Fonte: Elaboração própria.

Como a tensão é diretamente proporcional à potência gerada pelo sensor, estas medições têm o intuito de nos mostrar a característica de rastreamento para cada um dos casos estudados. Além disso, a variação climática durante o dia serve como mais uma variável de comparação entre os diferentes valores adquiridos.

Os melhores dados foram coletados no dia 31 de janeiro de 2019. Na ocasião, tivemos um dia ensolarado, com pouquíssimas nuvens, e com uma temperatura máxima na região que chegou a atingir 32° Celsius. Dessa forma, todos os dados apresentados nesta seção são relativos a esse dia.

A Tabela 5.1 especifica os resultados encontrados tanto para o ensaio realizado com o Seguidor Solar de dois eixos, em funcionamento de acordo com o código presente no Apêndice A, quanto para o sistema de eixo fixo. Vale ressaltar que para a realização das medições com o eixo do protótipo fixo, algumas partes do código elaborado foram apagadas. O objetivo foi interromper a movimentação dos Servo motores para que os sensores LDR pudessem permanecer na mesma posição durante todo o processo de medição.

Tabela 5.1: Valores obtidos no ensaio do dia 31/01/19. Fonte: Elaboração própria.

HORÁRIO	2 EIXOS (volts)	FIXO (volts)
6:30	4.287	3.597
7:30	4.562	3.812
8:30	4.648	4.220
9:30	4.704	4.356
10:30	4.826	4.659
11:30	4.912	4.893
12:30	4.935	4.907
13:30	4.986	4.914
14:30	4.962	4.889
15:30	4.830	4.476
16:30	4.727	4.187
17:30	4.575	3.843
18:30	4.295	3.429
19:30	3.957	3.115

Com os valores obtidos foi plotado um gráfico da tensão medida no sensor durante o dia do experimento, vide Figura 5.18. Dessa forma, constata-se que no momento em que o Sol está a pino, ou seja, em torno das 13 horas, no horário de verão, a tensão do sensor praticamente torna-se equivalente nas duas configurações propostas. Para os horários fora deste período é nítido uma melhor captação do sensor no sistema de Rastreamento Solar com 2 eixos.

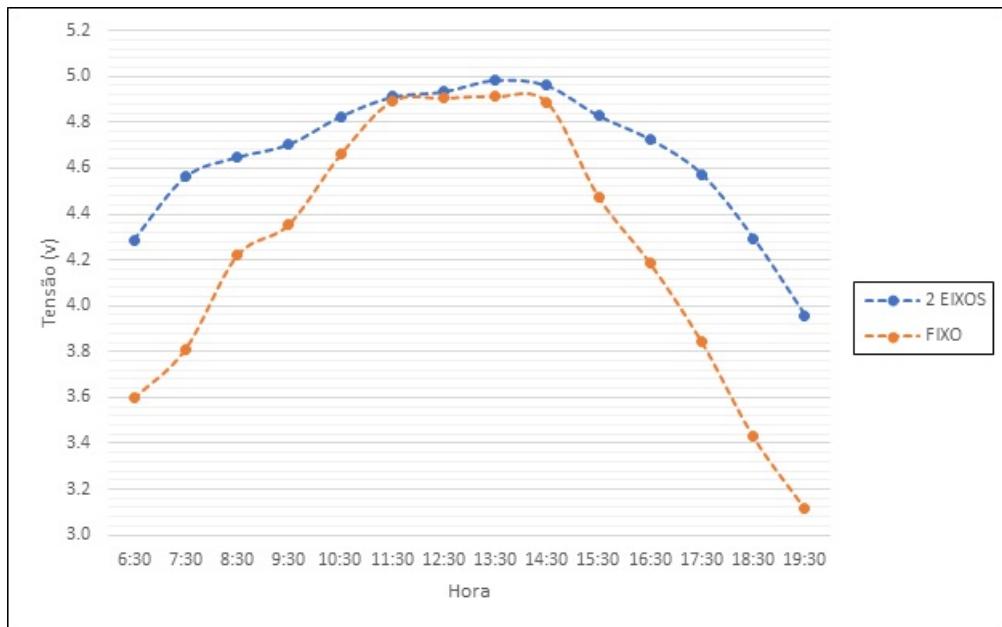


Figura 5.18: Tensão do sensor LDR central obtida durante o ensaio. Fonte: Elaboração própria.

Como forma de compararmos os dois sistemas foi obtido o valor médio de tensão em relação a um dia inteiro para os dois casos aqui estudados. A Equação 5.2 traz a fórmula utilizada para essa comparação e a Tabela 5.2 apresenta os valores obtidos.

$$\text{Média (\%)} = \frac{\text{Valor médio (volts)}}{5 \text{ volts}} \times 100 \quad (5.2)$$

Tabela 5.2: Valor médio de tensão para cada caso estudado. Fonte: Elaboração própria.

MÉDIA	
2 EIXOS	93,15%
FIXO	84,71%

Com uma simples subtração entre os valores calculados temos que a diferença entre as médias é de 8,44%. Este fato, portanto, corrobora o pressuposto de que o sistema de Rastreamento Solar com 2 eixos possui uma capacidade de absorção de luminosidade maior que o modelo com eixo fixo.

Capítulo 6

Conclusões

O trabalho teve como objetivo projetar, montar e constatar a eficiência de um protótipo de Seguidor Solar de dois eixos em relação a um sistema de eixo fixo. Com isso, os valores captados pelos sensores serviram de entrada para uma lógica de comparação que tinha o objetivo de constatar se existia uma diferença significativa entre os valores obtidos. Caso existisse, o microcontrolador atuava enviando sinais para rotacionar os Servo motores do projeto. Este processo se repetia até que a diferença entre os valores adquiridos pelos sensores fosse mínima. De forma geral, este sistema consistia de, basicamente, três estágios principais:

- Um estágio de entrada responsável por converter os raios solares em valores de tensão;
- Um estágio de controle encarregado de colaborar com as tomadas de decisão do sistema;
- E um estágio final para o acionamento ou não dos Servo motores.

Após a montagem prática foi analisada a média dos valores de tensão obtidos durante cinco dias levando-se em consideração dois tipos de ensaio – um com um Seguidor Solar de 2 eixos e outro com um Seguidor Solar de eixo fixo. Como o ensaio com o rastreador de dois eixos teve um resultado mais expressivo – 8,44% a mais

de média das tensões – constatou-se que o modelo construído foi ao encontro do seu propósito, mesmo levando em conta sua estrutura física não tão robusta.

Durante o desenvolvimento do projeto alguns obstáculos foram encontrados. Um dos mais relevantes diz respeito à constatação de que uma quantidade significativa de sombreamento pode ser um fator preponderante para a diminuição dos efeitos do rastreamento do Sol. Isto ocorre porque as nuvens dificultam a coleta de luz pelos sensores na medida em que bloqueiam os raios solares.

Do ponto de vista energético constatou-se que os sistemas com Seguidor Solar representam uma solução mais eficiente e vantajosa do que os de eixo fixo. Já do ponto de vista financeiro os custos com o aparato móvel, a instalação e a manutenção do equipamento podem se tornar um fator relevante para a escolha dessa tecnologia. Além disso, as condições climáticas do local de instalação também devem ser levadas em conta na hora do estudo de viabilidade.

Tendo em vista a evolução deste projeto recomenda-se um estudo mais detalhado durante um período maior de tempo para verificação do efeito das estações do ano no sistema. Além disso, seria interessante a construção de um modelo em tamanho real, com painel fotovoltaico acoplado, para que uma avaliação de uma estrutura mais robusta e que demande mais potência seja realizada. Por fim, um estudo da viabilidade econômica de um rastreador solar para diferentes ambientes – rural, industrial e urbano, por exemplo – traria informações importantes sobre a aplicabilidade desta tecnologia.

Ao desenvolver esta atividade diversos conceitos fundamentais para a execução de um projeto foram praticados, como: o efeito de influências externas com o intuito de ajustar o projeto e a busca por soluções alternativas que se adequem a um orçamento mais modesto. Além disso, este trabalho cumpriu seu dever de aplicar em uma situação real conhecimentos adquiridos durante a graduação, visto o uso de programação, dimensionamento de componentes e construção de circuitos eletrônicos.

Referências Bibliográficas

- [1] ONS. *Boletim Mensal de Geração Solar Fotovoltaica*. Dezembro/2018.
- [2] FOLHA DE S.PAULO. “Brasil já está entre os 30 maiores geradores de energia fotovoltaica”. 2018. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2018/09/brasil-ja-esta-entre-os-dez-maiores-geradores-de-energia-fotovoltaica.shtml>>. Acesso em: 17/02/2019.
- [3] PORTAL G1. “Brasil deve ampliar capacidade de energia solar em 115% em 2018, diz associação”. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2018/08/29/brasil-deve-ampliar-capacidade-de-energia-solar-em-115-em-2018-diz-associacao.ghtml>>. Acesso em: 17/02/2019.
- [4] ABSOLAR. “Geração Centralizada Solar Fotovoltaica no Brasil”. 2018. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138781/66357670/2018.03.15+ABSOLAR+-+Energia+Solar+Fotovoltaica+-+Ricardo+Barros+-+Vers%C3%A3o+Final.pdf/77b569b6-1941-4af0-867e-38d9ddf12e01>>. Acesso em: 17/02/2019.
- [5] LEWIS, N. S. *Basic research needs for solar energy utilization*. Report of the basic energy sciences workshop on solar energy utilization, CALTECH - California Institute of Technology, Pasadena, CA, 2005.
- [6] FEKSA RAMOS, L. *Metodologia detalhada para rastreadores solares automatizados de dois eixos em sistemas fotovoltaicos autônomos*. v. 1, Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- [7] DIAS SILVA, L. V. *Análise técnico-econômica de uma Minigeração Fotovoltaica Conectada à Rede no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro*. v. 1, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.
- [8] TREVELIN, F. C. *Estudo comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos*. v. 1, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

- [9] SANJUAN, L. B. T. *Desenvolvimento de um rastreador solar para placas fotovoltaicas*. v. 1, Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2013.
- [10] PRADO, G. O., ULHOA, T. F., DAMASCENO, J. J. R., ET AL. “ESTADO DA ARTE EM MECANISMOS DE RASTREAMENTO SOLAR”. In: *XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, Florianópolis, SC, Brasil, 2014. 19-22 outubro 2014.
- [11] DARWIN, C., DARWIN, F. “The Power of Movement in Plants.” *New York: D. Appleton & Co.*, 1881. 1 ed.
- [12] DOS SANTOS, A. M. *Importância do heliotropismo e da disponibilidade hídrica no desenvolvimento de Macroptilum lathyroides (L) Urb.* v. 1, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2004.
- [13] NETO, É. P., DA SILVA, G. J. P. *Protótipo de um Rastreador Solar Ativo de um Eixo*. v. 1, Instituto Federal Fluminense Campus-Centro, 2010.
- [14] CARVALHO, D. R. *Desenvolvimento de um rastreador solar biaxial*. v. 1, Universidade Federal de Viçosa, 2011.
- [15] WANG, J. M., LU, C. L. “Design and Implementation of a Sun Tracker with a Dual-Axis Single Motor for an Optical Sensor-Based Photovoltaic System”, *Sensors*, v. 13, pp. 3157–3168, 2013.
- [16] LIRA, J. R. V. *Desenvolvimento de um Rastreador Solar do Tipo Polar com Ajuste do Ângulo de Inclinação*. v. 1, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.
- [17] OTIENO, O. R. *Solar Tracker for Solar Panel*. v. 1, UNIVERSITY OF NAIROBI, 2015.
- [18] WENDLING, M. *Notas de aula “Sensores”*. Universidade Estadual Paulista, 2010.

Apêndice A

Código do protótipo de 2 eixos

```
#include <Servo.h> // comando para incluir biblioteca do Servo

Servo horizontal; // Servo da horizontal

int servoh = 90; // variavel para armazenar a posicao do Servo horizontal

int servohLimitHigh = 180; // limite maximo que o servo horizontal rotaciona
int servohLimitLow = 65; // limite minimo que o servo horizontal rotaciona

Servo vertical; // Servo da vertical

int servov = 90; // variavel para armazenar a posicao do Servo vertical

int servovLimitHigh = 120; // limite maximo que o servo vertical rotaciona
int servovLimitLow = 15; // limite minimo que o servo vertical rotaciona

// pinagem analogica dos LDRs

int ldrlt = 2; // LDR em cima a esquerda
int ldrrt = 3; //LDR em cima a direita
int ldrld = 0; //LDR em baixo a esquerda
int ldrrd = 1; //LDR em baixo a direita
```

```

int ldrcenter = 4; //LDR central para medicao

void setup() //codigo de configuracao para executar uma vez
{
    Serial.begin(9600); // inicia comunicacao serial com uma taxa de 9600 bps

    // conexoes digitais (PWM) do Servo
    horizontal.attach(9); // pino de saida do Servo horizontal
    vertical.attach(10); // pino de saida do Servo vertical
    horizontal.write(180); // move o eixo do Servo horizontal
    vertical.write(45); // move o eixo do Servo vertical
    delay(3000);

}

void loop() //codigo principal para executar de forma repetida
{
    //leitura dos valores dos sensores (valor entre 0 e 1023)
    int lt = analogRead(ldrlt); // LDR em cima a esquerda
    int rt = analogRead(ldrrt); // LDR em cima a direita
    int ld = analogRead(ldrld); // LDR em baixo a esquerda
    int rd = analogRead(ldrrd); // LDR em baixo a direita
    int center = analogRead(ldrcenter); //LDR central

    int dtime = 10; // valor do delay entre as rotacoes do Servo
    int tol = 20; // valor estabelecido de tolerancia

    int avt = (lt + rt) / 2; // media das leituras dos LDRs de cima
    int avd = (ld + rd) / 2; // media das leituras dos LDRs de baixo
    int avl = (lt + ld) / 2; // media das leituras dos LDRs a esquerda
}

```

```

int avr = (rt + rd) / 2; // media das leituras dos LDRs a direita

int dvert = avt - avd; // checa a diferenca entre as medias de cima e baixo
int dhoriz = avl - avr; // checa a diferenca entre as medias da esq e dir

// print dos valores no Monitor Serial
Serial.print(avt);
Serial.print(' ');
Serial.print(avd);
Serial.print(' ');
Serial.print(avl);
Serial.print(' ');
Serial.print(avr);
Serial.print(' ');
Serial.print(center);
Serial.print(' ');
Serial.print(dtime);
Serial.print(' ');
Serial.print(tol);
Serial.println(' ');

delay(50); // pequeno delay para que possamos realmente ver os numeros

if (-1*tol > dvert || dvert > tol) // verifica se a diferenca esta dentro da
tolerancia senao muda o angulo do Servo vertical

{
    if (avt > avd)
    {
        servov = ++servov;
        if (servov > servovLimitHigh)

```

```

    {
        servov = servovLimitHigh;
    }

}

else if (avt < avd)
{
    servov= -servov;
    if (servov < servovLimitLow)
    {
        servov = servovLimitLow;
    }
}

vertical.write(servov);
}

if (-1*tol > dhoriz || dhoriz > tol) // verifica se a diferenca esta dentro da
tolerancia senao muda o angulo do Servo horizontal

{
    if (avl > avr)
    {
        servoh = -servoh;
        if (servoh < servohLimitLow)
        {
            servoh = servohLimitLow;
        }
    }
}

else if (avl < avr)
{
    servoh = ++servoh;
}

```

```

if (servoh > servohLimitHigh)
{
    servoh = servohLimitHigh;
}
}

else if (avl = avr) // checa se a media dos LDRs na esquerda e igual a media
dos LDRs na direita
{
    // nenhum comando
}
horizontal.write(servoh);
}

delay(dtime);

}

```