

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS-UFAL
CAMPUS SERTÃO
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ARMELINO COSTA NETO

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE RASTREADOR SOLAR COM
DOIS EIXOS DE BAIXO CUSTO PARA PANÉIS FOTOVOLTAICOS**

DELMIRO GOUVEIA-AL

2018

ARMELINO COSTA NETO

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE RASTREADOR SOLAR COM
DOIS EIXOS DE BAIXO CUSTO PARA PANÉIS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção como parte dos requisitos exigidos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. MSc. Francirley Paz da Silva.

DELMIRO GOUVEIA - AL

2018

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus Sertão
Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza – CRB-
4/2209

C838d Costa Neto, Armelino

Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar com dois eixos de baixo custo para painéis fotovoltaicos / Armelino Costa Neto. – 2018.

73 f. : il.

Orientação: Prof. Me. Francirley Paz da Silva.

Monografia (Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Alagoas. Curso de Engenharia de Produção. Delmiro Gouveia, 2018.

1. Engenharia da produção. 2. Rastreador solar - Sistema . 3. Protótipo. 4. Energia fotovoltaica. 5. Energia solar. I. Título.

CDU: 658.511.3

Folha de Aprovação

AUTOR: ARMELINO COSTA NETO

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE RASTREADOR SOLAR COM DOIS
EIXOS DE BAIXO CUSTO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao corpo docente do Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão e aprovado em 17 de dezembro de 2018.



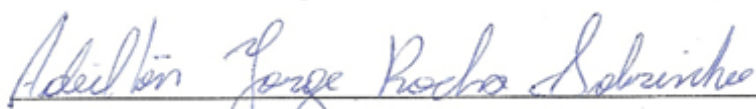
Prof. Prof. Francirley Paz da Silva, UFAL

(Orientador)

Banca Examinadora:



Prof. MSc Victor Diogho Heuer de Carvalho - Campos do Sertão - UFAL



Engenheiro Eletricista Adeilton J. Rocha Sobrinho - Campos do Sertão - UFAL



Prof. MSc Francirley Paz da Silva - Campos do Sertão - UFAL

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, que me deu todo o apoio e suporte possível para que eu pudesse cursar e concluir este curso, em especial a minha mãe Edileide que sempre fez muito mais do que o necessário para que eu atingisse o sucesso.

Aos meus amigos e colegas que fui adquirindo ao decorrer de todo o curso, os quais individualmente tiveram grande peso e importância durante toda a jornada da minha graduação me fazendo evoluir cada vez mais, seja pessoal ou profissionalmente, dos quais pretendo levar alguns para a vida toda.

Aos técnicos de laboratório Paull, Eduardo e Adeilton que me deram grande suporte e auxílio durante a construção do meu projeto e que considero amigos que pretendo levar para a vida.

A todos os professores do curso de Engenharia de Produção do Campus Sertão, onde em meio a excelentes professores levo alguns como amigos daqui para frente.

Ao meu orientador por todo auxílio, paciência e credibilidade dado a mim para o desenvolvimento deste trabalho, assim como o despertar do interesse e gosto na área de automação e energias renováveis.

E por fim, mas não menos importante, a todas as pessoas que de alguma forma, direta ou indiretamente, me tornaram a pessoa que eu sou hoje, vendo o mundo da maneira que eu vejo e conseqüentemente conquistando tudo que eu conquistei até agora.

RESUMO

Atualmente rastreadores solares de diferentes tipos e modelos são utilizados como alternativa para um melhor aproveitamento da irradiação solar provida pelo Sol incidente em painéis fotovoltaicos, ocasionando conseqüentemente uma maior geração energética. Este trabalho tem por objetivo desenvolver e analisar o comportamento e desempenho de um protótipo de rastreamento solar fotovoltaico de baixo custo. O projeto desenvolvido foi baseado no modelo de dois eixos tendo elevação solar e inclinação azimutal contando com uma plataforma Arduino sendo utilizada com a implementação de um algoritmo para rastreamento do máximo ponto de incidência solar na superfície do painel fotovoltaico ao decorrer do horário solar, o que através da análise comparativa da geração fotovoltaica com e sem o sistema móvel obteve-se as curvas de eficiência para os dois modelos de rastreamento. Os resultados dessa análise indicam que o controle da posição do módulo fotovoltaico em função do posicionamento azimutal fixo contribuíra no aumento de aproximadamente 26,21% da radiação incidente no painel em média ao longo de um dia parcialmente nublado.

Palavras-chave: Protótipo, Arduino, Rastreador solar, Painel fotovoltaico, Baixo custo.

ABSTRACT

Solar trackers of different types and models are used as an alternative to take advantage of solar irradiation provided by the sun incident on photovoltaic panels, resulting in a greater energy generation. This work aims to developed and analyzed the behavior and performance of a low cost solar photovoltaic tracker prototype. The developed project was based on the sunlight model and its slope was conducted with an Arduino platform being used with the implementation of an algorithm for the tracking of the solar soil on a surface of the photovoltaic panel during the solar time, which through the analysis comparative analysis of photovoltaic generation with and without the moving system were obtained as efficiency curves for the two tracking models. The results of this analysis were analyzed by controlling the position of the photovoltaic module as a function of azimuthal positioning. The purpose of this control was in no way 26,21% of the radiation incident on any plane on average over a cloudy day.

Key words: Prototype, Arduino, Solar tracker, Photovoltaic panel, low cost.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico da evolução de instalações fotovoltaicas por região.....	16
Figura 2 – Gráfico do fotoperíodo em horas durante o ano.....	20
Figura 3 – Trajetória elíptica da terra e suas estações do ano.....	21
Figura 4 – Representação dos solstícios, equinócios e zênite em relação a superfície terrestre.	21
Figura 5 – Curva característica I-V de um painel fotovoltaico.....	24
Figura 6 – Variação da curva característica I-V de um painel fotovoltaico a partir de irradiação incidente e temperatura.	25
Figura 7 – Variação da curva característica I-V de um painel fotovoltaico a partir do modo de associação entre as células.	25
Figura 8 – Exemplo de painel solar situado no hemisfério sul com face apontada para o norte verdadeiro.	27
Figura 9 – Exemplo de correção de orientação no Norte e Sul verdadeiro dada uma declinação magnética de -20°	27
Figura 10 – Exemplo sistema fotovoltaico off-grid.....	29
Figura 11 – Exemplo sistema fotovoltaico on-grid.....	30
Figura 12 – Exemplo sistema fotovoltaico híbrido.	30
Figura 13 – Exemplo de rastreador solar com eixo horizontal Leste-Oeste. ...	32
Figura 14 – Exemplo de rastreador solar com eixo horizontal Norte-Sul.....	34
Figura 15 – Exemplo de rastreador solar polar com eixo Norte-Sul.	35
Figura 16 – Exemplo de rastreador solar azimutal.	36
Figura 17 – Exemplo de rastreador com eixo horizontal e base giratória.....	37
Figura 18 – Sistemática do projeto.	39
Figura 19 – Painel fotovoltaico utilizado no ensaio.....	40
Figura 20 – Desenho técnico da estrutura em PVC do rastreador solar de baixo custo.....	42
Figura 21 – Placa Arduino uno R3.....	43
Figura 22 – Motor de passo 28BYJ-48 e controlador ULN2003a.	44
Figura 23 – Gráfico da resistência em função da iluminância de um LDR.	45
Figura 24 – Gráfico da resposta relativa em função do comprimento de onda de um LDR.	45
Figura 25 – Fluxograma do algoritmo usado na programação do rastreador. .	47

Figura 26 – Corrente em função do tempo do painel com sistema de rastreamento fixo.....	50
Figura 27 – Corrente em função do tempo do painel com sistema de rastreamento de dois eixos.	50
Figura 28 – Comparativo da corrente em função do tempo do painel com sistema de rastreamento fixo e com sistema de dois eixos.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – TOP 10 países para instalações e capacidade total instalada fotovoltaica em 2017.	17
Tabela 2 - Alguns tipos de painéis fotovoltaicos existentes.	23
Tabela 3 – Especificações técnicas dos painéis fotovoltaicos utilizados no ensaio.....	40
Tabela 4 – Materiais usados na construção da parte eletrônica do rastreador solar.	41
Tabela 5 – Ligação dos componentes no Arduino Uno R3.....	43
Tabela 6 – Custo monetário total estimado do sistema de rastreamento.	48
Tabela 7 - Condições climáticas no dia do ensaio	49
Tabela 8 – Energia elétrica gerada estimada pelos painéis fotovoltaicos com sistema de rastreamento fixo e rastreamento com dois eixos.....	52
Tabela 9 – Tempo de acionamento e consumo dos componentes eletrônicos do protótipo.	53
Tabela 10 – Energia elétrica gerada estimada pelos painéis fotovoltaicos com sistema de rastreamento fixo e rastreamento com dois eixos considerando consumo do sistema.	53
Tabela 11 – Comparativo entre rastreadores desenvolvidos na literatura.	54
Tabela 12 – Comparativo entre o rastreador desenvolvido e o rastreador da literatura.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEA	International Energy Agency
PVPS	Photovoltaic Power Systems
TACS	Tracking and control system
I-V	Corrente versus Tensão
FF	Fill Factor
m-Si	Silício Monocristalino
p-Si	Silício Policristalino
a-Si	Silício Amorfo
CdTe	Telureto de Cádmio
CIS	Disselento de Cobre e índio
CIGS	Disselento de cobre, índio e gálio
CPV	Concentrated Photovoltaics
DSSC	Dye-Sensitized Solar Cell
OPV	Organic Photovoltaics
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
NOAA	National Centers for Environmental Information
LDR	Light Dependent Resistor

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Corrente elétrica
i	Tensão elétrica
I_L	Corrente fotogerada
I_0	Corrente de saturação reversa do diodo
n	Fator de idealidade do diodo
q	Carga do elétron
k	Constante de Boltzmann
T	Temperatura absoluta em kelvin
θ_s	Ângulo de incidência direta
δ	Ângulo de declividade terrestre
ω	Ângulo horário
β	Ângulo de inclinação do painel solar
θ_z	Ângulo do zênite
γ	Ângulo do azimute da superfície
γ_s	Ângulo do azimute solar
r	Reta auxiliar paralela ao plano local
n	Reta normal ao plano
s	Reta da Terra ao centro do Sol
Z	Zênite local
ϕ	Latitude local
γ	Ângulo de azimute
θ	Ângulo de incidência direta

α Ângulo de inclinação

SUMÁRIO

1. Introdução	16
1.1 Crescimento da geração fotovoltaica	16
1.2 Problema	18
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivos gerais	18
1.3.2 Objetivos específicos	19
1.4 Justificativa	19
2. Fundamentação	20
2.1 Sistema de Trajetória Solar e Irradiação Solar	20
2.2 Fundamentos de energia fotovoltaica	22
2.2.1 Breve histórico dos painéis fotovoltaicos	22
2.2.2 Características de painéis fotovoltaicos.....	24
2.2.3 Posicionamento dos painéis fotovoltaicos	26
2.2.4 Instalação de painéis fotovoltaicos.....	27
2.2.4.1 Sistemas Off-Grid	28
2.2.4.2 Sistemas On-Grid	29
2.2.4.3 Sistemas híbridos	30
2.3 Sistemas de rastreamento solar.....	31
2.3.1 Sistema de rastreador solar de um eixo	31
2.3.1.1 Rastreador com eixo Leste-Oeste	31
2.3.1.2 Rastreador com eixo Norte-Sul.....	33
2.3.1.3 Rastreador com eixo polar	34
2.3.1.4 Rastreador azimutal	36
2.3.2 Rastreador solar de dois eixos.....	37
2.3.2.1 Rastreador com Eixo horizontal e base giratória	37

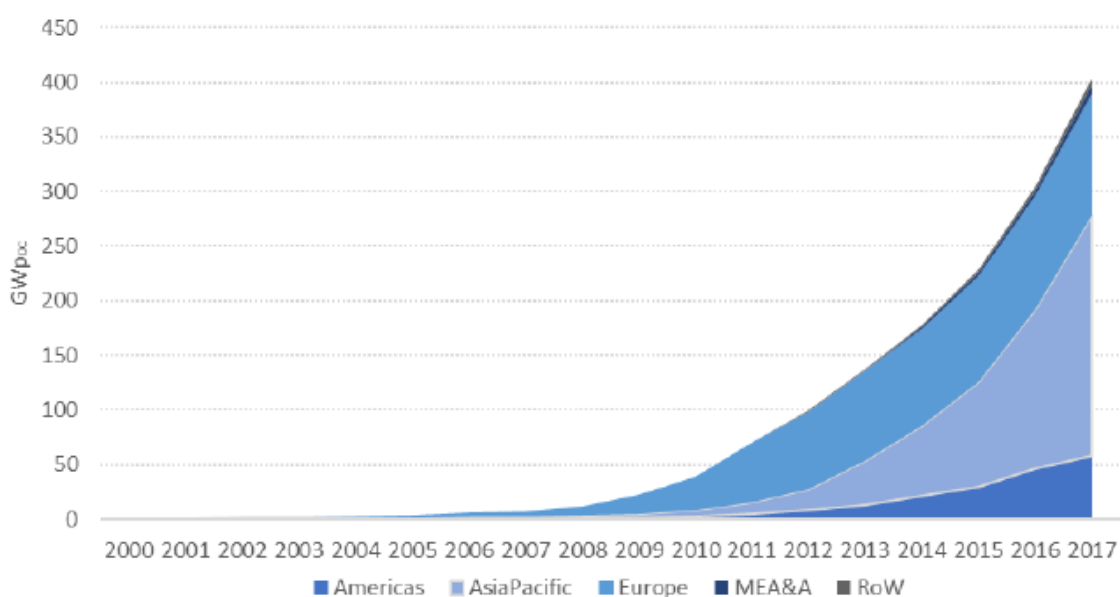
3. Rastreador solar de baixo custo com dois eixos horizontais: Leste-Oeste e Norte-Sul	38
3.1 Materiais e métodos utilizados	38
3.1.1 Estrutura	41
3.1.1.1 Base/Esqueleto	41
3.1.1.2 Arduino.....	42
3.1.1.3 Motor de passo	44
3.1.1.4 LDR.....	45
3.1.2 Método de funcionamento	46
3.1.3 Coleta de dados	47
3.2 Custos do sistema.....	48
4. Resultados e discussões	49
5. Conclusão	54
Referências.....	56

1. Introdução

1.1 Crescimento da geração fotovoltaica

Ao longo dos anos, conforme o aumento da população mundial cresceu também a demanda por energia elétrica assim como a poluição e o aquecimento gradativo do planeta devido principalmente ao uso de fontes de energia nocivas ao meio ambiente, sendo assim cada vez mais as fontes de energia limpa e renováveis vem ganhando espaço dentre as demais onde este vem se tornando um tema pertinente em pesquisa e desenvolvimento por universidades e empresas do ramo energético de maneira global. A energia solar é umas das principais fontes de energia renovável, já que pode ser usada em qualquer parte do globo que ofereça um determinado nível de incidência solar (que varia de acordo com a necessidade do usuário) e como descrito por Pinho et al., (2014) a média mundial de energia que é irradiada no globo é milhares de vezes maior do que a necessidade da população, o a que a torna uma opção com grande potencial.

Figura 1 - Gráfico da evolução de instalações fotovoltaicas por região.



Fonte: Snapshot os Global PV Markets, IEA PVPS, 2018.

Dados recentes da IEA mostram que desde o início do século 21 existe um crescimento exponencial no setor fotovoltaico mundial justamente pela procura crescente do desenvolvimento e aprimoramento de fontes de energia limpas, tornando-as cada vez mais eficientes e competitivas. (IEA PVPS, 2018)

Tabela 1 – TOP 10 países para instalações e capacidade total instalada fotovoltaica em 2017.

TOP 10 países para instalações de PV em 2017			TOP 10 países para capacidade instalada de PV em 2017		
1	China	53 GW	1	China	131 GW
2	EUA	10,6 GW	2	EUA	51 GW
3	Índia	9,1 GW	3	Japão	49 GW
4	Japão	7 GW	4	Alemanha	42 GW
5	Peru	2,6 GW	5	Itália	19,7 GW
6	Alemanha	1,8 GW	6	Índia	18,3 GW
7	Austrália	1,25 GW	7	Reino Unido	12,7 GW
8	Coréia	1,2 GW	8	França	8 GW
9	Reino Unido	0,9 GW	9	Austrália	7,2 GW
10	Brasil	0,9 GW	10	Espanha	5,6 GW

Fonte: Adaptado de Snapshot os Global PV Markets, IEA PVPS, 2018.

Com essa tendência mundial o Brasil não ficou de fora, e no ano de 2017 entrou no Ranking dos 10 países de instalada anual fotovoltaica, porém com potencial para se destacar ainda mais considerando que esta representa apenas 0,02% da sua matriz energética (ANEEL, 2017) como também pela sua localização privilegiada no globo e sua grande extensão territorial. (IEA PVPS, 2018)

1.2 Problema

A demanda de energia elétrica não só no Brasil, mas no mundo inteiro tende a ser cada vez maior abrindo caminhos para fontes de energia alternativa que possam vir a suprir esta necessidade, onde a geração de energia solar se torna grande alternativa para no território brasileiro, já que este recebe alta incidência de radiação em uma parte considerável de sua extensão territorial. (ATLAS SOLAR 2ªED, 2017)

O uso de placas fotovoltaicas por si só acaba não se tornando tão eficaz devido ao constante movimento do sol durante o dia e suas variações ao decorrer do ano. Para tal existem os sistemas de posicionamento móvel de placas fotovoltaicas, os quais movimentam a placa de acordo com a posição sol automaticamente, com objetivo de maximizar a eficiência dos painéis solares.

Um estudo na Turquia de Eke e Senturk (2012) mostrou que o sistema de posicionamento móvel com dois eixos teve uma eficiência de 30,79% a mais se comparado ao sistema de posicionamento fixo no período de abril de 2010 até março de 2011. Sendo assim, o desenvolvimento de um sistema de rastreamento solar de baixo custo e alta eficiência é uma das possibilidades para uma maior produção de energia a partir de placas fotovoltaicas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos gerais

O trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de rastreador solar de dois eixos automatizado de forma a comparar a geração energética entre os painéis e o rendimento do rastreador com uso de sensores de baixo custo e plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre.

1.3.2 Objetivos específicos

- Elaboração e desenvolvimento de um rastreador solar de dois eixos de baixo custo;
- Análise comparativa entre sistema fixo e protótipo do sistema móvel de geração fotovoltaica;
- Medição e análise da quantidade de energia gerada estimada pelo painel fotovoltaico com e sem o uso do protótipo de rastreador solar desenvolvido;
- Comparativo entre o protótipo desenvolvido e os demais rastreadores de baixo custo existentes na literatura.

1.4 Justificativa

O setor de geração de energia solar mostra-se com grande potencial de crescimento em um futuro próximo como é mostrado pela IEA PVPS (2018). Para tal, investimentos em pesquisa e desenvolvimento são indispensáveis para que todo o potencial oferecido por essa grande fonte de energia limpa e renovável seja de fato aproveitada.

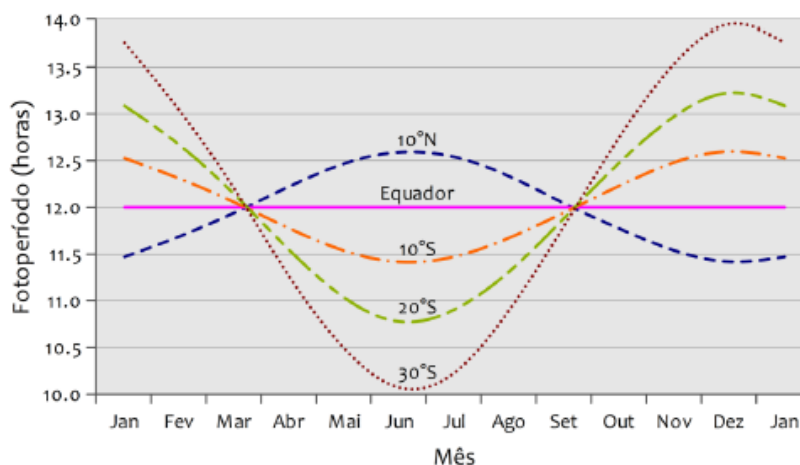
Investimentos para pesquisa e desenvolvimento em aumento de eficiência de produção de energia por parte das placas fotovoltaicas de forma isolada se tornam caros, e como se tem observado durante a evolução dos painéis solares, se faz necessário de muito tempo e recursos para um pequeno ganho em sua eficiência. Com base em Abdallah et al. (2004), Lorenzo et al. (2002), Vorobiev et al. (2004), Appleyard (2009), Sungur (2009) e Eke et al. (2012) o desenvolvimento e aprimoramento de rastreadores solares tornam-se uma ótima opção para um maior ganho de eficiência e um menor custo aplicado já que diversos estudos de campo como no atual trabalho vem demonstrando que seguidores solares junto a painéis fotovoltaicos chegam a fornecer um alto rendimento se comparado a um sistema fixo.

2. Fundamentação

2.1 Sistema de Trajetória Solar e Irradiação Solar

O movimento do sol aparente (movimento do sol percebido a partir de uma observação feita da terra) varia de acordo com o ponto em que se está no globo terrestre, variando também o tempo que o mesmo permanece visível durante o dia. (FILHO et al., 2012)

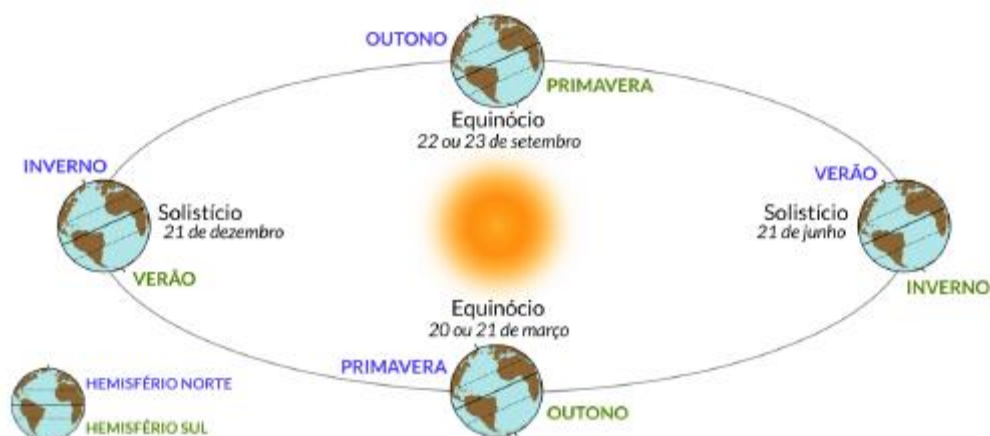
Figura 2 – Gráfico do fotoperíodo em horas durante o ano.



Fonte: Atlas Solar 2ªed, 2017.

O fotoperíodo pode ser definido como a quantidade de tempo em que um determinado local recebe incidência de luz solar ao longo de um dia. A variação desse tempo ao longo do ano de acordo com a localização no globo se dá pelo fato da Terra realizar um movimento elíptico ao redor do Sol havendo uma inclinação de $23^{\circ}27'$ ($23,5^{\circ}$) entre o plano do equador e o plano orbital terrestre, a qual é denominada obliquidade da eclíptica. (FILHO et al., 2012)

Figura 3 – Trajetória elíptica da terra e suas estações do ano.

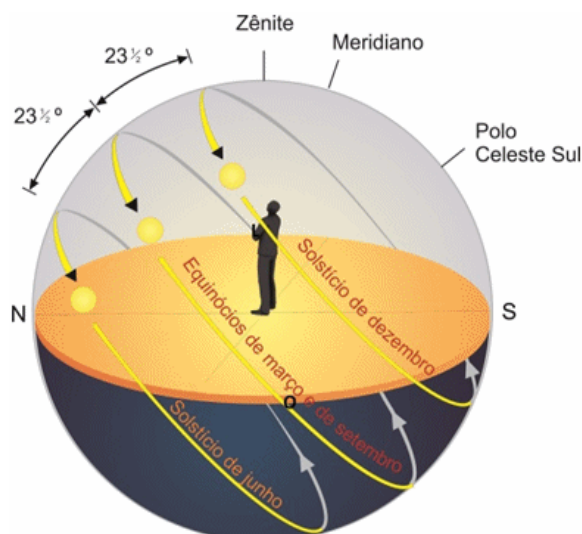


Fonte: Atlas Solar 2ªed, 2017.

Devido a esta inclinação as estações do ano são semelhantes no Equador e vão se tornando gradativamente mais distintas a medida em que nos afastamos do mesmo. Já na incidência solar no globo, onde devido também a inclinação do eixo de rotação terrestre, os pontos com latitude entre $-23,5^\circ$ e $+23,5^\circ$ são os que possuem uma maior incidência solar durante o ano. (PINHO et al., 2014)

Vale ressaltar que entre os Trópicos de Câncer e de Capricórnio, ou seja, entre as latitudes $-23,5^\circ$ e $+23,5^\circ$ o Sol passa pelo zênite duas vezes ao ano exceto sobre os mesmos onde isto ocorre apenas uma vez ao ano. (FILHO et al., 2012)

Figura 4 – Representação dos solstícios, equinócios e zênite em relação a superfície terrestre.



Fonte: Filho et al.,2012.

Como ilustrado na figura o zênite representa o ponto exatamente acima do observador, onde se imaginarmos uma reta Zênite-Observador a mesma seria ortogonal ao plano de observação.

Estando relacionada a vários fatores climáticos locais, a radiação solar, ou seja, a energia total incidente na superfície terrestre é uma variável crucial no que se diz respeito a geração de energia solar já que quanto maior a radiação solar incidente em um determinado local, maior será a geração de energia por parte dos painéis fotovoltaicos naquele mesmo local, porém a mesma está diretamente relacionada a obliquidade elíptica da terra, localização no globo, estações do ano e outros fatores mais assim como a incidência solar. (FILHO et al., 2012)

2.2 Fundamentos de energia fotovoltaica

2.2.1 Breve histórico dos painéis fotovoltaicos

Desde 1839 o efeito fotovoltaico é conhecido pelo homem, onde a partir daí passado dezenas de anos e milhares de estudos a respeito, a tecnologia vem crescendo e se tornando cada vez mais viável e acessível ao público em geral. (PINHO et al., 2014)

Por mais que este efeito tenha sido descoberto no século XIX, apenas em meados de 1950, no século XX, surgiu a primeira célula solar moderna, com humildes 2cm² de área, 6% de eficiência e 5mW de potência elétrica, o que mesmo parecendo pouco já era 12 vezes mais eficiente que a primeira célula criada. Como descrito por Vallêra e Brito (2006), este avanço foi possível graças a criação de um novo processo de difusão o qual introduzia impurezas em cristais de silício, obtendo assim controle sobre as propriedades elétricas do mesmo, resultando na primeira célula solar de silício moderna. (PINHO et al., 2014)

Desde então o ramo de painéis fotovoltaicos vem sendo cada vez mais estudados e aprimorados até os dias de hoje, onde estão disponíveis painéis de variados tipos, como:

Tabela 2 - Alguns tipos de painéis fotovoltaicos existentes.

Alguns tipos de painéis fotovoltaicos existentes	1° Geração	Silício Monocristalino (m-Si)
		Silício Policristalino (p-Si)
	2° Geração	Silício Amorfo (a-Si)
		Telureto de Cádmio (CdTe)
		Disselento de Cobre e Índio (CIS)
		Disselento de cobre, Índio e Gálio (CIGS)
	3° Geração (P&D)	Célula fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração (CPV)
		Células sensibilizadas por corante (DSSC)
		Células orgânicas ou poliméricas (OPV)

Fonte: Pinho et al., 2014.

Como o avanço no aumento da eficiência dos painéis fotovoltaicos produzidos não eram muito expressivos foram começando a surgir sistemas de posicionamento móvel e já em meados de 1980 começaram a surgir publicações de estudos como o de Pritchard (1983), no qual foi projetado, desenvolvido e avaliado um rastreador solar de dois eixos já fazendo o uso de um microcomputador baseado em um sistema de rastreamento e controle (TACS) sendo capaz de manter o painel fotovoltaico em sua potência de pico ajustando sua posição ao longo do dia.

Até os dias atuais os estudos foram se tornando cada vez mais frequentes com diversos modelos de rastreadores, seja de um ou dois eixos, com diversos métodos de rastreamento e eficiências que podem atingir valores próximos a 40% de rendimento a mais do que um sistema de posicionamento fixo como demonstrado por Trevelin (2012), onde nos dias atuais existem fornecedores que oferecem rastreadores que prometem rendimentos ainda maiores.

2.2.2 Características de painéis fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos de maneira geral apresentam comportamentos semelhantes, independente do que material do qual é constituída, e uma característica importante é a relação entre sua corrente elétrica e sua tensão, conhecida como curva I-V. Esta curva pode ser expressa por uma equação derivada da Equação de Shockley do diodo ideal, sendo ela: (PINHO et al., 2014)

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

Sendo:

I_L = Corrente fotogerada;

I_0 =Corrente de saturação reversa do diodo;

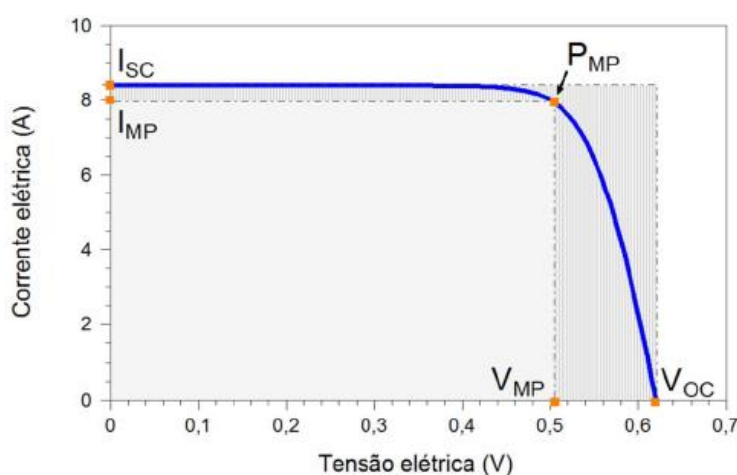
n =Fator de idealidade do diodo (Geralmente entre 1 e 2);

q =Carga do elétron;

k =Constante de Boltzmann;

T =Temperatura absoluta (kelvin).

Figura 5 – Curva característica I-V de um painel fotovoltaico.

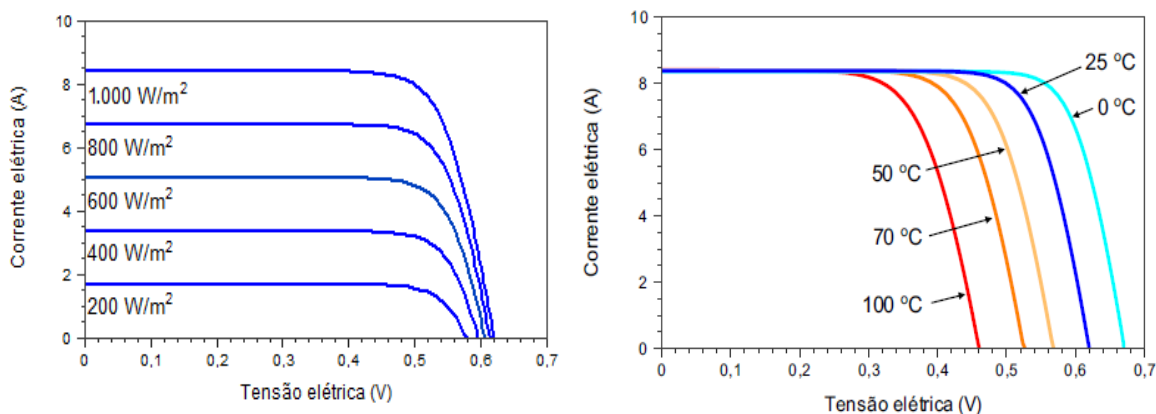


Fonte: Pinho et al., 2014.

O desempenho oferecido pelos painéis solares é afetado significativamente por parâmetros externos como a temperatura e irradiação

incidente na superfície da célula, fatores que refletem nitidamente na representação da curva I-V conforme variam. (PINHO et al., 2014)

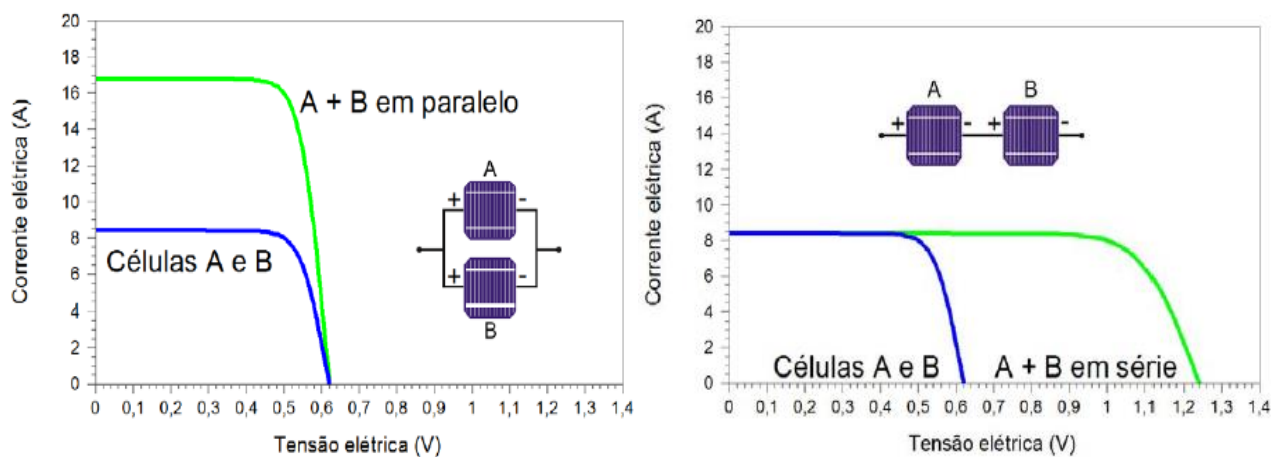
Figura 6 – Variação da curva característica I-V de um painel fotovoltaico a partir de irradiação incidente e temperatura.



Fonte: Pinho et al., 2014.

Assim como esta curva também é afetada pelo modo como as células são associadas, seja em série ou paralelo.

Figura 7 – Variação da curva característica I-V de um painel fotovoltaico a partir do modo de associação entre as células.



Fonte: Pinho et al., 2014.

Para painéis fotovoltaicos existe a constante FF, em português chamada de Fator de Forma ou Fator de Preenchimento, a qual segundo Pinho (2014) “é a grandeza que expressa quanto a sua curva característica se aproxima de um retângulo no diagrama I-V”, sendo esta expressa pela equação:

$$FF = \frac{V_{MP} \cdot I_{MP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (2.3)$$

2.2.3 Posicionamento dos painéis fotovoltaicos

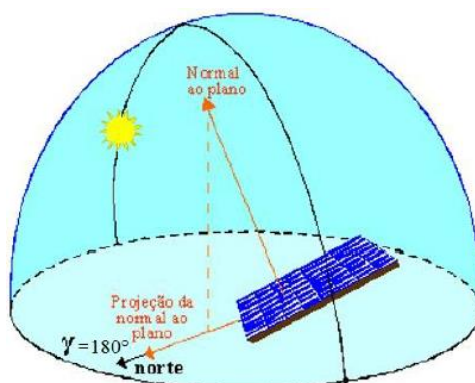
Durante os dias é claramente observado que a variação de incidência solar, na grande maioria da superfície terrestre tem variações significativas, fato que influencia diretamente na melhor posição de instalação de placas fotovoltaicas que fazem uso de um sistema fixo. (PINHO et al., 2014)

Os trabalhos de Tessaro (2006), Oliveira (2008), Eke e Senturk (2012), Heslop e MacGill (2014) e Trevelin (2014) mostram que o posicionamento do painel solar quando se trata de sistemas de rastreamento fixo, ou sua movimentação durante do dia referente a sistemas de posicionamento móvel, influenciam diretamente na eficiência energética do painel.

Como explica Kelly e Gibson (2009), grande parte da energia solar incidente sobre o planeta provém de luz solar direta e uma pequena parte é derivada de energia solar difusa, levando em consideração condições em que o céu esteja limpo. Para tais condições o melhor ângulo para instalação de placas fotovoltaicas (em sistemas fixos) é tendo inclinação igual a latitude do local em que está sendo feita a instalação. Por outro lado, condições climáticas que apresentem muitas nuvens e níveis mais elevados de poluição aumentam a quantidade de energia solar difusa, tornando a posição horizontal (sem nenhuma inclinação) da placa a melhor para geração de energia, obtendo um ganho de até 50% em captação se comparado a sistemas de dois eixos em mesmas condições. (KELLY et al., 2009)

Conforme abordado por Pinho et al. (2014), para uma maior eficiência do sistema, instalações que se situem no hemisfério Sul devem ter a face dos módulos apontadas para o norte verdadeiro e o contrário caso a instalação esteja situada no hemisfério norte, orientando a face do painel para o sul verdadeiro.

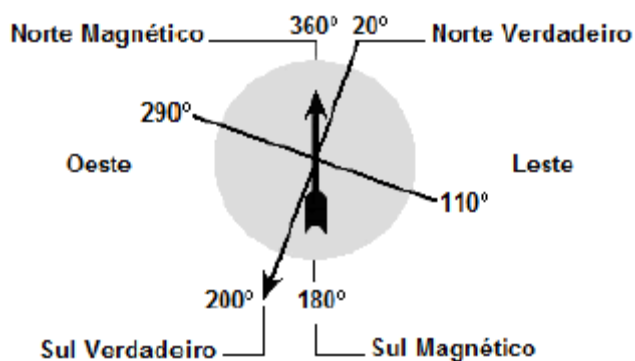
Figura 8 – Exemplo de painel solar situado no hemisfério sul com face apontada para o norte verdadeiro.



Fonte: Pinho et al., 2014.

Vale lembrar que em grande parte dos locais o Norte ou Sul verdadeiros não correspondem exatamente com o Norte ou Sul magnéticos, os quais são apontados por uma bússola. Sendo assim se torna necessária uma correção nesta orientação fazendo-se o uso da declinação magnética daquela localidade, a qual pode ser obtida em sites de organizações relacionadas, e acrescentar ou reduzir este valor na orientação dada pela bússola. (PINHO et al., 2014)

Figura 9 – Exemplo de correção de orientação no Norte e Sul verdadeiro dada uma declinação magnética de -20° .



Fonte: Pinho et al., 2014.

2.2.4 Instalação de painéis fotovoltaicos

A partir da análise dos trabalhos de Benedito (2009), Almeida (2012), Hsu et al. (2016), Al-Addous et al. (2017), Ramadan (2017) e Daher (2018) as instalações de sistemas fotovoltaicos podem ser divididas basicamente em três

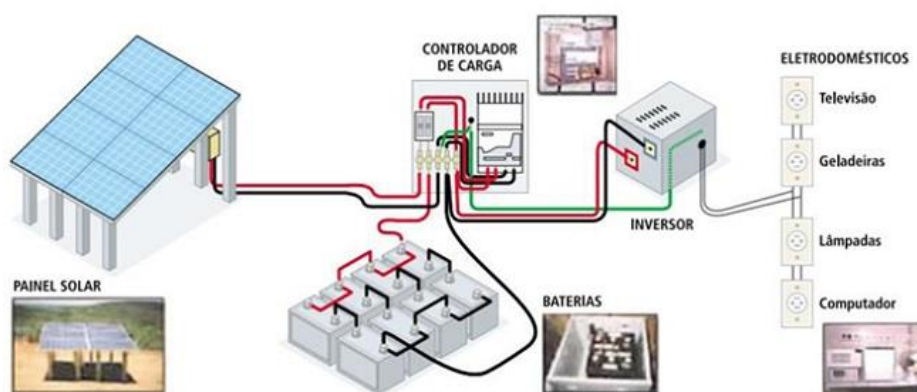
tipos: Instalações on-grid, instalações off-grid e instalações híbridas. Os sistemas on-grid são os quais as células fotovoltaicas estão ligadas a rede elétrica do local, os sistemas off-grid são os quais as células fotovoltaicas são ligadas de forma independente da rede elétrica local e já os sistemas híbridos são os em que o sistema é conectado à rede elétrica, de forma similar as instalações on-grid, mas que pode também trabalhar de forma off-grid tendo todos os componentes necessários para trabalhar desta forma e oferecendo uma maior flexibilidade de operação.

2.2.4.1 Sistemas Off-Grid

Os sistemas fotovoltaicos off-grid são comumente utilizados em locais onde não existe a disponibilidade de rede elétrica por motivos destes locais serem muito afastados da civilização, baixa densidade demográfica, viabilidade econômica por parte das fornecedoras deste serviço e outros fatores mais, sendo assim usada como a fonte principal de energia elétrica. (BENEDITO, 2007)

Neste tipo de instalação são utilizados basicamente painéis fotovoltaicos para a geração da energia elétrica, inversor de potência para adequar a tensão gerada pelas células às tensões das baterias, elementos de proteção a rede para evitar danos ao sistema e ao usuário, controlador de carga para controle de toda a energia que é retirada ou adicionada ao banco de baterias e as baterias propriamente ditas que armazenam toda a energia gerada pelos painéis. (BENEDITO, 2007)

Figura 10 – Exemplo sistema fotovoltaico off-grid.



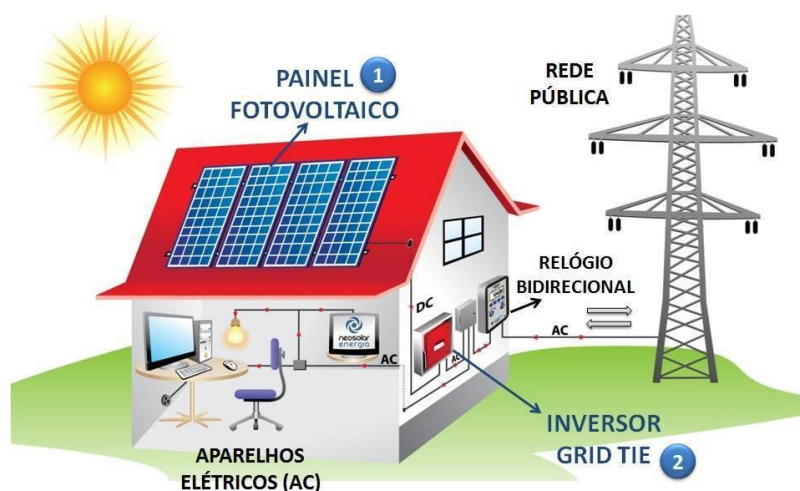
Fonte: CRESESB, 1996.

2.2.4.2 Sistemas On-Grid

Os sistemas fotovoltaicos on-grid são utilizados em conjunto a uma rede elétrica presente no local onde pode ser instalado com diferentes configurações de operação, servindo como uma fonte auxiliar ou complementar de energia elétrica, podendo chegar a suprir totalmente a demanda energética do usuário em alguns casos a depender da potência do sistema de geração instalado e de seu consumo. (ALMEIDA, 2012)

Em um sistema desta natureza os componentes utilizados são similares aos presentes na instalação off-grid, com exceção basicamente das baterias pelo fato de existir uma rede elétrica e o excesso gerado poder ser transferido para a mesma e do controlador de carga já que não existem baterias sendo este substituído pelo relógio bidirecional que conecta o sistema a rede elétrica. (ALMEIDA, 2012)

Figura 11 – Exemplo sistema fotovoltaico on-grid.

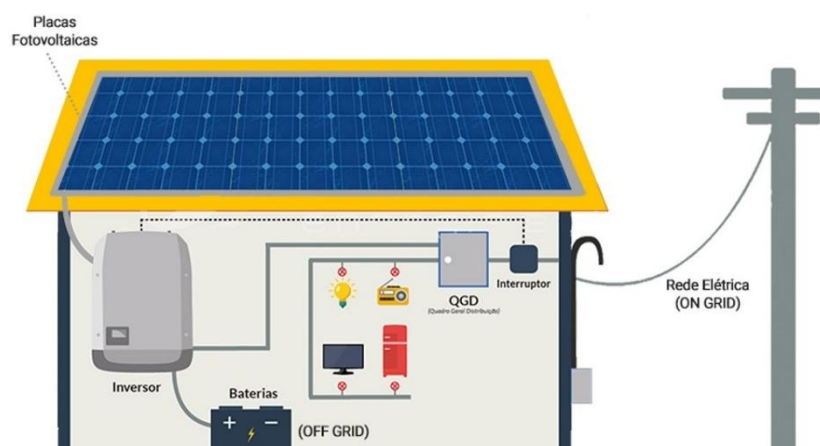


Fonte: CREA-MT, 2015

2.2.4.3 Sistemas híbridos

Os sistemas híbridos, como o nome sugere, é uma combinação dos sistemas off-grid e on-grid onde quando a geração de energia é suficiente para o consumo o sistema trabalha de forma independente (off-grid) e a partir do momento em que a geração de energia proveniente do sistema fotovoltaico não consegue mais suprir o consumo o sistema passa a se conectar à rede elétrica (on-grid), ou a algum outro tipo de fonte energética disponível. (HSU et al., 2016)

Figura 12 – Exemplo sistema fotovoltaico híbrido.



Fonte: Souza, 2017.

2.3 Sistemas de rastreamento solar

Com o tempo, foi observado que a geração de energia através de placas fotovoltaicas poderia ser otimizada se, ao invés de coloca-la fixa direcionada ao melhor ponto de incidência solar durante o dia, normalmente sendo o ângulo que corresponde a latitude do local em que o sistema está instalado, fosse acoplada a um dispositivo que a movimentasse de modo que a superfície da mesma permanecesse perpendicular (ou o mais próximo possível disso) com os raios solares durante todo (ou a maior parte do tempo possível) o tempo de incidência solar diária. A partir daí foram criados diversos modelos de rastreadores solares, sendo desde modelos mais simples até os mais complexos e robustos afim de obter uma maior eficiência na captação da irradiação solar pelas placas fotovoltaicas comparados aos sistemas fixos de captação.

Atualmente existem basicamente dois tipos de rastreadores solares no mercado: Rastreadores de um eixo e rastreadores de dois eixos. Os rastreadores contendo apenas um eixo costumam ter uma construção e funcionamento mais simples, mas ainda sim conseguindo obter um rendimento bem satisfatório. Já os sistemas com dois eixos são normalmente mais complexos e geram por consequência maiores ganhos em rendimento de captação de radiação solar. (OLIVEIRA, 2008)

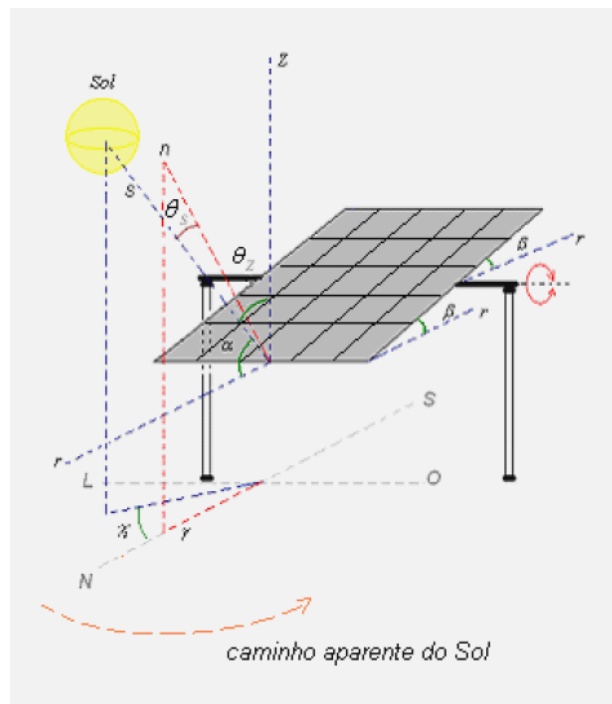
2.3.1 Sistema de rastreador solar de um eixo

Os rastreadores compostos por apenas um eixo apresenta um funcionamento mais simples, assim como um resultado menos expressivo do que o de dois eixos. Dentre os tipos de rastreadores solar podem existir os que se movimentam no eixo horizontal Leste-Oeste, no eixo Norte-Sul, no eixo polar ou ainda no eixo azimutal. (OLIVEIRA, 2008)

2.3.1.1 Rastreador com eixo Leste-Oeste

Este modelo de rastreador conta com um eixo horizontal o qual varia na direção Leste-Oeste, procurando aumentar a incidência de raios no painel. Sendo assim, “é usado em concentradores de energia radiante com espelhos cilíndricos-parabólicos[...]. Também pode ser usado em conjunto de painéis fotovoltaicos, onde é minimizado o ângulo de incidência.” (OLIVEIRA, 2008).

Figura 13 – Exemplo de rastreador solar com eixo horizontal Leste-Oeste.



Fonte: Oliveira, 2008.

Para determinação do ângulo de incidência direta, temos:

$$\cos \theta_s = (1 - \cos \delta^2 \sin^2 \omega)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

Onde:

θ_s = Ângulo de incidência direta

δ = Ângulo de declividade terrestre;

ω = Ângulo horário;

Já para a determinação do ângulo de inclinação do painel, temos:

$$\tan \beta = \tan \theta_z |\cos \gamma_s| \quad (2.5)$$

Onde:

β = Ângulo de inclinação do painel solar

θ_z = Ângulo do zênite

γ = Ângulo do azimute da superfície

γ_s = Ângulo do azimute solar

Na figura 13 ainda temos:

r = Reta auxiliar paralela ao plano local

n = Reta normal ao plano

s = Reta da Terra ao centro do Sol

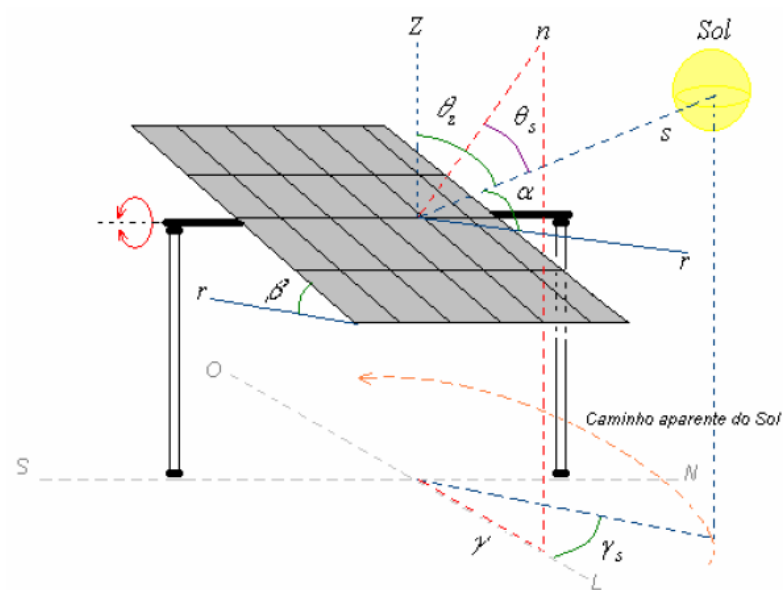
Z = Zenite local

Neste sistema o ângulo do azimute da superfície permanece fixo, ocorrendo variação apenas no ângulo de azimute solar ao decorrer do dia.

2.3.1.2 Rastreador com eixo Norte-Sul

O sistema de rastreamento com eixo horizontal Norte-Sul tem funcionamento semelhante ao da seção 2.4.1.1, onde se deve notar que caso o azimute solar seja menor que 0° o azimute de superfície será -90° , assim como se o azimute solar for maior que 0° o azimute de superfície será 90° independente do hemisfério em que o mesmo está situado. (OLIVEIRA, 2008)

Figura 14 – Exemplo de rastreador solar com eixo horizontal Norte-Sul.



Fonte: Oliveira, 2008.

Semelhante ao sistema anterior, para determinação da inclinação do ângulo de incidência direta é obtida por uma expressão, dada por:

$$\cos \theta_s = (\cos^2 \theta_z + \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega)^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

E para determinar-se a inclinação do painel solar, usa-se:

$$\tan \beta = \tan \theta_z |\cos(\gamma - \gamma_s)| \quad (2.7)$$

2.3.1.3 Rastreador com eixo polar

Neste modelo de rastreador solar temos um eixo fixo com ângulo de inclinação α e outro eixo móvel com ângulo de inclinação β que varia de acordo com o movimento aparente do sol.

$$\cos \theta' = \cos \theta_z \cos \phi + \sin \theta_z \sin \phi \quad (2.11)$$

Sendo C1 e C2 dados por:

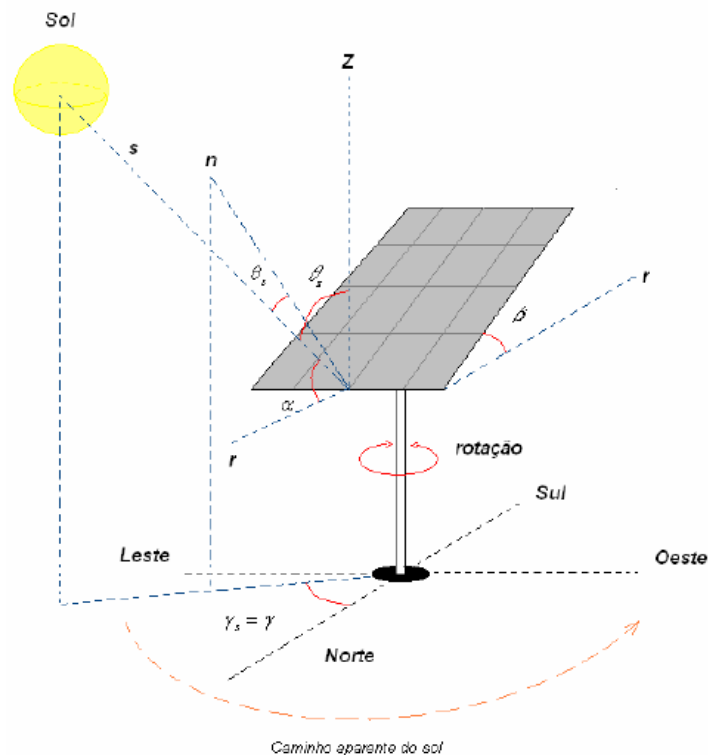
$$C1 = \begin{cases} 0 & \text{se } \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta_z \sin \gamma_s}{\cos \theta' \sin \phi} \right) + \gamma_s = 0 \\ 1 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.12)$$

$$C2 = \begin{cases} 1 & \text{se } \gamma_s \geq 0 \\ 0 & \text{se } \gamma_s < 0 \end{cases}$$

2.3.1.4 Rastreador azimutal

Neste modelo de rastreador solar as inclinações da placa são ajustadas manualmente conforme a localidade e estações do ano e o eixo vertical que dá suporte a placa gira conforme o movimento aparente do sol, tendo um baixo custo de manutenção e recomendado para localidades onde o horário solar seja mais longo. (OLIVEIRA, 2008)

Figura 16 – Exemplo de rastreador solar azimutal.



Fonte: Oliveira, 2008.

Pelo fato do sistema em questão fazer uso de dois eixos, a equação que descreve os ângulos, já conhecidos por serem os mesmos que foram mostrados nos sistemas anteriores, são bem mais simplificados. A expressão que descreve o ângulo de incidência direta é dada por:

$$\cos \theta_s = 1 \quad (2.15)$$

Já que θ deve ser igual a 0 para maior rendimento do painel solar. Seguindo deste pressuposto, a equação que descreve a inclinação do eixo horizontal é:

$$\beta = 90 - \alpha \quad (2.16)$$

Já para o eixo vertical, semelhante ao modelo de rastreador azimutal, a expressão que descreve seu movimento é:

$$\gamma_s = \gamma \quad (2.17)$$

3. Rastreador solar de baixo custo com dois eixos horizontais: Leste-Oeste e Norte-Sul

3.1 Materiais e métodos utilizados

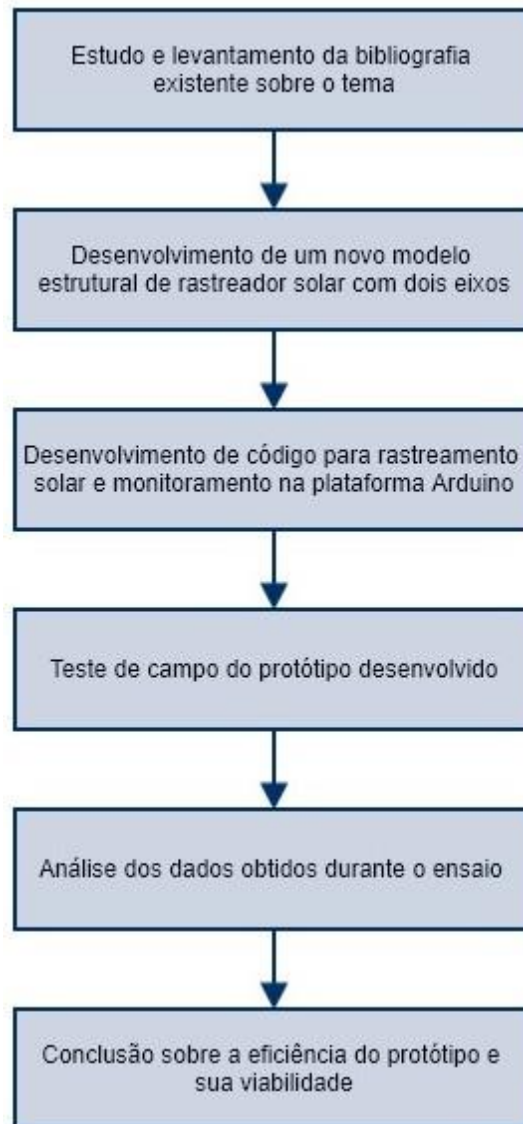
O atual projeto foi realizado na Universidade Federal de Alagoas, Campus do Sertão, na cidade de Delmiro Gouveia durante o ano de 2018 com ensaio realizado no mês de agosto.

A partir de dados obtidos no Google Earth (2018) e NOAA (2018) a localização e declinação magnética exata do local em que foi realizado o ensaio é:

- Latitude: 9°21'02"S;
- Longitude: 37°59'18"W;

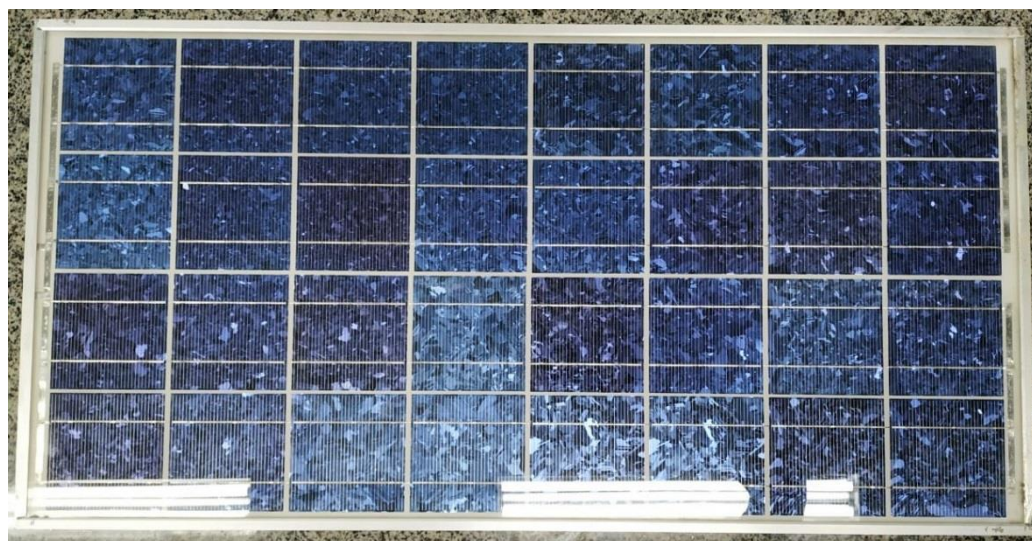
- Altitude: 268 metros;
- Declinação magnética: $22^{\circ}34'18''W \pm 0^{\circ}20'$.

Figura 18 – Sistemática do projeto.



Fonte: autor, 2018.

Os painéis fotovoltaicos utilizados neste projeto foram do tipo policristalino de tamanho, marca e especificações idênticos de forma a obter resultados o mais fidedigno possível.

Figura 19 – Painel fotovoltaico utilizado no ensaio.

Fonte: autor, 2018.

Tabela 3 – Especificações técnicas dos painéis fotovoltaicos utilizados no ensaio.

ESPECIFICAÇÕES DO PAINEL FOTOVOLTAICO	
Especificações em condições: AT 1000W/m ² 25°C AM 1.5	
Modelo	LA321K45
Potência máxima	45 Watts
Tensão de circuito aberto	15 volts
Corrente de curto circuito	3,02 amperes
Tensão máxima de pico	18,9 volts
Corrente máxima de pico	3,25 amperes
Tensão máxima do sistema	800 volts
Dimensão	885mm x 450mm x 35mm
Ano de fabricação	1996
Local de fabricação	Japão

Fonte: autor, 2018.

3.1.1 Estrutura

3.1.1.1 Base/Esqueleto

Neste trabalho foi desenvolvido um novo modelo de rastreador de dois eixos não descrito nos artigos e teses que foram tomados como base para o presente trabalho. Neste foram utilizados materiais de baixo custo visando a criação de um sistema mais barato e acessível ainda sim obtendo-se um rendimento satisfatório. Sendo assim, os materiais utilizados foram:

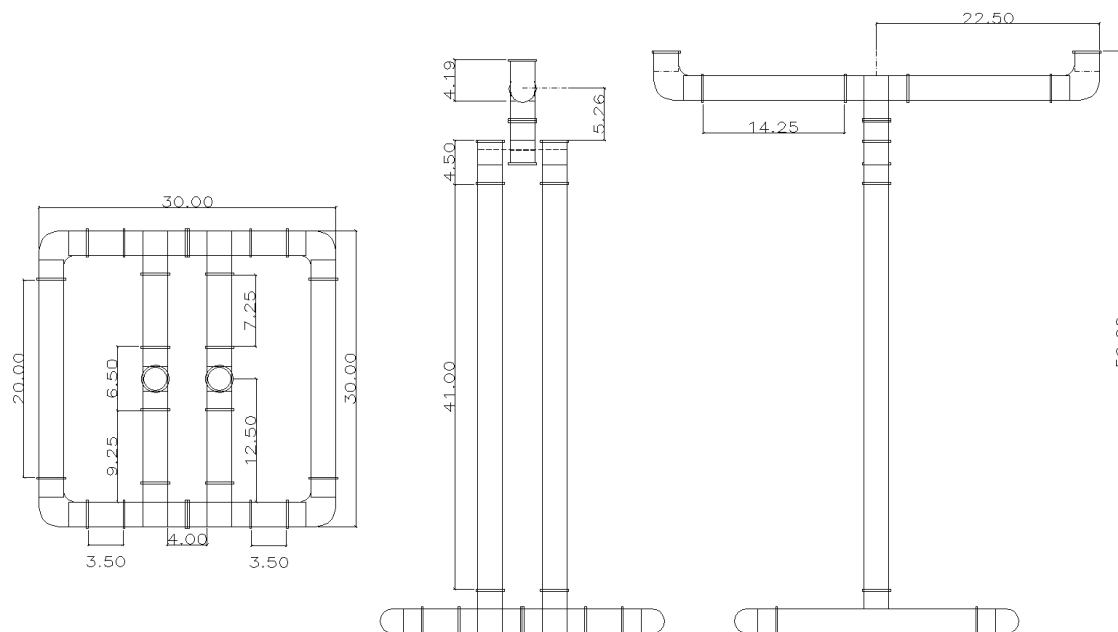
Tabela 4 – Materiais usados na construção da parte eletrônica do rastreador solar.

Item	Quant.
Estrutura em policloreto de venila	1
Barra roscada	2
Arduino Uno R3	1
Arduino Leonardo (Usado para monitoramento)	1
Sensores LDR	4
Resistores de 1k Ohm	4
Fios	---
Jumpers	---
Protoboard de 830 pontos	1
Motores de passo 28BYJ-48	2
Controladores uln2003a	2
Micro switch	2
Fonte de alimentação	1

Fonte: autor, 2018.

A construção da base foi feita encaixando, colando e parafusando os canos de forma a se obter dois eixos de rotação e ao mesmo tempo se obter uma base robusta conforme ilustra a figura 20.

Figura 20 – Desenho técnico da estrutura em PVC do rastreador solar de baixo custo.



Fonte: autor, 2018.

O painel solar foi posicionado na parte superior da estrutura onde sensores LDR posicionado em cada um de seus lados ortogonais a sua superfície de captação da radiação solar. Logo abaixo do painel foi posicionado o Arduino Uno R3 de forma a sempre estar em uma área sombreada pelo próprio painel, conforme o mesmo vai se movimentando ao longo do dia.

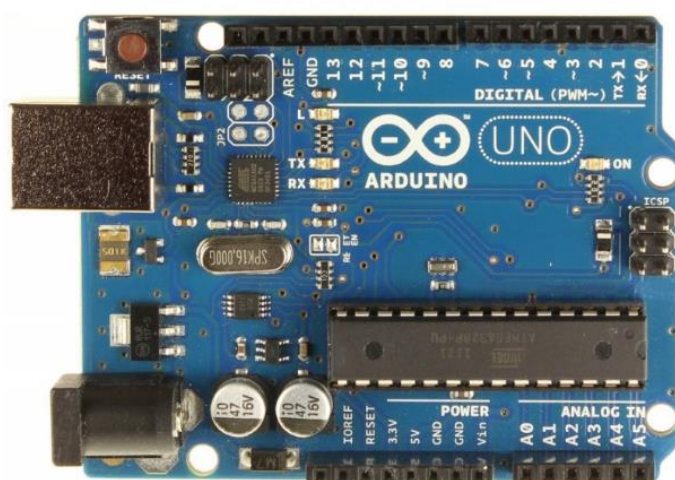
3.1.1.2 Arduino

O Arduino é um hardware de código aberto composto basicamente por um micro controlador e circuitos de entrada e saída o qual pode ser conectado e programado via IDE pelo usuário através da linguagem C/C++ necessitando

apenas de um cabo USB para tal, onde após programado pode ser usado de forma independente. (ARDUINO FAQ, 2018)

Este ainda conta com uma grande gama de sensores e módulos que podem ser acoplados a placa Arduino e ampliar gigantesca sua usabilidade nas mais diversas áreas de estudo como engenharia, medicina, agricultura, segurança e vários outros. (ARDUINO FAQ, 2018)

Figura 21 – Placa Arduino uno R3.



Fonte: Arduino, 2018.

Para o trabalho em questão foi usado o Arduino Uno R3 para controle de todo o sistema de rastreamento e um Arduino Leonardo para monitoramento do uso dos motores, possibilitando a realização do consumo estimado do sistema.

Tabela 5 – Ligação dos componentes no Arduino Uno R3.

Componentes	Quant.	Portas analógicas	Portas digitais
LDR	4	4	0
Controladores uln2003a (Motor de passo)	2	0	8
Micro switch	4	0	4
Monitoramento dos motores.	2	0	2
Total		4	14

Fonte: autor, 2018.

Totalizando o uso de 14 portas digitais e 4 portas analógicas com uso de monitoramento e 12 digitais e 4 portas analógicas de uso apenas do sistema de rastreamento. Já no Arduino Leonardo foram utilizados duas portas digitais para aquisição de dados em tempo real e duas portas digitais para ligação de LDR's junto ao plugin Parallax instalado no software Microsoft Excel durante o experimento.

3.1.1.3 Motor de passo

Os motores de passos são equipamentos eletromecânicos que possuem um controle e precisão maior comparado a motores comuns. Estes giram a partir de pequenos pulsos elétricos fazendo-o girar um determinado ângulo a cada pulso, chamado de “passo”, onde para a realização deste trabalho se faz necessário em alguns modelos o uso de controladores junto ao motor. (SANTOS et al., 2008)

Figura 22 – Motor de passo 28BYJ-48 e controlador ULN2003a.



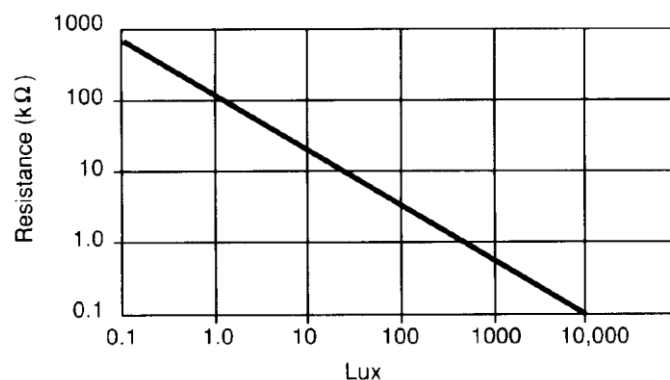
Fonte: Thomsen, 2013.

O motor de passo a ser utilizado no trabalho em questão será o modelo 28BYJ-48 o qual possui caixa de redução 1/64* e 4 fases junto ao controlador ULN2003a, onde ligado a um sistema de movimentação com parafuso sem fim oferece o torque e a precisão necessária para o projeto. (KIATRONICS)

3.1.1.4 LDR

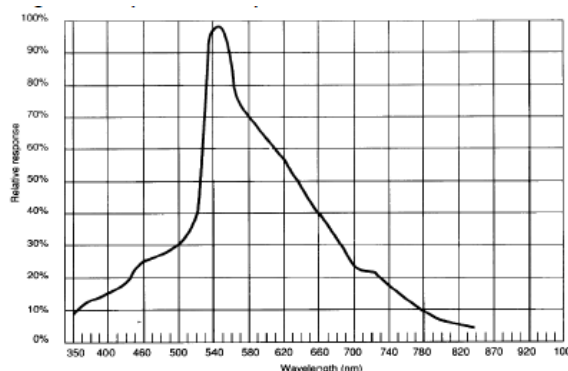
LDR é a abreviatura para Light Dependet Resistor ou Resistor Dependente de Luz, onde este sensor (ou resistor) é feito de duas células de sulfureto de cádmio (Cds), onde a resistência da célula vai diminuindo de acordo com o aumento a quantidade de luz que incide sobre ela, considerando que o mesmo tem uma reposta bem mais elevada nos comprimentos de onda compreendidos entre 530nm e 580nm. (SUNROM TECHNOLOGIES, 2008)

Figura 23 – Gráfico da resistência em função da iluminância de um LDR.



Fonte: Sunrom Technologies, 2008.

Figura 24 – Gráfico da resposta relativa em função do comprimento de onda de um LDR.



Fonte: Sunrom Technologies, 2008.

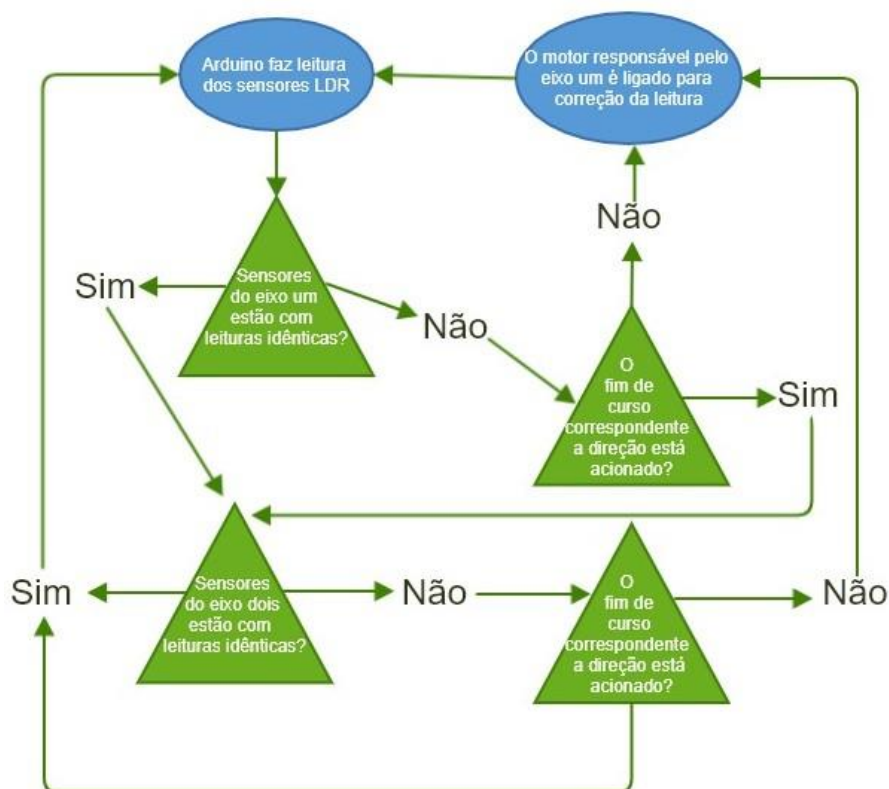
Estes sensores serão utilizados nas extremidades do painel, totalizando quatro sensores, para a coleta de dados referentes a intensidade de luz que incide no painel, dando assim condições para que o Arduino analise estes dados e mantenha a placa direcionada ao sol ao longo do dia.

3.1.2 Método de funcionamento

O sistema de rastreamento utiliza uma lógica feita em C++, onde cada eixo do seguidor é composto por um par de LDR's, um par de fins de curso e um motor (junto a um controlador) de forma que é ajustado um eixo por vez por questões de eficiência no consumo energético do sistema. Para a realização do ajuste de inclinação do painel solar o Arduino realiza leituras constantes dos valores fornecidos pelos quatro LDR's compostos no sistema, os quais trabalham em pares, e verifica a disparidade das leituras de cada par. Caso esta leitura ultrapasse o limite da diferença de leitura estipulada no código, o motor correspondente a este par de LDR's, e conseqüentemente responsável pelo eixo em questão, é acionado para aproximar novamente o resultado destas leituras até que as leituras se tornem parecidas novamente ou um dos fim de curso referentes ao eixo sejam acionados. O sentido de rotação do motor está relacionado a qual dos LDR tem um valor de leitura maior ou menor. O segundo eixo trabalho de forma idêntica ao primeiro descrito, onde o segundo só é ajustado após a correção do ângulo de inclinação do primeiro.

Após feitas as correções de cada eixo imediatamente o motor e controlador correspondentes são desligados, resultando apenas na placa controladora do Arduino ligada realizando monitoramento dos sensores e reduzindo consideravelmente o consumo de energia do sistema.

Figura 25 – Fluxograma do algoritmo usado na programação do rastreador.



Fonte: autor, 2018.

3.1.3 Coleta de dados

A realização da coleta de dados foi feita durante todo o período solar do dia 5 de agosto de 2018 utilizando dois painéis fotovoltaicos idênticos descritos na tabela 3. Um dos painéis foi posicionado conforme descrito no tópico 2.2.3 de maneira a ficar fixo ao longo do dia, já o segundo painel foi utilizado no protótipo de rastreador solar desenvolvido no projeto em questão de forma a verificar seu desempenho em comparação com o sistema fixo.

Ambos os painéis foram colocados em um local que não oferece nenhum tipo de obstáculo aos raios solares, impedindo qualquer tipo de interferência não natural na incidência de raios solares sobre os painéis durante todo o período de incidência solar.

Foram utilizados para a coleta dos dados dois multímetros da marca HYX® e modelo DT830D, onde estes possuem escalas de corrente e tensão adequadas às que são geradas pelos painéis fotovoltaicos em uso neste

trabalho, sendo suficientes para conseguir atingir o objetivo do estudo. Foi também utilizado um computador para coleta dos dados do Arduino referente ao tempo de acionamento dos motores, sendo assim possível calcular o consumo energético do protótipo desenvolvido.

O experimento foi montado e preparado de forma a estar pronto para início as seis horas da manhã, de maneira a coletar dados sobre o acionamento dos motores do protótipo uma vez por segundo e dados de leitura dos multímetros conectados diretamente a saída dos painéis fotovoltaicos a cada dez minutos, totalizando mais de 30000 leituras referente aos motores e 71 referente a tensão e corrente de cada painel fotovoltaico durante as onze horas ininterruptas do experimento. Foram obtidos dos painéis os seguintes dados:

- Tensão sem carga;
- Corrente sem carga.

Foram colhidos esses dados baseado nos trabalhos feitos por Tessaro (2006) e Trevelin (2014), onde no primeiro foi constatado que a potência média calculada de painéis fotovoltaicos com e sem carga assim como com e sem sistema de rastreamento, tiveram a mesma porcentagem de diferença.

3.2 Custos do sistema

O custo total aproximado de todo o sistema construído, sem levar em consideração o painel, foi:

Tabela 6 – Custo monetário total estimado do sistema de rastreamento.

Quantidade	Item	Valor un.	Valor total
1	Placa Uno R3 + Cabo USB para Arduino	\$12,14	\$12,14
4	Sensor de Luminosidade LDR 5mm	\$0,38	\$1,51
2	Motor de Passo + Driver Uln2003 Arduino	\$4,03	\$8,05
1	Protoboard 830 Pontos	\$4,57	\$4,57

1	Kit Jumpers Macho-Macho x65 Unidades	\$4,57	\$4,57
1	Mini Conversor de Tensão DC-DC Step Down	\$2,95	\$2,95
3	Cano PVC 25mm (1 metro)	\$2,03	\$6,08
15	Conexões	\$0,22	\$3,24
-----	Parafusos e porcas	-----	\$4,05
Obs.: Adotada a cotação do Dólar na data de compra dos componentes		Total	\$47,16

Fonte: autor, 2018.

4. Resultados e discussões

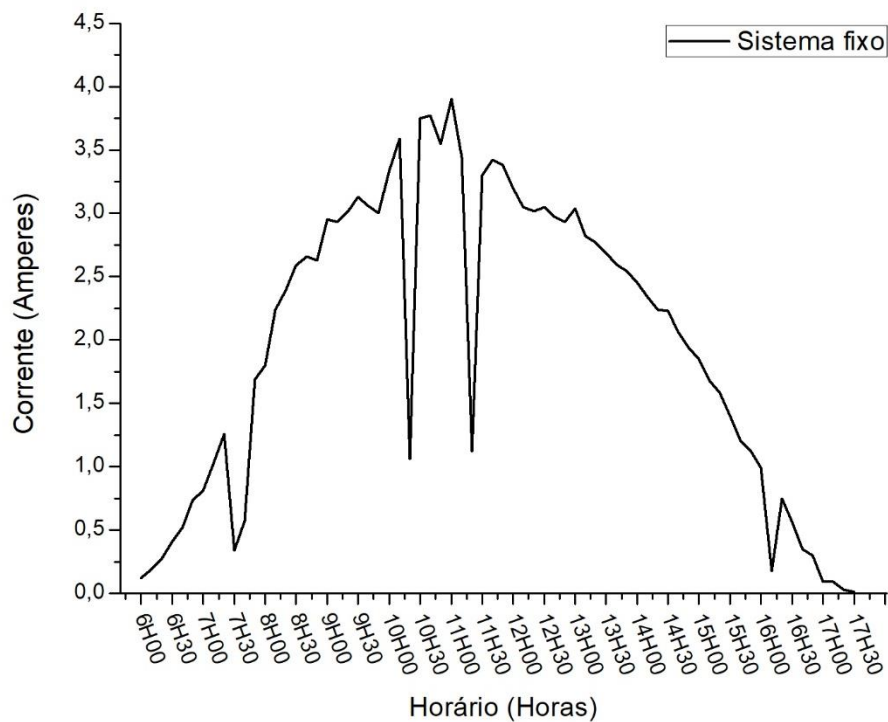
No ensaio realizado com o sistema móvel e com o sistema fixo de rastreamento solar foi realizada a coleta dos dados assim como descrito em 3.1.3 onde os dados referentes as condições climáticas durante o ensaio são descritas pela Tabela 7.

Tabela 7 - Condições climáticas no dia do ensaio

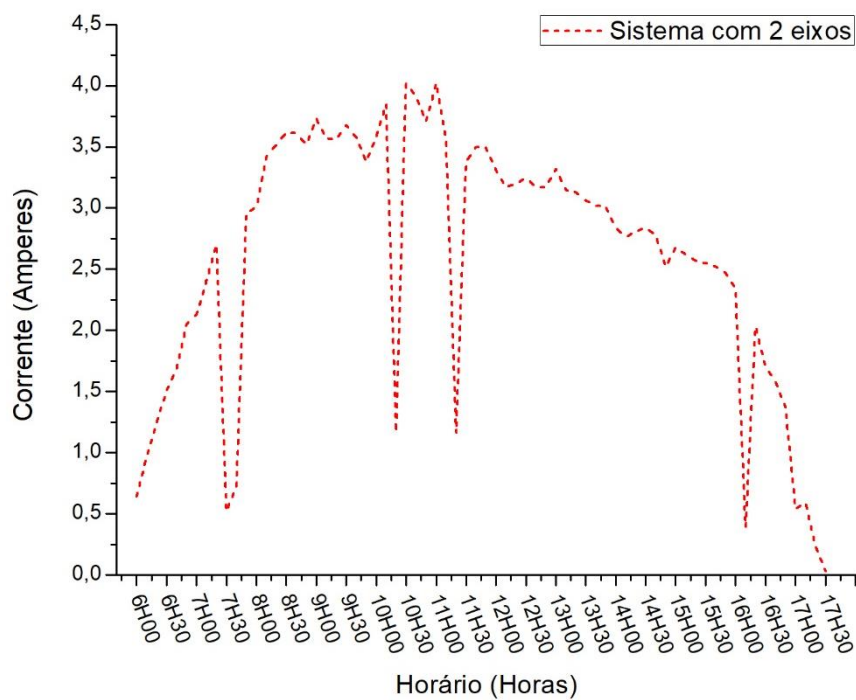
Condições climáticas do ensaio	
Temperatura (Média)	28° ~ 27°
Umidade (Média)	20%
Irradiação	4,91kWh/m ² .dia
Nebulosidade	Parcialmente encoberto
Precipitação	11%
Período solar	11h22min
Ventos (Média)	19,8km/h

Fonte: Adaptado de CRESESB CEPEL, 2018 e Weather Spark, 2018.

Os dados coletados durante o ensaio de ambos os sistemas de rastreamento utilizados são mostrados nas figuras a seguir.

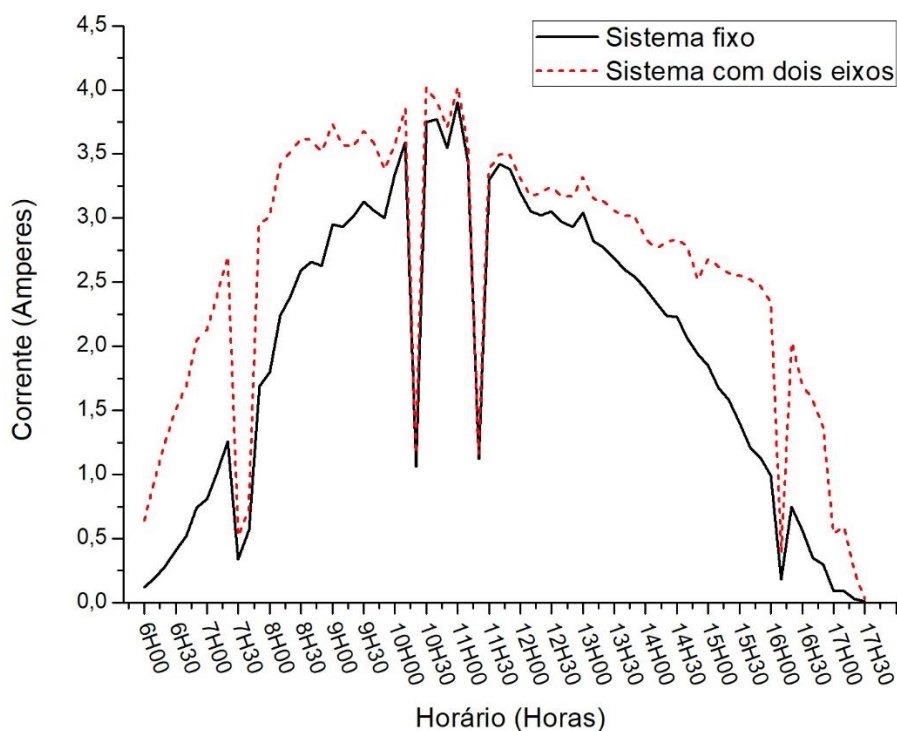
Figura 26 – Corrente em função do tempo do painel com sistema de rastreamento fixo.

Fonte: autor, 2018.

Figura 27 – Corrente em função do tempo do painel com sistema de rastreamento de dois eixos.

Fonte: autor, 2018.

Figura 28 – Comparativo da corrente em função do tempo do painel com sistema de rastreamento fixo e com sistema de dois eixos.



Fonte: autor, 2018.

Como visto na figura 6 na curva característica I-V dos painéis fotovoltaicos podemos verificar que a relação entre a corrente gerada e a radiação são diretamente proporcionais, logo quanto maior a corrente gerada pelo painel, maior é a radiação que incide na superfície do mesmo.

Nos gráficos da figura 26 é possível notar quedas consideráveis na corrente os quais se dão devido a presença de radiação difusa, ou seja, devido as nuvens presentes entre os sol e o rastreador em determinados horários do dia. No gráfico da figura 27 também é possível notar as mesmas quedas nos mesmos horários do dia já que os dados de ambos os sistemas foram coletados no mesmo dia e ambos os sistemas foram posicionados no mesmo local.

Analisando o gráfico da figura 28 é possível notar claramente uma maior tensão obtida pelo sistema de dois eixos em relação ao sistema fixo na maior parte do tempo ainda que com variação constante da mesma ao longo de todo o período de teste já que se trata de um dia parcialmente nublado.

Observando com mais atenção, podemos verificar que o gráfico gerado ao relacionar a corrente e a radiação se revela muito próximo de uma reta,

levando também em consideração que os painéis foram submetidos a temperaturas de operação idênticas, assim nos permitindo comparar os dois sistemas de rastreamento no que diz respeito a radiação que incidiu sobre as placas.

Analisando a corrente média medida ao longo do dia da placa com sistema de rastreamento fixo e sistema de rastreamento de dois eixos tem respectivamente 2,24 A e 2,9 A. Sabendo que a relação Corrente x Radiação é diretamente proporcional podemos observar que com o sistema de rastreamento solar de dois eixos foi obtido um aumento de aproximadamente 29,46% da intensidade de radiação média incidida no painel fotovoltaico.

A partir do ensaio foi calculada uma estimativa de geração de energia elétrica pelos painéis fotovoltaicos com os dois sistemas fazendo-se uso da constante FF descrita pela equação 2.3 para uma estimativa mais próxima da realidade, onde temos:

Tabela 8 – Energia elétrica gerada estimada pelos painéis fotovoltaicos com sistema de rastreamento fixo e rastreamento com dois eixos.

Sistema de rastreamento	Tensão média	Corrente média	Fator de Forma	Geração de energia elétrica média
Fixo	16,5v	2,24A	0,7374	313,42Wh
Com dois eixos	16,5v	2,9A	0,7374	405,77Wh
	Ganho energético em Wh			92,53Wh
	Ganho energético em %			29,46%

Fonte: autor, 2018.

Também foi calculado o consumo energético estimado referente ao sistema de rastreamento com dois eixos, onde foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela 9 – Tempo de acionamento e consumo dos componentes eletrônicos do protótipo.

Equipamento	Tempo de utilização	Alimentação	Consumo
Arduino Uno	11:30:00	5v a 0,13A	7,15Wh
Motor de Passo 1	01:38:00	5v a 0,23A	1,878Wh
Motor de Passo 2	01:00:00	5v a 0,23A	1,15Wh
		Total	10,178Wh

Fonte: autor, 2018.

A partir da Tabela 8 podemos verificar que a energia gerada pelo painel equipado com sistema de rastreamento de dois eixos é muito maior do que o consumo de seus componentes, o qual representa aproximadamente 2,5% da energia elétrica gerada. Sendo assim, considerando o consumo energético do sistema o rendimento real do rastreador construído é de 26,21% como descrito na Tabela 10.

Tabela 10 – Energia elétrica gerada estimada pelos painéis fotovoltaicos com sistema de rastreamento fixo e rastreamento com dois eixos considerando consumo do sistema.

Sistema de rastreamento	Tensão média	Corrente média	Fator de Forma	Geração de energia elétrica média
Fixo	16,5v	2,24A	0,7374	313,42Wh
Com dois eixos	16,5v	2,9A	0,7374	405,77Wh
Consumo do sistema em Wh				10,178Wh
Consumo do sistema em %				2,508%
Ganho energético em Wh				82,172Wh
Ganho energético em %				26,21%

Fonte: autor, 2018.

Comparando os resultados obtidos com projetos semelhantes na literatura de desenvolvimento de rastreadores solares de baixo custo, temos:

Tabela 11 – Comparativo entre rastreadores desenvolvidos na literatura.

Autor	Nº de eixos	Rendimento	Custo
Antônio (2007)	1	31%	\$250,27
Barker et al. (2013)	2	30%	Não informado
Trevelin (2012)	2	39%	Não informado

Fonte: autor, 2018.

Ambos em relação a um sistema de posicionamento fixo e utilizando materiais mais robustos, e conseqüentemente mais caros, em sua estrutura.

Tabela 12 – Comparativo entre o rastreador desenvolvido e o rastreador da literatura.

Autor	Nº de eixos	Rendimento	Custo
Antônio (2007)	1	31%	\$250,27
Armellino (2018)	2	26,21%	\$47,116

Fonte: autor, 2018.

Podemos notar que o rendimento de 26,21% estimado pelo sistema construído não se distancia muito dos demais resultados considerando também o fato de que este rendimento foi obtido em um dia parcialmente nublado, ao contrário dos citados acima com rendimentos calculados em um dia ensolarado.

5. Conclusão

No trabalho em questão foi realizada com sucesso a elaboração, construção e teste do protótipo de seguidor solar de dois eixos tornando possível a coleta de dados e comparação deste com o sistema fixo de posicionamento de painéis fotovoltaicos com o auxílio dos recursos disponíveis para tal.

O protótipo foi desenhado cuidadosamente de maneira a ser o mais robusto possível, ter dois eixos de rotação e ao mesmo tempo ser composto de materiais de fácil acesso.

Na construção do protótipo, apesar das muitas dificuldades encontradas na confecção da parte mecânica foi possível realizar a construção de uma estrutura

funcional que atendesse os requisitos descritos pelo projeto, onde o principal deles é o baixo custo do mesmo.

A construção do código, feita na linguagem C/C++, também foi escrita de maneira a ter uma lógica simples, porém funcional, a fim de obter um bom rendimento quando aplicado no protótipo de rastreador tendo a possibilidade de ajustes de sensibilidade dentro do código e permitindo uma melhor precisão de rastreio do protótipo.

O resultado obtido foi muito satisfatório uma vez que o protótipo construído se comportou como o esperado e teve um ótimo rendimento se levado em consideração o fator custo-benefício agregado ao projeto, o qual demonstrou um rendimento de 26,21% do que o sistema fixo posicionado da maneira recomendada pela literatura, como descrito em 2.2.3.

Realizando um comparativo com outros protótipos de baixo custo presentes na literatura podemos concluir que por mais que o resultado obtido seja inferior ao destes o material utilizado, em sua estrutura principalmente, é bem mais barato e acessível do que os demais, o que torna mais acessível oferecendo um rendimento semelhante. Levando ainda em consideração o fato das condições em que o ensaio terem sido em clima nublado, o rendimento do rastreador construído se torna ainda mais próximo dos demais.

Sendo assim o protótipo de rastreador solar de dois eixos obteve resultados satisfatórios demonstrando que é possível realizar a construção de um rastreador com um menor custo e materiais mais acessíveis oferecendo um bom rendimento.

Referências

WHITEBOOK, Desertec. Clean Power from Deserts. **4a. ed.**, Desertec, 2008.

JÄGER-WALDAU, Arnulf et al. Snapshot of Photovoltaics—March 2017. *Sustainability*, v. 9, n. 5, p. 1-9, 2017.

ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR 2° EDIÇÃO. São José dos Campos, Brasil: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, v. 2, 2017.

EKE, Rustu; SENTURK, Ali. Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system. **Solar Energy**, v. 86, n. 9, p. 2665-2672, 2012.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA A ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO - CRESESB. Informe Técnico, Rio de Janeiro, v. 2, n. 1, jun. 1996.

LORENZO, E. et al. Design of tracking photovoltaic systems with a single vertical axis. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 10, n. 8, p. 533-543, 2002.

ABDALLAH, Salah; NIJMEH, Salem. Two axes sun tracking system with PLC control. *Energy conversion and management*, v. 45, n. 11-12, p. 1931-1939, 2004.

VOROBIEV, P. Yu; GONZALEZ-HERNANDEZ, Jesús; VOROBIEV, Yuri V. Optimization of the solar energy collection in tracking and non-tracking photovoltaic solar system. In: (ICEEE). 1st International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 2004. IEEE, 2004. p. 310-314.

SUNGUR, Cemil. Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey. *Renewable Energy*, v. 34, n. 4, p. 1119-1125, 2009.

APPLEYARD, David. Solar trackers: Facing the sun. **Renewable Energy World**, v. 12, n. 3, p. 41-53, 2009.

OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. **Movimento Anual do Sol e as Estações do Ano**.2012. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/tempo/mas.htm>>. Acesso em: 16 jul. 2018.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. **Rio de Janeiro**, v. 1, p. 47-499, 2014.

PRITCHARD, D. Sun tracking by peak power positioning for photovoltaic concentrator arrays. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 3, n. 3, p. 2-8, 1983.

VALLÊRA, Antônio M.; BRITO, Miguel Centeno. Meio século de história fotovoltaica. **Gazeta de Física**, v. 1, n. 2, 2006.

BENEDITO, Ricardo da Silva. **Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ALMEIDA, Marcelo Pinho. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

HSU, Po-Chien et al. Effect of switching scheme on the performance of a hybrid solar PV system. **Renewable Energy**, v. 96, p. 520-530, 2016.

AL-ADDOUS, Mohammad et al. Performance analysis of off-grid PV systems in the Jordan Valley. **Renewable Energy**, v. 113, p. 930-941, 2017.

RAMADAN, H. S. Optimal fractional order PI control applicability for enhanced dynamic behavior of on-grid solar PV systems. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 7, p. 4017-4031, 2017.

DAHER, Daha Hassan et al. Impact of tropical desert maritime climate on the performance of a PV grid-connected power plant. **Renewable Energy**, v. 125, p. 729-737, 2018.

TESSARO, Alcione Rodrigo et al. Desempenho de um painel fotovoltaico acoplado a um rastreador solar. **Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural**, 2006.

OLIVEIRA, Maurício Madeira. Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor solar azimutal. 2008.

HESLOP, Simon; MACGILL, Iain. Comparative analysis of the variability of fixed and tracking photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 107, p. 351-364, 2014.

TREVELIN, Felipe Camargo et al. Estudo Comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos. **São Carlos School of Engineering**, 2014.

KELLY, Nelson A.; GIBSON, Thomas L. Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system. **Solar Energy**, v. 83, n. 11, p. 2092-2102, 2009.

ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL 2ª ED: Energia Solar - Conversão Direta da Radiação Solar em Energia Elétrica. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2005. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/atlas2005.zip>>. Acesso em: 18 jul. 2018.

CREA-MT (Mato Grosso). Crea (Org.). **Produção de energia solar deve atrair mais consumidores em MT**. 2015. Disponível em: <<https://www.crea-mt.org.br/portal/producao-de-energia-solar-deve-atrair-mais-consumidores-em-mt/>>. Acesso em: 20 jul. 2018.

HSU, Po-Chien et al. Effect of switching scheme on the performance of a hybrid solar PV system. **Renewable Energy**, v. 96, p. 520-530, 2016.

RONILSON DI SOUZA. Bluesol Energia Solar (Org.). **Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede ou Isolados? [Comparação]**. 2017. Disponível em: <<http://blog.bluesol.com.br/diferenca-sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede-e-isolados/>>. Acesso em: 20 jul. 2018.

GOOGLE EARTH-MAPAS. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/>>/. Acesso em: 08/10/2018.

National Centers for Environmental Information – NOAA. Magnet Field Calculators. Disponível em: <<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/>>. Acesso em: 08 out. 2018.

ARDUINO. Arduino. **Arduino FAQ: Frequently Asked Questions**. 2018. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/FAQ>>. Acesso em: 20 jul. 2018.

BRITES, Felipe Gonçalves; SANTOS, Vinicius Puga de Almeida. Motor de passo. **Pet Tele Universidade Federal Fluminense. Niterói/RJ**, 2008.

ADILSON THOMSEN. Filipeflop. **Controlando um Motor de Passo 5v com Arduino**. 2013. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/controlando-um-motor-de-passo-5v-com-arduino/>>. Acesso em: 22 jul. 2018.

Texas Instruments. **Datasheet: ULN2002A, ULN2003A, ULN2003AI, ULN2004A, ULQ2003A, ULQ2004A**. 1976, revisado em 2016.

Kiatronics. **Datasheet: 28BYJ-48 – 5V Stepper Motor**.

SUNROM TECHNOLOGIES. **Datasheet: Light Dependent Resistor – LDR**. 2008.

CRESESB (Brasil). Cepel (Org.). **Potencial Solar - SunData v 3.0**. 2018. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 27 ago. 2018.

WEATHER SPARK (Estados Unidos) (Org.). **Condições meteorológicas médias de Delmiro Gouveia**. 2018. Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com/y/31175/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Delmiro-Gouveia-Brasil-durante-o-ano>>. Acesso em: 27 ago. 2018.

BARKER, Laughlin; NEBER, Matthew; LEE, Hohyun. Design of a low-profile two-axis solar tracker. *Solar Energy*, v. 97, p. 569-576, 2013.

OLIVEIRA, Carlos Antônio Alves. Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias. 2007. 80 f. 2007. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)-Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

APÊNDICE

Apêndice A – Código fonte Arduino Uno

```

#include <Stepper.h>
int ldr1Pin = 0; //LDR no pino analógico A0
int ldr1Valor = 0; //Valor lido do LDR
int ldr2Pin = 1; //LDR no pino analógico A1
int ldr2Valor = 0; //Valor lido do LDR
int ldr3Pin = 2; //LDR no pino analógico A2
int ldr3Valor = 0; //Valor lido do LDR
int ldr4Pin = 3; //LDR no pino analógico A3
int ldr4Valor = 0; //Valor lido do LDR
#define leitormotor1 3
#define leitormotor2 12
#define fimdecurso 13
#define fimdecurso1 2
#define fimdecurso2 12
#define fimdecurso3 3
int Leiturafimdecurso = 0;
int Leiturafimdecurso1 = 0;
int Leiturafimdecurso2 = 0;
int Leiturafimdecurso3 = 0;
const int stepsPerRevolution = 500;
//Inicializa a biblioteca utilizando as portas de 8 a 11 para
//ligacao ao motor
Stepper Motor1(stepsPerRevolution, 4,6,5,7); //Motor de passo eixo 1
Stepper Motor2(stepsPerRevolution, 8,10,9,11); //Motor de passo eixo 2
void setup() {
Serial.begin(9600); //Inicia a comunicação serial para monitoramento.
Motor1.setSpeed(60); //Velocidade inicial do motor 1
Motor2.setSpeed(60); //Velocidade inicial do motor 2
pinMode(A4, OUTPUT);

```

```

pinMode(A5, OUTPUT);
pinMode(fimdecurso, INPUT_PULLUP);
pinMode(fimdecurso1, INPUT_PULLUP);
pinMode(fimdecurso2, INPUT_PULLUP);
pinMode(fimdecurso3, INPUT_PULLUP);
// digitalWrite(fimdecurso, 1);
}
void loop() {
  Leiturafimdecurso = digitalRead(fimdecurso); // (O valor lido será entre 0 e 1)
  Leiturafimdecurso1 = digitalRead(fimdecurso1); // (O valor lido será entre 0 e 1)
  Leiturafimdecurso2 = digitalRead(fimdecurso2); // (O valor lido será entre 0 e 1)
  Leiturafimdecurso3 = digitalRead(fimdecurso3); // (O valor lido será entre 0 e 1)
  ldr1Valor = analogRead(ldr1Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
  ldr2Valor = analogRead(ldr2Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
  ldr3Valor = analogRead(ldr3Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
  ldr4Valor = analogRead(ldr4Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
  //Leitura dos Sensores
  Serial.print(Leiturafimdecurso); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
  Serial.print(-Leiturafimdecurso1); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
  Serial.print(-Leiturafimdecurso2); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
  Serial.print(-Leiturafimdecurso3); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
  Serial.print(-ldr1Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor serial)
  Serial.print(-ldr2Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr2 no monitor serial)
  Serial.print(-ldr3Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr3 no monitor serial)
  Serial.println(-ldr4Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr4 no monitor serial)
  delay(100);
  while (ldr1Valor < ldr4Valor-10 && Leiturafimdecurso == 0 ) {
    for (int i= 0; i <= 3; i++){
      Motor1.step(-512); // Motor gira no sentido HORÁRIO 180 graus

```

```

digitalWrite(A4, HIGH); //Envia sinal para arduino leonardo de que o motor 1
foi ligado
delay(10);
Leiturasfimdecorso = digitalRead(fimdecorso); // (O valor lido será entre 0 e
1)
Leiturasfimdecorso1 = digitalRead(fimdecorso1); // (O valor lido será entre 0
e 1)
Leiturasfimdecorso2 = digitalRead(fimdecorso2); // (O valor lido será entre 0
e 1)
Leiturasfimdecorso3 = digitalRead(fimdecorso3); // (O valor lido será entre 0
e 1)
Ldr1Valor = analogRead(Ldr1Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
Ldr2Valor = analogRead(Ldr2Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
Ldr3Valor = analogRead(Ldr3Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
Ldr4Valor = analogRead(Ldr4Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
Serial.print(Leiturasfimdecorso); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
Serial.print(-Leiturasfimdecorso1); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
Serial.print(-Leiturasfimdecorso2); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
Serial.print(-Leiturasfimdecorso3); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
Serial.print(-Ldr1Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor serial)
Serial.print(-Ldr2Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr2 no monitor serial)
Serial.print(-Ldr3Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr3 no monitor serial)
Serial.println(-Ldr4Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr4 no monitor serial)
}
}
while (Ldr1Valor > Ldr4Valor+10 && Leiturasfimdecorso1 == 0) {
for (int i= 0; i <= 3; i++){
Motor1.step(512); // Motor gira no sentido ANTI-HORÁRIO 180 graus
digitalWrite(A4, HIGH); //Envia sinal para arduino leonardo de que o motor 1
foi ligado

```

```

delay(10);
Leiturasfimdecurso = digitalRead(fimdecurso); // (O valor lido será entre 0 e
1)
Leiturasfimdecurso1 = digitalRead(fimdecurso1); // (O valor lido será entre 0
e 1)
Leiturasfimdecurso2 = digitalRead(fimdecurso2); // (O valor lido será entre 0
e 1)
Leiturasfimdecurso3 = digitalRead(fimdecurso3); // (O valor lido será entre 0
e 1)
Ldr1Valor = analogRead(Ldr1Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
Ldr2Valor = analogRead(Ldr2Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
Ldr3Valor = analogRead(Ldr3Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
Ldr4Valor = analogRead(Ldr4Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
Serial.print(Leiturasfimdecurso); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
Serial.print(-Leiturasfimdecurso1); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
Serial.print(-Leiturasfimdecurso2); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
Serial.print(-Leiturasfimdecurso3); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
Serial.print(-Ldr1Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor serial)
Serial.print(-Ldr2Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr2 no monitor serial)
Serial.print(-Ldr3Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr3 no monitor serial)
Serial.println(-Ldr4Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr4 no monitor serial)
}
}
digitalWrite(4, LOW); // (Desliga um dos pinos de acionamento do motor 1)
digitalWrite(6, LOW); // (Desliga um dos pinos de acionamento do motor 1)
digitalWrite(5, LOW); // (Desliga um dos pinos de acionamento do motor 1)
digitalWrite(7, LOW); // (Desliga um dos pinos de acionamento do motor 1)
digitalWrite(A4, LOW); //Envia sinal para Arduino Leonardo de que o motor
1 foi desligado
while (Ldr2Valor < Ldr3Valor-10 && Leiturasfimdecurso2 == 0) {

```



```

for (int i= 0; i <= 3; i++){
  Motor2.step(-512); // Motor gira no sentido HORÁRIO 180 graus
  digitalWrite(A5, HIGH); //Envia sinal para arduino leonardo de que o motor 2
foi ligado
  delay(10);
  Leiturafimdecurso = digitalRead(fimdecurso); // (O valor lido será entre 0 e
1)
  Leiturafimdecurso1 = digitalRead(fimdecurso1); // (O valor lido será entre 0
e 1)
  Leiturafimdecurso2 = digitalRead(fimdecurso2); // (O valor lido será entre 0
e 1)
  Leiturafimdecurso3 = digitalRead(fimdecurso3); // (O valor lido será entre 0
e 1)
  ldr1Valor = analogRead(ldr1Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
  ldr2Valor = analogRead(ldr2Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
  ldr3Valor = analogRead(ldr3Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
  ldr4Valor = analogRead(ldr4Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
  Serial.print(Leiturafimdecurso); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
  Serial.print(-Leiturafimdecurso1); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
  Serial.print(-Leiturafimdecurso2); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
  Serial.print(-Leiturafimdecurso3); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
  Serial.print(-ldr1Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor serial)
  Serial.print(-ldr2Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr2 no monitor serial)
  Serial.print(-ldr3Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr3 no monitor serial)
  Serial.println(-ldr4Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr4 no monitor serial)
}
}
while (ldr2Valor > ldr3Valor+10 && Leiturafimdecurso3 == 0) {
  for (int i= 0; i <= 3; i++){
    Motor2.step(512); // Motor gira no sentido ANTI-HORÁRIO 180 graus

```

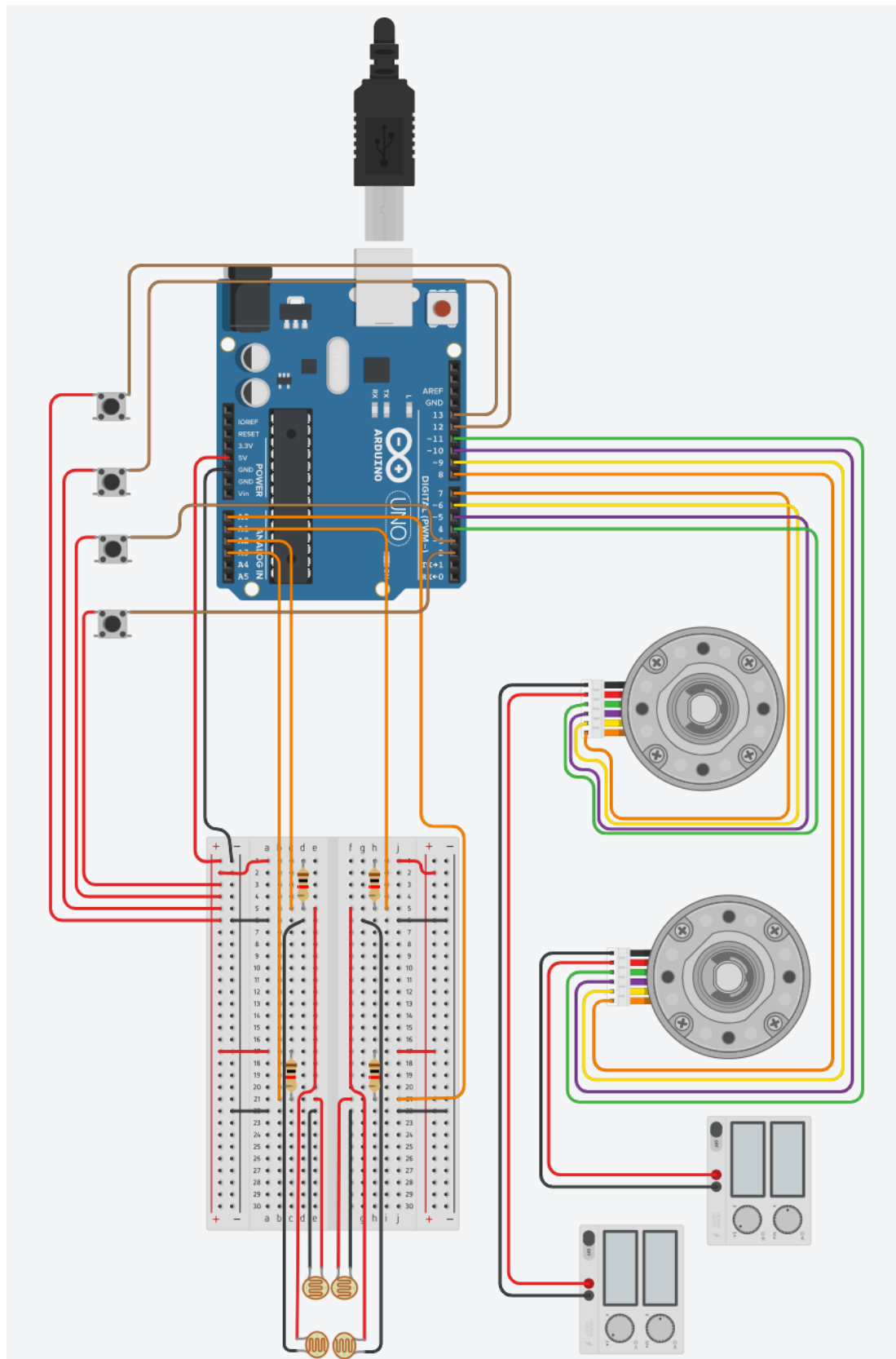
```

digitalWrite(A4, HIGH); //Envia sinal para arduino leonardo de que o motor 2
foi ligado
delay(10);
Leiturasfimdecurso = digitalRead(fimdecurso); // (O valor lido será entre 0 e 1)
Leiturasfimdecurso1 = digitalRead(fimdecurso1); // (O valor lido será entre 0
e 1)
Leiturasfimdecurso2 = digitalRead(fimdecurso2); // (O valor lido será entre 0
e 1)
Leiturasfimdecurso3 = digitalRead(fimdecurso3); // (O valor lido será entre 0
e 1)
Ldr1Valor = analogRead(Ldr1Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
Ldr2Valor = analogRead(Ldr2Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
Ldr3Valor = analogRead(Ldr3Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
Ldr4Valor = analogRead(Ldr4Pin); //(O valor lido será entre 0 e 1023)
Serial.print(Leiturasfimdecurso); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
Serial.print(-Leiturasfimdecurso1); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
Serial.print(-Leiturasfimdecurso2); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
Serial.print(-Leiturasfimdecurso3); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor
serial)
Serial.print(-Ldr1Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr1 no monitor serial)
Serial.print(-Ldr2Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr2 no monitor serial)
Serial.print(-Ldr3Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr3 no monitor serial)
Serial.println(-Ldr4Valor); // (Imprime o valor lido do Ldr4 no monitor serial)
}
}
digitalWrite(8, LOW); // (Desliga um dos pinos de acionamento do motor 2)
digitalWrite(10, LOW); // (Desliga um dos pinos de acionamento do motor
2)
digitalWrite(9, LOW); // (Desliga um dos pinos de acionamento do motor 2)
digitalWrite(11, LOW); // (Desliga um dos pinos de acionamento do motor
2)

```

```
    digitalWrite(A5, LOW); //Envia sinal para arduino leonardo de que o motor  
2 foi desligado  
}
```

Apêndice B – Esquema de Ligação Arduino Uno



Apêndice C – Código Fonte Arduino Leonardo

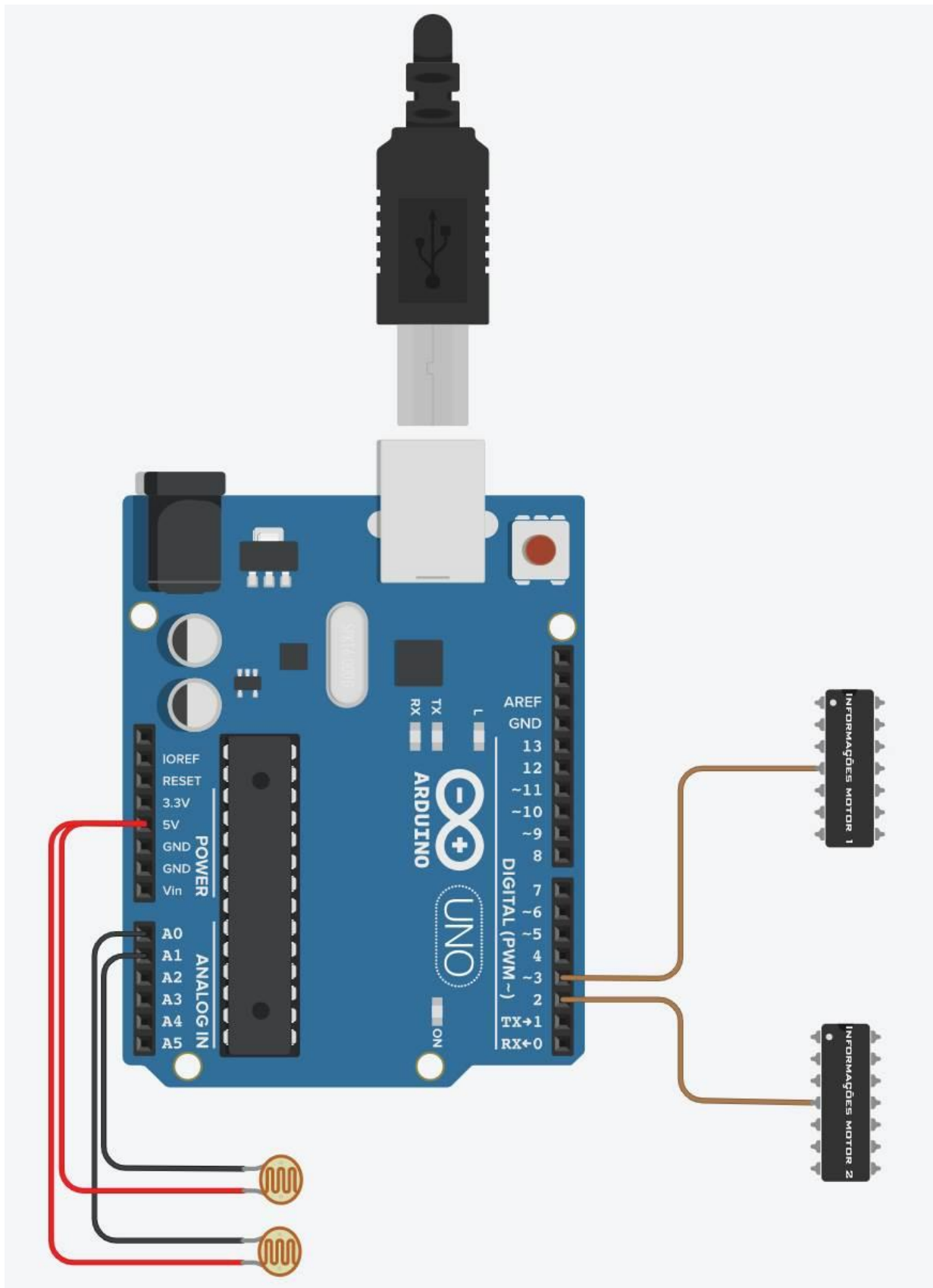
```

const int analogInPinA0 = A0; // Analog input pin that the potentiometer is
attached to
float sensorValueA0 = 0; // value read from the pot
const int analogInPinA1 = A1;
float sensorValueA1 = 0;
const int motor1pin = 3;
int estmotor1 = 0;
const int motor2pin = 2;
int estmotor2 = 0;
int linha = 0; // variavel que se refere as linhas do excel
int LABEL = 1;
int valorA0 = 0; // variavel que guarda o valor lido do potenciometro
int valorA1 = 0;
//Resistor de 1000 ohms
void setup() {
pinMode(motor1pin, INPUT_PULLUP);
pinMode(motor2pin, INPUT_PULLUP);
// initialize serial communications at 9600 bps:
Serial.begin(9600);
Serial.println("CLEARDATA"); // Reset da comunicação serial
Serial.println("LABEL,Hora,valorA0,valorA1,motor1,motor2,linha"); // Nomeia
as colunas
}
void loop() {
sensorValueA0 = analogRead(analogInPinA0)*0.0048875; // divisão de 5v por
1023
sensorValueA1 = analogRead(analogInPinA1)*0.0048875;
estmotor1 = digitalRead(motor1pin);
estmotor2 = digitalRead(motor2pin);
linha++; // incrementa a linha do excel para que a leitura pule de linha em
linha

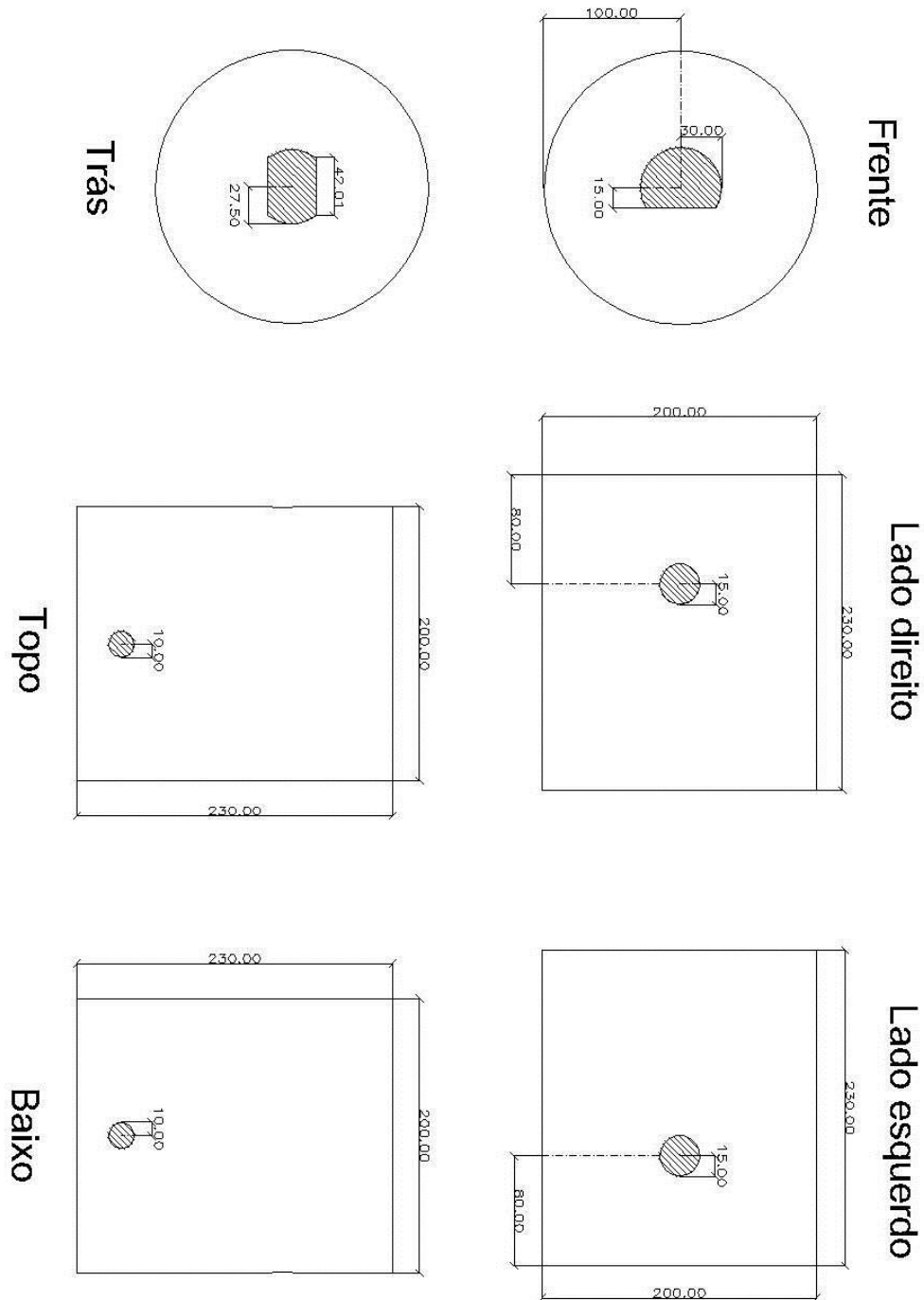
```

```
// read the analog in value:
// sensorValueA0 = analogRead(analogInPinA0)*0.0048875;
// sensorValueA1 = analogRead(analogInPinA1)*0.0048875;
Serial.print("DATA,TIME,"); //inicia a impressão de dados, sempre iniciando
Serial.print(sensorValueA0);
Serial.print(",");
Serial.print(sensorValueA1);
Serial.print(",");
Serial.print(estmotor1);
Serial.print(",");
Serial.print(estmotor2);
Serial.print(",");
Serial.println(linha);
delay(1000);
// print the results to the serial monitor:
// Serial.print("Tensao A0 = " );
// Serial.print(sensorValueA0,2);
// Serial.print(" Tensao A1 = " );
// Serial.println(sensorValueA1,2);
// delay(1000);
}
```

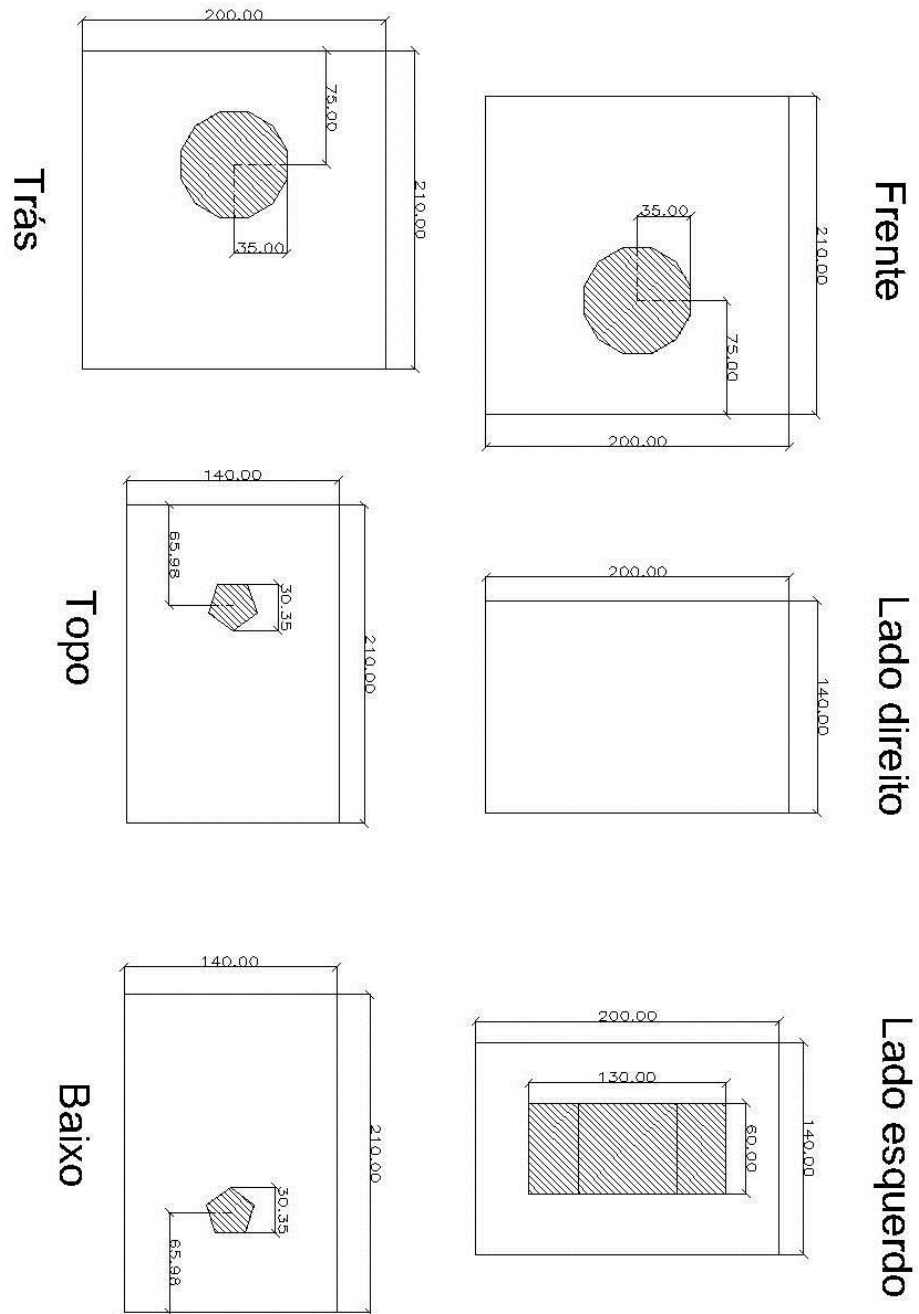
Apêndice D – Esquema de Ligação Arduino Leonardo



Apêndice E – Conexão Motor–Barra rosqueada impresso em 3D



Apêndice E – Suporte Porca–Braço impresso em 3D



Apêndice E – Estrutura em policloreto de vinila

