

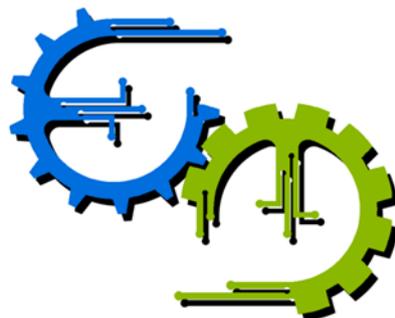
TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM  
RASTREADOR SOLAR COM DOIS GRAUS  
DE LIBERDADE PARA O CONTROLE DE  
PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Amanda Alina da Cruz Silva

Gabriel Monteiro Araújo da Silva

Brasília, Dezembro de 2018



**ENGENHARIA  
MECATRÔNICA**  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM  
RASTREADOR SOLAR COM DOIS GRAUS  
DE LIBERDADE PARA O CONTROLE DE  
PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Amanda Alina da Cruz Silva  
Gabriel Monteiro Araújo da Silva

*Relatório submetido como requisito parcial de obtenção  
de grau de Engenheiro de Controle e Automação*

Banca Examinadora

Prof. Marco Antonio Freitas do Egito Coelho, \_\_\_\_\_  
ENE/UnB  
*Orientador*

Prof. Lélío Ribeiro Soares Júnior, ENE/UnB \_\_\_\_\_  
*Banca examinadora*

Prof. João Manoel Dias Pimenta, ENM/UnB \_\_\_\_\_  
*Banca examinadora*

**Brasília, Dezembro de 2018**

## FICHA CATALOGRÁFICA

DA CRUZ SILVA, AMANDA ALINA SILVA, GABRIEL MONTEIRO ARAÚJO

Projeto e implementação de um rastreador solar com dois graus de liberdade para o controle de painéis fotovoltaicos,

[Distrito Federal] 2018.

x, 81p., (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2018). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1. Rastreador Solar      2. Energia Fotovoltaica      3. Pannel Fotovoltaico      4. Eficiência

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Título (Série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DA CRUZ SILVA, AMANDA ALINA; SILVA, GABRIEL MONTEIRO ARAÚJO, (2018). Projeto e implementação de um rastreador solar com dois graus de liberdade para o controle de painéis fotovoltaicos. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-*n*º022, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 87p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTORES: Amanda Alina da Cruz Silva; Gabriel Monteiro Araújo da Silva

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Projeto e implementação de um rastreador solar com dois graus de liberdade para o controle de painéis fotovoltaicos.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Amanda Alina da Cruz Silva; amandaalina6@gmail.com

Gabriel Monteiro Araújo da Silva; gabmonteiro479@gmail.com

Campus Darcy Ribeiro, FT, Universidade de Brasília

Brasília – DF – Brasil.

## **Dedicatórias**

*A todos os amigos e familiares que estiveram sempre ao meu lado em momentos críticos.*

*Gabriel Monteiro Araújo da Silva*

*À Valtrudes Leão, que estará sempre em minhas atitudes e memórias.*

*Amanda Alina da Cruz Silva*

## Agradecimentos

*Agradeço à Deus pelo dom da vida, à Maria pela intercessão constante e à minha família maravilhosa: Áurea, Rildo, Ariele, Alana e Jônatas, por me ensinarem sempre o que é o amor verdadeiro por meio do companheirismo constante e inabalável. A fé de vocês em mim me faz ir cada vez mais longe. Obrigada ainda a todos que me ajudaram e me ensinaram de alguma forma ao longo de toda essa jornada: familiares, amigos - especialmente ao Gabriel Monteiro, técnicos, porteiros e professores. Vocês foram essenciais para que esta graduação fosse concluída. "Não há ninguém tão rico que não tenha nada a aprender, nem tão pobre que não tenha nada a ensinar".*

*Amanda Alina da Cruz Silva*

*Imensa gratidão, primeiramente, aos meus pais, Francisco Carlos e Heloísa Monteiro, que sempre me apoiaram e me conduziram até neste momento. Além disso, agradeço à minha irmã, Natália Monteiro, que sempre esteve ao meu lado, cuidando e zelando por mim. Agradeço também a todos os meus amigos que carrego para a vida como família, pois sempre me levantaram nos momentos em que mais precisei. Em especial, Filipe Ribeiro, Lucas Ito e Samuel Sousa; que sempre tiveram bons conselhos para me ajudar em momentos difíceis, agradeço pela amizade sincera, pelo companheirismo, pelas risadas, pelos almoços juntos e pelos estudos. Agradeço, ainda, aos meus amigos do intercâmbio, pessoas extraordinárias que compartilhei um dos melhores momentos da minha vida (se não o melhor momento). Ana Paula Castro, Felipe Guirau, Fernanda Roters e Juliana Masello; vocês são como família para mim e agradeço à Deus pela oportunidade de ter vivido a melhor experiência possível em Chicago, porque sem vocês, jamais teria sido a mesma coisa. E, claro, agradeço à co-autora deste trabalho, Amanda Alina, por estar sempre junto nos trabalhos mais difíceis da faculdade e agora neste projeto. Nada melhor que dividir algo tão importante com alguém que você confia, pois torna tudo mais fácil e menos estressante. Foram muitos finais de semana que tivemos que abdicar de diversão para estarmos no laboratório, colocando o projeto para funcionar (valeu à pena). À todos vocês, um imenso obrigado! Em suma, é importante perceber que "Não importa o quão 'poderoso' você se torne, nunca tente fazer tudo sozinho, caso contrário irá falhar".*

*Gabriel Monteiro Araújo da Silva*

---

## RESUMO

Este trabalho aborda o projeto e desenvolvimento de um rastreador solar com dois graus de liberdade para fins experimentais. A partir disso, foi possível acoplá-lo a um painel fotovoltaico para analisar e estudar a geração de energia, na localidade de Brasília, utilizando esta abordagem. Os dados obtidos na prática puderam ser confrontados com os resultados teóricos e comparados com a geração de energia de painéis sem este tipo de mobilidade. Por fim, valida-se a aplicação deste tipo de sistema, uma vez que a placa fotovoltaica móvel gerou mais energia em comparação à placa fixa nos experimentos realizados.

Palavras Chave: Rastreador Solar; Energia Fotovoltaica; Painel Fotovoltaico.

---

## ABSTRACT

This paper approaches the development and designing of a dual-axis solar tracking system for experimental purposes. Given that, it was possible to couple a photovoltaic panel on this system in order to analyze and study the energy generated by this approach in Brasília. The data could be compared with the theoretical results and with the energy generated by fixed panels. Finally, it was possible to validate the application of this type of system, since the panel with the tracker system generated more energy in comparison to the fixed panel.

Keywords: Solar Tracker; Photovoltaic Energy, Photovoltaic Panel.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	2
1.3	OBJETIVOS DO PROJETO	2
1.4	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	2
<b>2</b>	<b>Fundamentos</b>	<b>4</b>
2.1	INTRODUÇÃO	4
2.2	ENERGIA SOLAR	4
2.2.1	RADIAÇÃO SOLAR	4
2.2.2	EFEITO FOTOVOLTAICO	5
2.2.3	A CÉLULA FOTOVOLTAICA	6
2.2.4	CÉLULA DE SILÍCIO POLICRISTALINO	7
2.2.5	PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	8
2.3	GEOMETRIA SOL-TERRA	10
2.4	RASTREADOR SOLAR	14
<b>3</b>	<b>Simulação</b>	<b>17</b>
3.1	INTRODUÇÃO	17
3.2	DESCRIÇÃO DA SIMULAÇÃO	17
3.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	17
<b>4</b>	<b>Projeto</b>	<b>20</b>
4.1	INTRODUÇÃO	20
4.2	REQUISITOS DO PROJETO	20
4.3	MODELAGEM	20
4.4	MATERIAIS UTILIZADOS	21
4.4.1	MADEIRA	21
4.4.2	EIXOS E ROLAMENTO	22
4.4.3	MOTORES DE PASSO	23
4.4.4	DRIVERS PARA MOTORES DE PASSO	25
4.4.5	RESISTORES	25
4.4.6	PLACAS FOTOVOLTAICAS	26

4.4.7	SENSORES LDR .....	26
4.4.8	MICROCONTROLADOR.....	27
4.4.9	SHIELD DATA LOGGER .....	27
4.4.10	BORNES E FIOS DE 1MM .....	28
4.4.11	COLAS, SOLDAS, PARAFUSOS E PREGOS.....	28
4.5	IMPLEMENTAÇÃO .....	29
4.5.1	MONTAGEM ESTRUTURAL.....	29
4.5.2	CIRCUITO ELETRÔNICO .....	30
4.5.3	LÓGICA COMPUTACIONAL.....	34
<b>5</b>	<b>Experimento .....</b>	<b>37</b>
5.1	INTRODUÇÃO.....	37
5.2	DESCRIÇÃO.....	37
5.3	DADOS ADQUIRIDOS .....	38
5.4	ANÁLISE DOS DADOS.....	42
<b>6</b>	<b>Considerações Finais.....</b>	<b>46</b>
6.1	CONCLUSÕES .....	46
6.2	PERSPECTIVAS FUTURAS.....	46
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>48</b>
	<b>Apêndice .....</b>	<b>50</b>
<b>I</b>	<b>Programas utilizados.....</b>	<b>51</b>
I.1	MATLAB.....	51
I.2	ARDUÍNO .....	53
	<b>Anexos.....</b>	<b>58</b>
<b>I</b>	<b>Descrição do conteúdo do CD.....</b>	<b>59</b>
<b>II</b>	<b>Datasheets utilizados .....</b>	<b>60</b>

# LISTA DE FIGURAS

2.1	Piranômetro (modelo SR20). [1].	5
2.2	Diagrama de célula fotovoltaica. Fonte: [2], 2011.	6
2.3	Esquema do campo elétrico criado numa célula fotovoltaica mediante a união P-N entre duas capas de semicondutores dopados. [3].	7
2.4	Curva de corrente x tensão (curva I-V). [4].	9
2.5	Radiação Incidente ao longo do ano. [5].	11
2.6	Ângulos de declinação solar. [5].	11
2.7	Ângulos de latitude e longitude.	12
2.8	Ângulo de inclinação. [5].	12
2.9	Ângulos de incidência e zenital. [6].	13
2.10	Ângulos de altitude, zênite e azimutal. [7].	14
2.11	Controle do painel fotovoltaico ao longo do dia.	15
2.12	Controle do painel fotovoltaico ao longo do dia e do ano. [8].	15
2.13	Gráfico comparativo entre um sistema fixo e um sistema com rastreamento solar. [9].	16
3.1	Ângulo de declinação solar em dependência dos dias do ano.	18
3.2	Ângulo azimutal em dependência do horário do dia.	19
3.3	Ângulo zênite em dependência dos dias do ano.	19
4.1	Projeto em 3D dos sistemas construídos.	21
4.2	Peças utilizadas para montar o rastreador solar. Cotas em milímetros.	22
4.3	Peças utilizadas para montar o sistema fixo de referência. Cotas em milímetros.	23
4.4	Ilustrações sobre o motor de passo 28BYJ-48.	24
4.5	Enrolamentos do motor de passo 28BYJ-48.	24
4.6	Esquemático do módulo eletrônico ULN2003A da GBK para motor de passo 28BYJ-48.	25
4.7	Resistores Utilizados.	26
4.8	Placa Solar 18V 2.5W Policristalina.	26
4.9	Sensor Light Dependent Resistor.	27
4.10	Arduíno Mega 2560, utilizado como placa microcontroladora do projeto.	27
4.11	Datalogger Shield utilizado neste projeto, já com o circuito final soldado.	28
4.12	Disposição dos LDR's.	29
4.13	Placa Solar 18V, 2.5W Policristalina.	30
4.14	Esquemático da conexão do Datalogger Shield com o Arduino Mega 2560.	32

4.15	Esquemático do circuito elétrico completo. ....	33
4.16	Fluxograma de funcionamento do algoritmo utilizado no projeto de rastreador solar. ....	36
5.1	Aquisição de dados sendo feita no telhado do prédio SG-11. ....	38
5.2	Comparativo das tensões colhidas para o sistema fixo versus sistema com rastreador solar. Dia nublado; 7,63 horas colhidas sem interrupção. ....	40
5.3	Comparativo das tensões colhidas para o sistema fixo versus sistema com rastreador solar. Dia ensolarado; 8,81 horas colhidas sem interrupção. ....	40
5.4	Comparativo das tensões colhidas para o sistema fixo versus sistema com rastreador solar. Dia Ensolarado; 9,08 horas colhidas sem interrupção. ....	41
5.5	Comparativo das tensões colhidas para o sistema fixo versus sistema com rastreador solar. Dia ensolarado, porém com nuvens e chuvisco no meio da tarde; 10,76 horas colhidas sem interrupção. ....	41
5.6	Comparativo das potências calculadas para o sistema fixo versus sistema com rastreador solar. Dia nublado; 7,63 horas colhidas sem interrupção. ....	42
5.7	Comparativo das potências calculadas para o sistema fixo versus sistema com rastreador solar. Dia ensolarado; 8,81 horas colhidas sem interrupção. ....	43
5.8	Comparativo das potências calculadas para o sistema fixo versus sistema com rastreador solar. Dia Ensolarado; 9,08 horas colhidas sem interrupção. ....	43
5.9	Comparativo das potências calculadas para o sistema fixo versus sistema com rastreador solar. Dia ensolarado, porém com nuvens e chuvisco no meio da tarde; 10,76 horas colhidas sem interrupção. ....	44

# LISTA DE TABELAS

2.1	Principais características do Sol. [6] .....	10
4.1	Esquema de cores da conexão do Datalogger Shield com o Arduíno da Figura 4.14. .	31
4.2	Esquema de cores da fiação do circuito eletrônico da Figura 4.15. ....	31
4.3	Constantes configuradas no programa.....	34
4.4	Mapeamento dos pinos analógicos e digitais do programa. ....	34
5.1	Amostra parcial dos dados colhidos para o dia 2 de dezembro de 2018. De 13h às 13h10min.....	38
5.2	Análise dos dados colhidos. ....	44
5.3	Rendimento do sistema com rastreador considerando o fixo como referência (100%).	45

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$G$	Irradiância solar	[Wh/m <sup>2</sup> ]
$G_n$	Intensidade da radiação solar incidente	[Wh/m <sup>2</sup> ]
$n$	Dia do ano	[dias]
$T$	Hora local	[horas]

## Símbolos Gregos

$\delta$	Declinação solar	[graus]
$\varphi$	Latitude	[graus]
$\lambda$	Longitude	[graus]
$\omega$	Hora angular	[graus]
$\beta$	Inclinação	[graus]
$\theta$	Ângulo de incidência	[graus]
$\theta_z$	Ângulo zenital	[graus]
$\alpha$	Ângulo de altitude solar	[graus]
$\Psi$	Ângulo azimutal	[graus]

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contextualização

O setor de energia solar tem se mostrado cada vez mais promissor e recorrente, tendo sua tecnologia aprimorada juntamente com a expansão de suas aplicações. Segundo [6], o Brasil apresenta um grande potencial de irradiação solar, justificando assim, o crescimento nos investimentos em energia fotovoltaica. Outrossim, o Brasil possui uma das maiores reservas de silício do mundo, favorecendo o desenvolvimento de indústrias locais de produção de células fotovoltaicas e gerando empregos. Felizmente, o setor fotovoltaico está sendo cada vez mais explorado no Brasil e no mundo, trazendo uma nova maneira de geração de energia elétrica.

Conforme [1], a ciência fotovoltaica estuda e examina a conversão de fótons emitidos na luz solar em força eletromotriz, que produz corrente elétrica. Essa conversão é feita por células fotovoltaicas constituintes dos painéis solares e são fabricadas, em grande parte, usando silício (Si) e podendo ser constituídas de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício de amorfo. Dessa forma, neste projeto, os painéis solares possuem células fotovoltaicas fabricadas com silício e constituídas de cristais policristalinos. Além disso, os módulos solares consistem de grandes quantidades de células fotovoltaicas conectadas em série e colocadas entre vidro temperado e *tedlar plate*, e emolduradas em alumínio na maioria das vezes. O conjunto dos módulos solares e de demais componentes como inversores, reguladores de carga, baterias, entre outros, formam um sistema fotovoltaico.

Como visto em [1], a primeira aplicação de um sistema fotovoltaico foi como fonte de energia para satélites. Conseqüentemente, os campos da tecnologia da informação, ciências da computação, internet, dentre outros, tiveram desenvolvimentos em grande escala de forma rápida. Atualmente, em grande parte, os sistemas fotovoltaicos são aplicados como fontes de energia e sendo uma solução interessante para a produção de energia em muitas localizações geográficas. Uma grande vantagem da energia solar é que ela é uma fonte renovável, ou seja, é disponibilizada pela natureza (o Sol) de forma infinita. Além disso, o sistema fotovoltaico possui grande durabilidade, reduzindo, assim, a necessidade de manutenções frequentes.

## 1.2 Definição do problema

Como dito anteriormente, a conversão de energia proveniente dos fótons emitidos na luz solar em força eletromotriz é capaz de gerar corrente elétrica. Esta é uma excelente alternativa para a preservação do planeta Terra e do meio ambiente de forma limpa e segura.

Valendo-se disso, foram desenvolvidas as placas fotovoltaicas que já são utilizadas para geração de energia. Normalmente tais placas são posicionadas em direção ao sol de forma fixa, assim sendo, não atuam sempre na posição de máxima eficiência de energia, subutilizando sua capacidade de geração. Entretanto, já são utilizados mecanismos para que isto não ocorra, fazendo a placa solar permanecer a maior quantidade de tempo possível perto de sua máxima eficiência, como é o caso da usina fotovoltaica de Trencin na Eslováquia, que utiliza um rastreador solar com dois graus de liberdade em seu sistema [10].

Um sistema de rastreamento solar visa maximizar a produção de energia, como mencionado acima, movimentando os painéis fotovoltaicos de forma a acompanhar o Sol ao longo do dia. Assim, o ângulo de incidência dos raios solares é otimizado, garantindo uma maior eficiência energética. Quanto mais estreito o ângulo de incidência, maior será a energia produzida dos painéis fotovoltaicos.

Sabendo disso, junto ao potencial de irradiação solar do Distrito Federal, este trabalho pretende colher dados para Brasília quantificando experimentalmente o percentual de energia a mais que é gerado valendo-se de um rastreador solar em relação ao sistema fixo amplamente utilizado.

## 1.3 Objetivos do projeto

Este projeto tem como finalidade realizar a implementação de um protótipo de rastreador solar para auxiliar na orientação das células fotovoltaicas, de forma que a luz incida perpendicularmente na superfície dos painéis, bem como colher dados para a localidade de Brasília valendo-se de tal sistema. O rastreamento solar a ser planejado possuirá dois graus de liberdade, aprimorando a produção energética não apenas ao longo do dia, mas também ao longo do ano. Os dados obtidos por meio deste projeto serão confrontados com o de um sistema imóvel, delineando-se um comparativo entre um sistema fotovoltaico com os painéis fixos e um sistema com rastreamento solar.

## 1.4 Apresentação do Manuscrito

O capítulo 2 aborda a fundamentação teórica necessária para o estudo base deste projeto. No capítulo 3, os resultados de simulação teórica adquiridos de um script MATLAB são discutidos, bem como são apresentados gráficos que demonstram o comportamento de alguns ângulos explicitados no capítulo 2. O capítulo 4 é dedicado a implementação do projeto, materiais utilizados, montagem do sistema de rastreamento solar, cálculos utilizados para o projeto e detalhamento dos

componentes utilizados no sistema de rastreamento solar. Além disso, este capítulo conta com a explicação do algoritmo desenvolvido para a movimentação do painel fotovoltaico, bem como as conexões necessárias para o funcionamento do circuito. O capítulo 5 aborda os resultados experimentais, a aquisição e análise dos dados, bem como o processamento destes dados. Por fim, o capítulo 6 apresenta as considerações finais do projeto.

# Capítulo 2

## Fundamentos

### 2.1 Introdução

Antes de partir para o projeto e implementação do sistema de rastreamento solar, que é o foco principal deste trabalho, é importante salientar alguns conceitos relacionados à energia fotovoltaica. Esses conceitos auxiliam na determinação de equações matemáticas que servem de apoio para a modelagem das simulações realizadas, bem como para a modelagem do sistema físico real. Dito isso, a seguir, encontram-se explicações sobre a Energia Solar, o Efeito Fotovoltaico, a Célula Fotovoltaica, Célula de Silício Policristalino, Painéis Fotovoltaicos e, por fim, o Rastreador Solar.

### 2.2 Energia Solar

Sabe-se que nem toda energia irradiada pelo Sol atinge a superfície terrestre, apenas uma pequena parcela dela. Contudo, essa radiação que chega é suficiente para ser utilizada em geração de energia solar fotovoltaica, além de outras formas de aproveitamento artificial como energia solar térmica e arquitetura bioclimática. Conforme [6], a energia fotovoltaica é obtida na conversão direta da luz em eletricidade através do Efeito Fotovoltaico, sendo as células fotovoltaicas os dispositivos fabricados com material semicondutor responsáveis por essa conversão.

#### 2.2.1 Radiação Solar

A energia liberada pelas reações termonucleares no núcleo do Sol acontece por meio de radiações eletromagnéticas. Entretanto, as características das radiações são alteradas à medida que ocorrem interações com a atmosfera. A poluição atmosférica e outras interações reduzem a intensidade das radiações que atingem a superfície terrestre em forma de radiação difusa e radiação direta. Para [1], enquanto que a radiação difusa atinge a superfície depois de se espalhar pela atmosfera, a direta atinge a superfície sem reflexões. Os piranômetros são sistemas de medição (sensores) utilizados para captação da intensidade da radiação solar incidente e estão ilustrados na Figura

2.1.

A potência incidente por unidade de área é definida como irradiância ( $W/m^2$ ) e irradiação solar se define pelo conceito de irradiância em um intervalo de tempo conhecido ( $Wh/m^2$ ).



Figura 2.1: Piranômetro (modelo SR20). [1].

### 2.2.2 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 pelo físico francês Alexandre Edmond Becquer e consiste na criação de tensão elétrica ou de uma corrente elétrica em um material semicondutor após a sua exposição à luz. Dessa forma, a fim de esclarecer o efeito fotovoltaico, é necessário compreender o comportamento das partículas em semicondutores. Segundo [11], a condução dos elétrons ocorre pelo fato dos semicondutores possuírem banda de valência cheia e banda de condução vazia. Os elétrons da banda de valência são transportados para a banda de condução quando recebem fótons de radiação eletromagnética provenientes do núcleo solar. Esse transporte de elétrons de uma banda para outra gera corrente elétrica no interior da estrutura cristalina do semicondutor. Dessa forma, surge uma lacuna na banda de valência que é rapidamente integralizada por outro elétron livre através do efeito da recombinação, fazendo com que o cristal fique eletricamente neutro.

Assim, é necessário fazer a dopagem do semicondutor para a potencialização do efeito fotovoltaico do cristal de silício. A dopagem consiste na adição de elementos químicos que modificam as ligações atômicas e, conseqüentemente, a formação cristalina para fazer a utilização da corrente elétrica gerada no interior do semicondutor. Com isso, o processo de transferência de elétrons para a banda de condução é facilitado, criando uma região interna no semicondutor denominada por Junção P-N.

Caso a Junção P-N seja exposta à radiação solar, os fótons excitam os elétrons livres. Estes elétrons, por sua vez, criam uma corrente elétrica na área da junção. Conectando externamente as camadas, é possível utilizar a corrente elétrica gerada. A figura 2.2 ilustra uma célula fotovoltaica de silício com Junção P-N. Vale ressaltar que os fótons contêm quantidades diferentes de energia correspondente aos diferentes comprimentos de onda do espectro luminoso, e que quando os fótons

atingem uma superfície condutora estes podem ser refletidos, absorvidos, ou passar direto, sendo que apenas os fótons absorvidos geram a corrente elétrica.

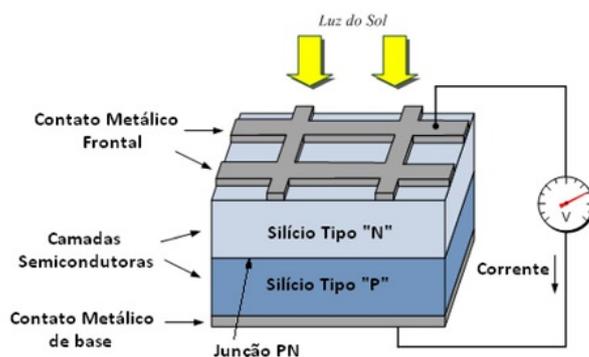


Figura 2.2: Diagrama de célula fotovoltaica. Fonte: [2], 2011.

### 2.2.3 A Célula Fotovoltaica

A célula fotovoltaica é um dispositivo elétrico de estado sólido capaz de converter a luz diretamente em energia elétrica valendo-se do efeito fotovoltaico [12]. É considerada a unidade básica responsável pela conversão da energia solar em elétrica.

Sabe-se que quando um semicondutor é exposto à luz, um fóton pode atingir um elétron, movendo-o do seu átomo e criando assim uma lacuna neste. Quando isto acontece, normalmente o elétron excitado encontra rapidamente outra lacuna para voltar, e assim a energia proveniente do fóton é dissipada na forma de calor. O princípio de uma célula fotovoltaica é obrigar os elétrons e as lacunas a moverem-se ordenadamente para criar uma corrente elétrica, ao invés de simplesmente recombinarem-se no material semicondutor.

Para evitar a recombinação cria-se nas células um campo elétrico permanente por meio de uma junção P-N. Como explicado anteriormente, uma junção P-N consiste em duas camadas dopadas respectivamente, de modo P e N. Na dopagem do tipo N há um número de elétrons livres maior (N, negativo), enquanto na do tipo P há maior quantidade de lacunas (P, positivas). O material permanece eletricamente neutro, já que todos os átomos do semicondutor como os do material dopante são neutros.

Ao criar uma junção P-N, os elétrons livres da região N entram instantaneamente na região P para se recombinar com as lacunas dessa região, provocando durante toda a existência da união uma carga positiva em uma parte da região N, e em uma carga negativa em uma parte da região P, conforme a Figura 2.3. O conjunto é chamado região de depleção e forma o tal campo elétrico permanente, de direção N-P. Este campo elétrico faz da região um diodo, que só permite o fluxo de corrente numa direção, deixando que os elétrons se movam apenas da região P para N e nunca na direção oposta.

Fazendo uma analogia, pode-se dizer que uma célula fotovoltaica é o equivalente de um gerador de energia acrescido de um diodo. Para fazer uma eficiente célula solar é necessário maximizar a

absorção, minimizar o reflexo e a recombinação, maximizando assim a condução.

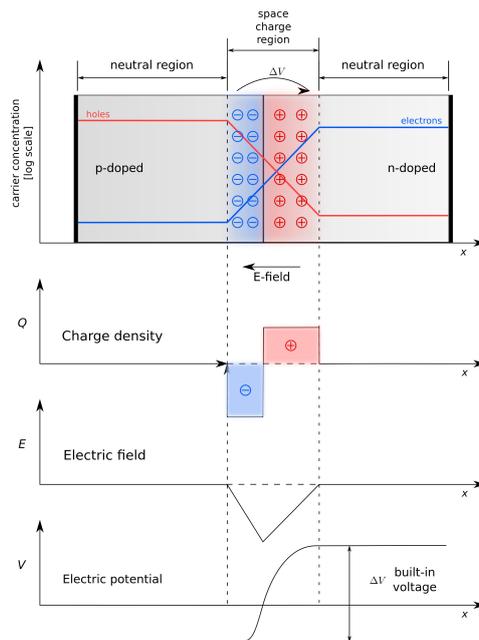


Figura 2.3: Esquema do campo elétrico criado numa célula fotovoltaica mediante a união P-N entre duas capas de semicondutores dopados. [3].

Uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica. Apenas mantém um fluxo de elétrons estabelecidos num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela. A intensidade da corrente elétrica gerada variará conforme a intensidade da luz incidente.

Existem vários tipos de células feitas de diferentes semicondutores, elementos de dopagem e métodos de fabricação. A célula de silício é a mais utilizada atualmente, devido a abundância deste material na crosta terrestre, entre outros fatores.

#### 2.2.4 Célula de Silício Policristalino

Em 1954, nos laboratórios Bell, foi produzida a primeira célula solar de silício, que possuía uma eficiência inicial de 5,7%. Esta rapidamente atraiu o interesse do programa espacial norte-americano, devido à sua vantajosa relação entre potência e unidade de peso. Com o aperfeiçoamento nas aplicações espaciais, a tecnologia fotovoltaica espalhou-se para as aplicações terrestres. Pode-se dividir as células de silício em três subcategorias:

- As células de silício monocristalino estão constituídas por um único cristal de silício. Este tipo de células apresenta uma cor azul escuro uniforme.
- As células de silício policristalino (ou multicristalino) estão constituídas por um conjunto de cristais de silício, sendo o seu rendimento inferior ao das células monocristalinas. Este tipo de células apresenta uma cor azul mais intenso.

- As células de silício amorfo. São menos eficientes que as células de silício cristalino mas também menos caras. Este tipo de célula é, por exemplo, o que se emprega em aplicativos solares de pequeno porte como relógios ou calculadoras.

Para a célula de silício ( $Si$ ) costuma-se usar o fósforo como elemento de dopagem N, que fica exposta ao sol, e o boro ( $B$ ) como elemento de dopagem P, fica na parte inferior da célula, e sua concentração de dopagem é maior que a do tipo-N. Estes elementos possuem, respectivamente, 4, 5 e 3 elétrons na camada de valência.

São colocados contatos metálicos frontais e traseiros, que completam o circuito permitindo o fluxo de elétrons, sendo que os contatos frontais, sobre a parte tipo N, causam sombra e reflexão, diminuindo a eficiência da célula. Na teoria, é possível diminuir as perdas por reflexão ao se diminuir a quantidade de contatos frontais mas quanto menos condutores para captar os elétrons liberados pelo efeito fotovoltaico, mais elétrons serão recombinados nos átomos de silício. Com esta recombinação, estes elétrons perdem a energia adquirida que é transformada em calor, fazendo a célula ser ainda mais ineficiente. Assim, busca-se ter o máximo de contatos frontais possível utilizando-se a menor área possível.

As células mais utilizadas hoje em dia possuem uma eficiência entre 13% e 19%. Eficiência é a quantidade de energia elétrica que a célula fotovoltaica é capaz de produzir por  $1m^2$  durante 1 hora de funcionamento em condições de laboratório ( $STC = 25^\circ C - 1000W/m^2 - 1.5AM$ ). Por exemplo, uma célula fotovoltaica de 14% de eficiência consegue produzir, em condições de laboratório, 140 Watts por  $1m^2$  em 1 hora.

### 2.2.5 Painéis Fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos consistem em várias células dispostas em série. Geralmente são usadas 36, 60 ou 72 células fotovoltaicas para montar um painel fotovoltaico [13]. A energia gerada pelos painéis fotovoltaicos é chamada de energia solar fotovoltaica. Neste projeto, utilizam-se painéis fotovoltaicos de 32 células, disponibilizados pela Universidade de Brasília, para a realização do experimento.

O arranjo de células é encapsulado em um módulo para a sua sustentação mecânica, proteção contra a umidade e dissipação de calor. O módulo é construído de forma laminada e a tecnologia atualmente empregada garante uma vida útil superior a 20 anos [14]. A parte frontal é normalmente de vidro temperado e anti-reflexivo. A camada seguinte, que cobre os contatos elétricos e as células, protegendo-as dos raios ultravioleta, é de acetato de vinil etileno. Na região posterior temos outra camada de vidro ou então termoplástico *Tedlar*, bem como os pontos de interconexão elétrica. Todo o conjunto é apoiado em uma moldura de alumínio para facilitar a fixação dos módulos nas estruturas de suporte. A Figura 2.4 ilustra os seguintes aspectos:

- Corrente de curto-circuito ( $I_{cc}$ ): Máxima corrente que pode entregar um dispositivo sob condições determinadas de radiação e temperatura correspondendo a tensão nula e conse-

quentemente a potência nula;

- Tensão de circuito aberto ( $V_{ca}$ ): Máxima tensão que pode entregar um dispositivo sob condições determinadas de radiação e temperatura correspondendo a circulação de corrente nula e consequentemente a potência nula;
- Potência de Pico ( $P_{mp}$ ): É o valor máximo de potência que o dispositivo pode entregar. Corresponde ao ponto da curva no qual o produto  $V \times I$  é máximo;
- Corrente a máxima potência ( $I_{mp}$ ): corrente entregue ao dispositivo quando este se encontra trabalhando na potência máxima, sob condições determinadas de radiação e temperatura. É utilizada como corrente nominal do mesmo;
- Tensão a máxima potência ( $V_{mp}$ ): tensão entregue ao dispositivo quando este se encontra trabalhando na potência máxima, sob condições determinadas de radiação e temperatura. É utilizada como tensão nominal do mesmo.

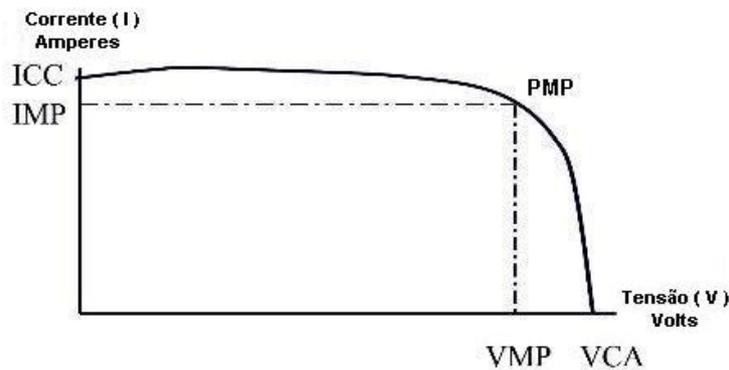


Figura 2.4: Curva de corrente x tensão (curva I-V). [4]

A representação típica da característica de saída de um dispositivo fotovoltaico (célula, módulo, sistema) denomina-se curva corrente tensão. A corrente de saída mantém-se praticamente constante dentro da amplitude de tensão de funcionamento e, portanto, o dispositivo pode ser considerado uma fonte de corrente constante neste âmbito. A corrente e a tensão em que opera o dispositivo fotovoltaico são determinadas pela radiação solar incidente, pela temperatura ambiente, e pelas características da carga conectadas ao mesmo.

É importante se atentar ao fato de que é a carga que determina o ponto de funcionamento do sistema na curva  $I$  VS  $V$ . Para tal, deve-se traçar a curva característica da carga sobre o gráfico da Figura 2.4 então o ponto de intersecção entre as duas curvas será o ponto de funcionamento, enquanto a área abaixo desta é a Potência gerada.

O resultado de uma mudança na intensidade de radiação é uma variação na corrente de saída para qualquer valor de tensão. A corrente varia com a radiação de forma diretamente proporcional. A tensão mantém-se praticamente constante. O principal efeito provocado pelo aumento da temperatura do módulo é uma redução da tensão de forma diretamente proporcional.

## 2.3 Geometria Sol-Terra

O Sol é a principal fonte de energia para o planeta Terra, tendo a grande função de regular os ecossistemas. No seu núcleo, o Sol realiza reações termonucleares que disponibilizam e liberam energia para o espaço por meio de radiação eletromagnética. Essa energia são fótons irradiados que percorrem o espaço até atingir o planeta Terra com uma velocidade de propagação por volta de  $300.000 \text{ km/s}$  aproximadamente. As principais características do Sol estão listadas na Tabela 2.1.

Principais Características do Sol	
Massa	$1,989 \times 10^{30} \text{ [kg]}$
Raio	$696.000 \text{ [km]}$
Densidade Média	$1.409 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$
Densidade Central	$1,6 \times 10^3 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$
Distância	$1,499 \times 10^8 \text{ [km]}$
Potência Luminosa	$3,83 \times 10^{26} \text{ [W]}$
Temperatura Efetiva	$5.785 \text{ [K]}$
Temperatura Central	$1,5 \times 10^7 \text{ [K]}$
Período Rotacional no Equador	$25 \text{ [dias]}$
Período Rotacional na Latitude $60^\circ$	$29 \text{ [dias]}$

Tabela 2.1: Principais características do Sol. [6]

Conforme [15], a Terra descreve uma trajetória elíptica em torno do Sol e possui uma inclinação em seu eixo de  $23,45^\circ$  em relação ao plano normal à elipse. Este conhecimento implica nas estações do ano e nas durações de dias e noites. Além disso, é de senso comum que o Sol nasce no Leste e se põe no Oeste. Um dos parâmetros geométricos mais importantes é a declinação solar ( $\delta$ ), que determina a posição angular do Sol ao meio dia solar em relação ao equador. A declinação solar se dá no intervalo entre  $-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$  e o seu valor máximo ocorre em 21 de Junho no solstício de inverno, enquanto que seu valor mínimo ocorre em 21 de Dezembro no solstício de verão. Já quando ocorre o período de equinócios, entre 21 de Março e 21 de Setembro, os raios solares se alinham com o plano do Equador e o dia tem uma duração igual à noite. Assim, nos equinócios, a declinação solar é nula ( $\delta = 0$ ).

De forma mais genérica, a declinação solar, para uma determinada época do ano, pode ser calculada por meio da Equação (2.1).

$$\delta = \frac{23,45 \sin(360(284 + n))}{365} \quad (2.1)$$

Em que  $n$  corresponde ao dia do ano (entre 1 e 365). A Figura 2.6 ilustra a variação da declinação solar ao longo do ano.

O Distrito Federal possui uma das melhores irradiações do Centro-Oeste e do Brasil, sendo  $5,8 \text{ kWh/m}^2$ . As coordenadas geográficas do DF são: latitude  $-15^\circ46'47''$  e longitude  $-47^\circ55'47''$ . A Figura 2.5 ilustra graficamente a incidência de radiação ao longo do ano.

### Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Brasília  
 Município: BrasÁlia , DF - BRA  
 Latitude: 15,7° S  
 Longitude: 47,929722° O  
 Distância do ponto de ref. (15,779722° S; 47,929722° O): 8,9 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m².dia]																										
✓	Plano Horizontal	0° N	Jan	4,67	Fev	5,58	Mar	4,53	Abr	5,00	4,72	Jun	4,78	Jul	4,07	Ago	5,60	Set	5,28	Out	4,86	Nov	4,75	Dez	4,72	Média	4,93	Delta	1,05
✓	Ângulo igual a latitude	16° N	Jan	4,35	Fev	5,35	Mar	4,58	Abr	5,39	5,42	Jun	5,88	Jul	5,88	Ago	6,14	Set	5,43	Out	4,57	Nov	4,48	Dez	4,38	Média	5,13	Delta	1,78
✓	Maior média anual	19° N	Jan	4,28	Fev	5,27	Mar	4,54	Abr	5,43	5,52	Jun	5,81	Jul	5,99	Ago	6,22	Set	5,43	Out	4,53	Nov	4,37	Dez	4,26	Média	5,14	Delta	1,96
✓	Maior mínimo mensal	6° N	Jan	4,57	Fev	5,53	Mar	4,57	Abr	5,18	5,02	Jun	5,14	Jul	5,34	Ago	5,78	Set	5,36	Out	4,68	Nov	4,68	Dez	4,61	Média	5,04	Delta	1,21

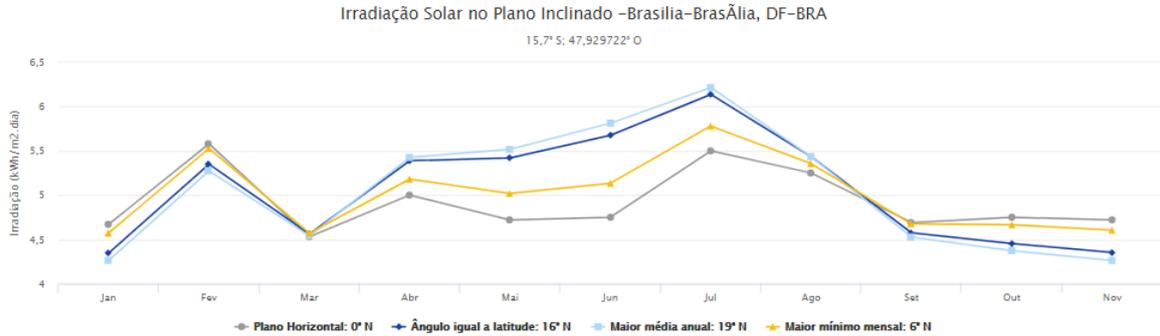


Figura 2.5: Radiação Incidente ao longo do ano. [5]

Além da declinação solar, alguns ângulos da geometria solar são importantes para determinar a posição do Sol e calcular a irradiância. São eles: latitude ( $\varphi$ ), longitude ( $\lambda$ ), hora angular ( $\omega$ ), inclinação ( $\beta$ ), ângulo de incidência ( $\theta$ ), ângulo zenital ( $\theta_z$ ), ângulo de altitude solar ( $\alpha$ ), ângulo azimutal ( $\Psi$ ).

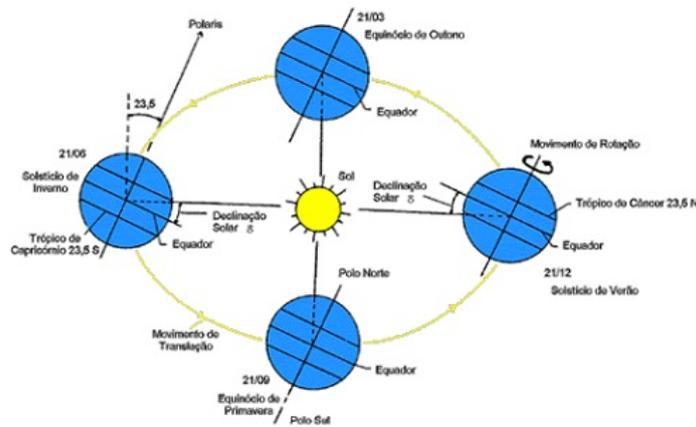


Figura 2.6: Ângulos de declinação solar. [5]

Latitude ( $\varphi$ ) é definida pela posição angular ao norte ou ao sul em relação à linha do Equador, local definido como latitude zero. Cada linha paralela traçada em relação à linha do Equador é dada no intervalo entre  $-90^\circ \leq \varphi \leq +90^\circ$ . A Figura 2.7 ilustra a configuração de latitude.

Longitude ( $\lambda$ ) é definida pela posição angular ao oeste ou a leste em relação ao meridiano de Greenwich, local definido como longitude zero. Os fusos horários e a hora solar são definidos pela longitude, que é dada no intervalo entre  $-180^\circ \leq \lambda \leq +180^\circ$ . A Figura 2.7 ilustra a configuração de longitude.

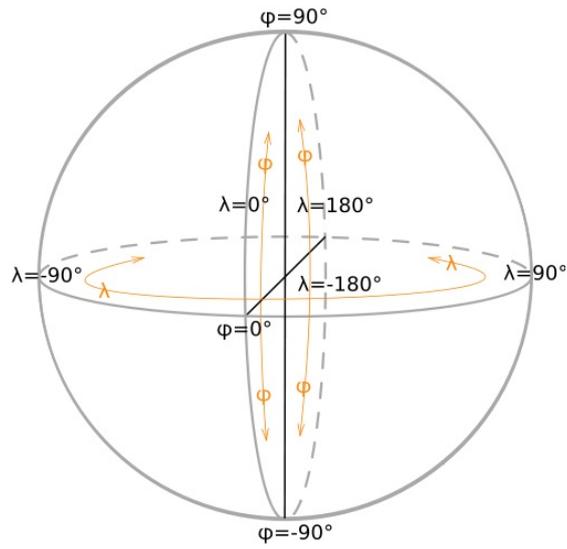


Figura 2.7: Ângulos de latitude e longitude.

Hora angular ( $\omega$ ) é definida pelo ângulo entre a posição do sol e o meridiano local. Segundo [15], esse ângulo varia numa velocidade angular de  $15^\circ$  por hora devido à rotação da Terra em torno do próprio eixo, ou seja, rotacionando  $360^\circ$  em aproximadamente 24 horas. A hora angular pode ser calculada por meio da Equação (2.2):

$$\omega = (12 - T) * 15^\circ \quad (2.2)$$

Em que T corresponde à hora local (entre 0 e 24h).

Inclinação ( $\beta$ ) é definida pelo ângulo entre o plano da superfície do painel solar e a superfície horizontal, como a Figura 2.8 ilustra.

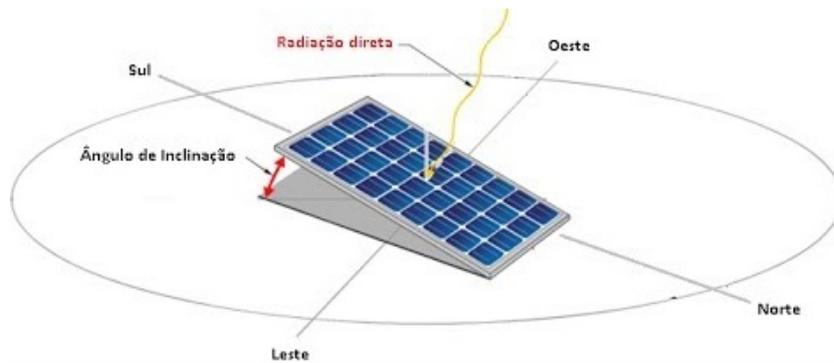


Figura 2.8: Ângulo de inclinação. [5]

Ângulo de incidência ( $\theta$ ) é definido pelo ângulo formado entre o plano normal à superfície e a irradiação direta incidente no plano, assim como sugere na Figura 2.9.

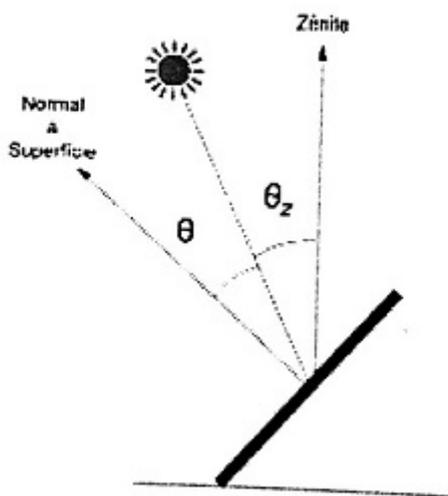


Figura 2.9: Ângulos de incidência e zenital. [6]

Assim, é possível determinar a irradiância solar ( $G$ ) sobre uma superfície por meio do ângulo de incidência ( $\theta$ ) e a normal à essa superfície, como mostrado na Equação (2.3) e explicitado em [6].

$$G = G_n \cos(\theta) \quad (2.3)$$

Em que  $G_n$  é a intensidade da radiação solar incidente.

Ângulo zenital ( $\theta_z$ ) é definido pelo ângulo entre a irradiação direta incidente no plano e a vertical do plano, numa faixa entre  $0^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$ . Pode-se constatar que quanto maior o ângulo zênite, menor a irradiância incidente. Na verdade,  $\theta_z$  indicará o melhor ângulo de elevação do painel fotovoltaico, de forma que os raios solares incidam perpendicularmente ao plano do painel. Como conceitua [15], o ângulo zenital pode ser descrito através da Equação (2.4) a seguir. Além disso, as Figuras 2.9 e 2.10 representam o ângulo zenital.

$$\cos \theta_z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (2.4)$$

Ângulo de altitude solar ( $\alpha$ ), ou elevação, é definido pela altura angular do Sol medida a partir do plano horizontal, é dado no intervalo entre  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  e pode ser obtida por meio da Equação (2.5) abaixo, como descrito por [6]. É importante ressaltar que a elevação muda durante o dia, além de depender do dia do ano e da latitude do local. Ainda, vale observar que o ângulo zenital é complementar do ângulo de altitude solar, assim como ilustra a Figura 2.10.

$$\sin \alpha = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (2.5)$$

Ângulo azimutal ( $\Psi$ ), de acordo com [6], é definido pelo ângulo entre a direção do polo norte e a projeção no plano horizontal da normal à superfície terrestre. Este ângulo é positivo se medido

no sentido horário a partir do polo norte, como exemplificado na Figura 2.10. Outrossim, o ângulo azimutal é definido como na Equação (2.6).

$$\cos \Psi = \frac{-\sin \alpha \sin \varphi + \sin \delta}{\cos \alpha \cos \varphi} \quad (2.6)$$

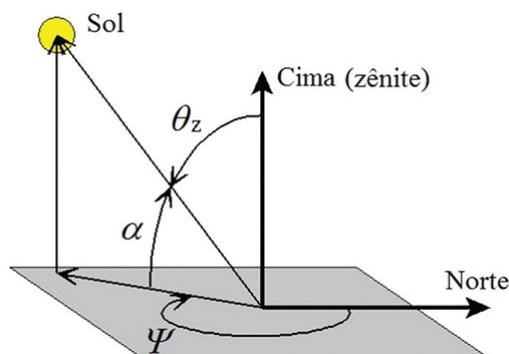


Figura 2.10: Ângulos de altitude, zênite e azimutal. [7]

## 2.4 Rastreador Solar

Como mencionado anteriormente, um sistema de rastreamento solar visa maximizar a produção de energia, movimentando os painéis fotovoltaicos de forma a acompanhar o Sol ao longo do dia. Dessa forma, conforme [15], o ângulo de incidência dos raios solares é otimizado, garantindo assim, uma maior eficiência energética. Quanto mais estreito o ângulo de incidência, maior será a energia produzida dos painéis fotovoltaicos. Os rastreadores solares auxiliam a orientar as células de forma que a luz incida perpendicularmente na superfície dos painéis, e são comumente usados em painéis fotovoltaicos instalados diretamente no solo ou instalações solares livres, como as árvores solares. Existem dois tipos de sistema de rastreadores solares: com um grau de liberdade ou dois graus de liberdade.

Sistemas de rastreamento com um grau de liberdade movimentam os painéis em um eixo, tipicamente alinhados com norte (para localizações do hemisfério sul do planeta, como é o caso do Brasil) ou sul (para localizações do hemisfério norte do planeta). Essas configurações permitem que os painéis sigam o movimento do sol desde o nascente (leste) ao poente (oeste). A Figura 2.11 ilustra o controle do painel fotovoltaico com a utilização de um rastreador solar com um grau de liberdade.

Já os sistemas de rastreamento com dois graus de liberdade, os painéis são movimentados em dois eixos. Esse tipo de sistema maximiza a produção de energia solar ao longo do ano, uma vez que além de seguir o movimento diário do sol, como nos sistemas de rastreamento de um grau

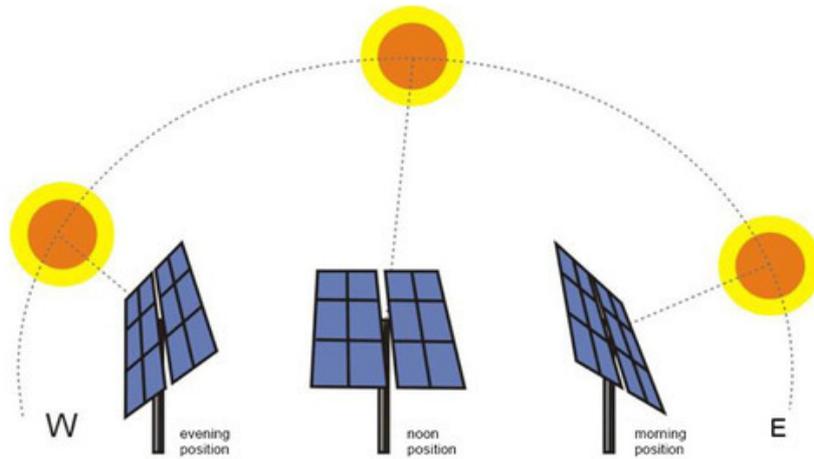


Figura 2.11: Controle do painel fotovoltaico ao longo do dia.

de liberdade, também rastreia as variações sazonais na altura do sol, corrigindo as inclinações norte-sul dos painéis. De acordo com [9], este sistema é indicado para lugares com latitudes altas, onde a posição do sol varia drasticamente entre o verão e o inverno. Além disso, esses seguidores solares são projetados para climas com pouco ou nenhuma neve, tornando mais viável em climas mais quentes, como é o caso do Brasil. Como dito anteriormente, neste projeto, utiliza-se um sistema de rastreamento com dois graus de liberdade. A Figura 2.12 demonstra um esquema de um painel fotovoltaico controlado por um rastreador solar com dois graus de liberdade.

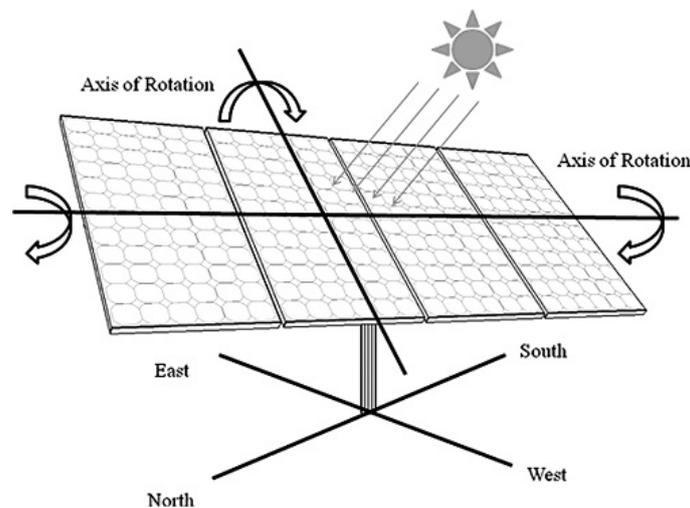


Figura 2.12: Controle do painel fotovoltaico ao longo do dia e do ano. [8]

Segundo [16], geralmente, um sistema de rastreamento solar com um grau de liberdade aumenta o ganho de 25% a 35%, enquanto que um sistema com dois graus de liberdade acrescenta de 5% a 10% em cima do ganho do rastreamento de um eixo. Contudo, ter um sistema de rastreamento solar possui algumas desvantagens também. Conforme [9], o custo de instalação e manutenção tendem a ser bastante elevados, devido ao uso de tecnologias mais complexas e de peças móveis para o seu funcionamento. Outra desvantagem é que o sistema todo é muito pesado para ser usado

em projetos de telhados solares, sendo comumente utilizado em painéis fotovoltaicos instalados diretamente no solo ou instalações solares livres. Em outras palavras, os painéis solares são tipicamente instalados nos telhados das residências, reduzindo a necessidade de um sistema de rastreamento solar. Já para usinas fotovoltaicas, os rastreadores podem ser um investimento interessante, visto que as instalações dos painéis são feitas em terreno plano.

Além disso, como visto em [16], os rastreadores solares são mais usados em projetos comerciais de grande potência, usualmente com mais de 1 MW de potência. A Figura 2.13 exemplifica uma comparação entre a energia gerada por um sistema fixo e por um sistema com rastreador solar.

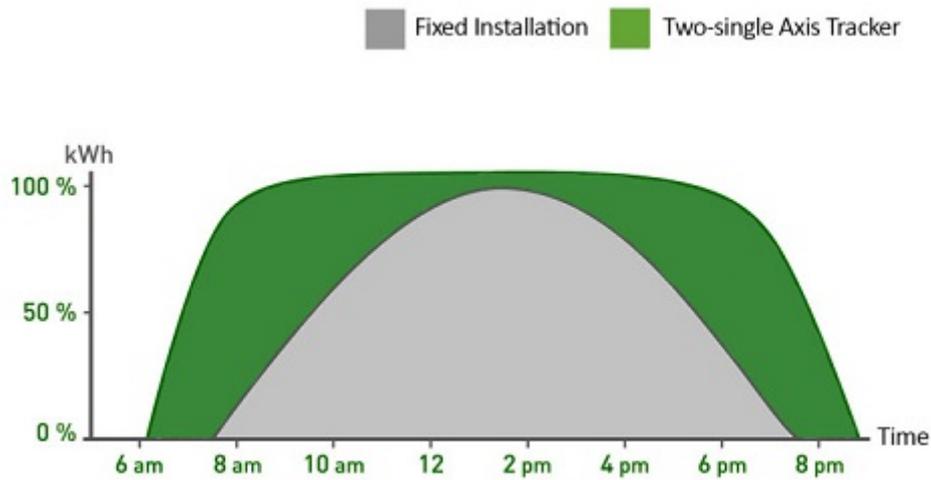


Figura 2.13: Gráfico comparativo entre um sistema fixo e um sistema com rastreamento solar. [9].

# Capítulo 3

## Simulação

### 3.1 Introdução

Desenvolveu-se um algoritmo no *software* MATLAB para simular os diferentes ângulos de incidência da irradiação solar para aplicação em sistemas fotovoltaicos. Dessa forma, utiliza-se a posição geográfica de Brasília, que está situada, aproximadamente,  $15^\circ$  no sentido do polo Sul de latitude em referência à linha do Equador para realizar as análises teóricas.

### 3.2 Descrição da Simulação

O algoritmo completo encontra-se na seção **Apêndice I Programas utilizados**. Para a simulação, cria-se um vetor de dias, que varia de 1 a 365; um vetor de horas do dia, que varia de 5 a 19 - considera-se que o Sol nasce as 5h e se põe as 19h, variando de 2 min em 2 min aproximadamente. Além disso, define-se o ângulo  $\phi = -15,02^\circ$ , que é a latitude de Brasília em relação à linha do equador.

Utilizando a Equação (2.2) como referência, calcula-se a hora angular  $\omega$  ao longo do dia, e com a equação (2.1), calcula-se o ângulo de declinação solar ao longo do ano. Dessa forma, a Figura 3.1 representa o gráfico da declinação solar em dependência dos dias do ano.

O algoritmo também calcula os ângulos de zênite ( $\theta_z$ ), de altitude solar ( $\alpha$ ) e azimutal ( $\psi$ ) com a utilização, respectivamente, das Equações (2.4), (2.5), (2.6). Assim, é possível traçar também as curvas de ângulo azimutal em dependência das horas do dia e de ângulo de zênite em dependência dos dias do ano, como as Figuras 3.2 e 3.3, respectivamente, ilustram.

### 3.3 Análise dos Resultados

Conforme mencionado anteriormente na seção 2.3, é possível observar graficamente, a partir da Figura 3.1, que o ângulo de declinação solar está contido no intervalo entre  $-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$ . A declinação solar é nula por volta dos dias 80 e 264, que representam, respectivamente,

os dias de 21 de Março e 21 de Setembro. Além disso, é possível observar também que a declinação solar apresenta seu valor máximo e mínimo, respectivamente por volta dos dias 172 e 355 (ou 21 de Junho e 21 de Dezembro).

O gráfico da Figura 3.2 apresenta informações relevantes com relação ao ângulo azimutal no decorrer do dia. É possível constatar graficamente que o ângulo é máximo no Sol nascente e poente, enquanto que o ângulo é nulo ao meio-dia. Isso se deve ao fato de que, ao meio-dia, a projeção do Sol no plano horizontal da normal à superfície é um vetor nulo, visto que o Sol está alinhado com o eixo de zênite; enquanto que o vetor da projeção ostenta maiores distâncias no início e no fim do dia (vide Figura 2.10).

Além disso, é possível obter informações relevantes com relação ao ângulo de zênite ao longo do ano. Conforme mencionado anteriormente na seção 2.3, o ângulo  $\theta_z$  indicará a melhor inclinação do painel fotovoltaico e a curva da Figura 3.3 demonstra este comportamento ao longo do ano. É perceptível que Brasília possui ângulos zenitais negativos nos meses de Janeiro, Fevereiro, Novembro e Dezembro. Dessa forma, a fim de obter melhor incidência solar, a face dos painéis deveria ficar virada para o hemisfério sul nessa época do ano. Nos outros meses, devido aos ângulos serem positivos, a face dos painéis deveria ficar voltada para o hemisfério norte e o ângulo máximo chega próximo de  $40^\circ$  perto do dia 172 (ou 21 de Junho).

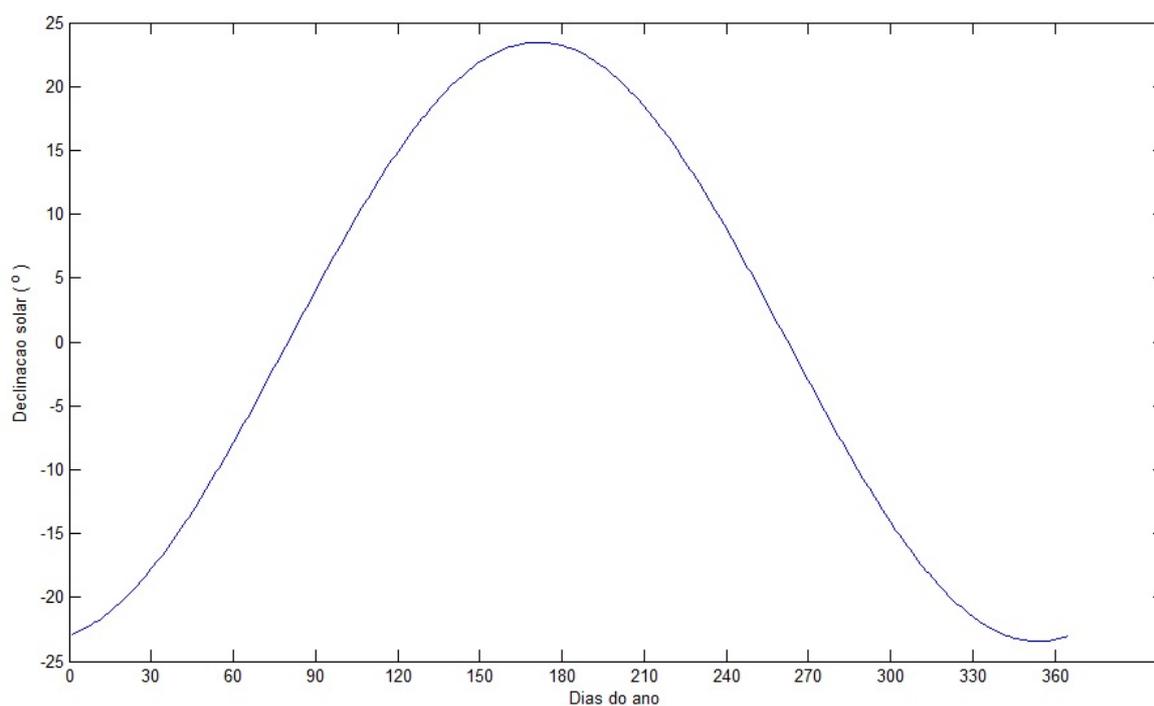


Figura 3.1: Ângulo de declinação solar em dependência dos dias do ano.

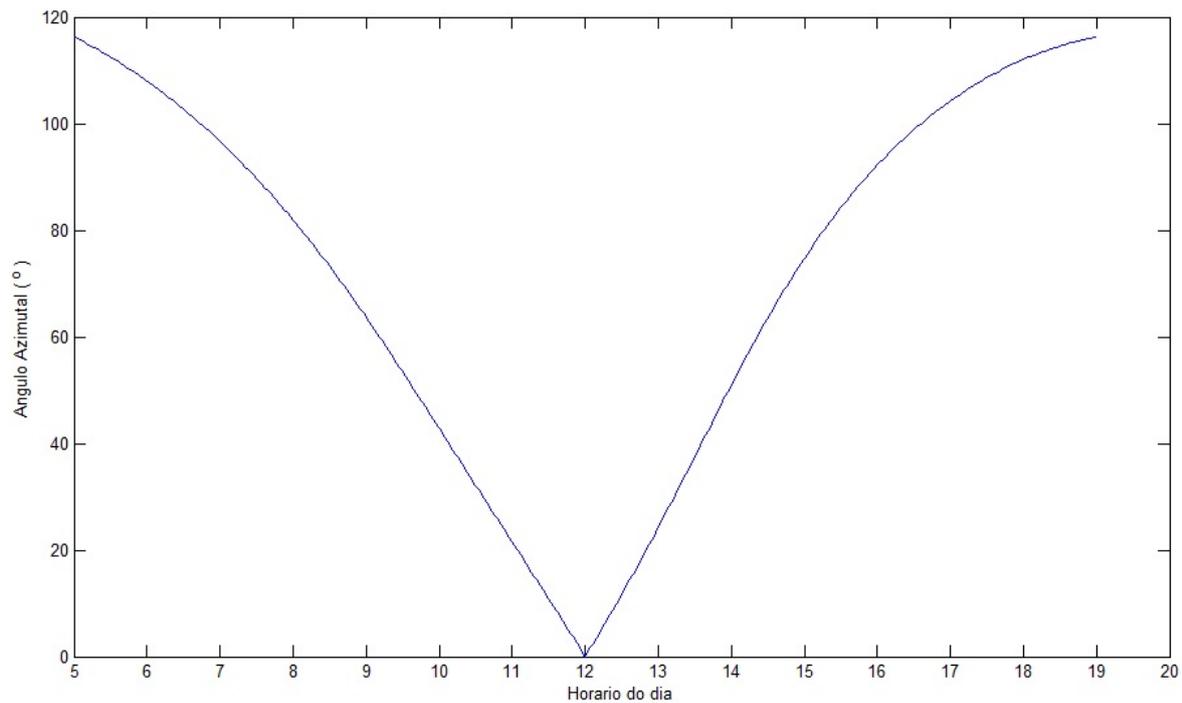


Figura 3.2: Ângulo azimutal em dependência do horário do dia.

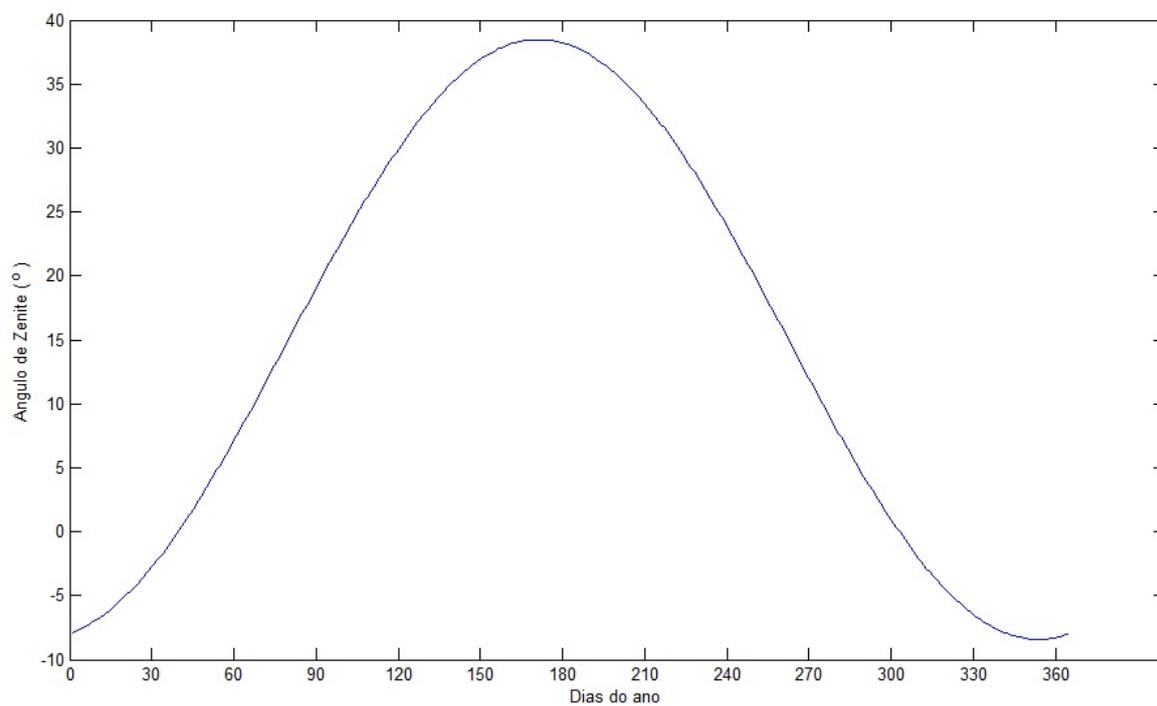


Figura 3.3: Ângulo zênite em dependência dos dias do ano.

# Capítulo 4

## Projeto

### 4.1 Introdução

Nesta seção, pretende-se descrever o protótipo implementado, estabelecendo assim os parâmetros que foram levados em consideração no experimento bem como um manuscrito para facilitar uma posterior replicação, se desejável.

### 4.2 Requisitos do Projeto

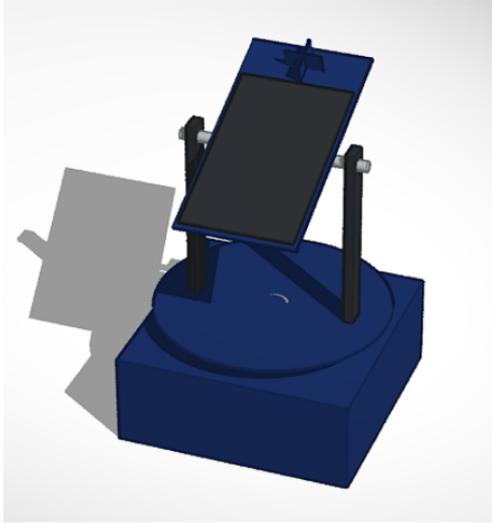
Haja vista que o rastreador solar implementado tem por finalidade colher dados sobre o comportamento de rastreadores para a localidade de Brasília, levando em consideração o dia do ano e a hora do dia, foram definidos como requisitos do projeto:

- Possuir dois graus de liberdade, ou seja, movimentação em dois eixos;
- Portar sensores para que o sistema seja automatizado em malha fechada;
- Conter dispositivo para gravar os dados colhidos para posterior análise;
- Dispor de proteção para o sistema eletrônico;
- Ter portabilidade para facilitar o manuseio e transporte até o telhado;
- Ser de baixo custo, uma vez que este projeto não possui com nenhum investimento ou patrocínio;

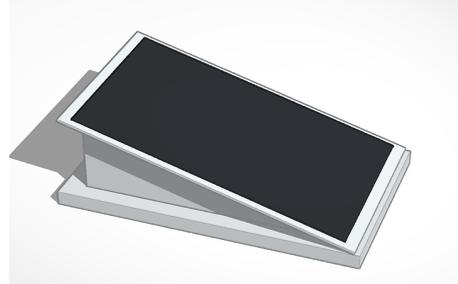
### 4.3 Modelagem

Assim sendo, projetou-se e implementou-se o rastreador solar buscando atender os requisitos levantados. A modelagem 3D do sistema móvel bem como o que será utilizado como referência pode ser visto na Figura 4.1.

Os dois graus de liberdade são atingidos por meio do disco que se moverá em ângulo de azimute, e do eixo superior cinza, que se moverá em ângulo de zênite. Ambos os movimentos serão realizados com o auxílio de um motor. A placa de referência não se move, está apenas posicionada em um aparato inclinado em aproximadamente  $15.5^\circ$  graus.



(a) Modelagem 3D do rastreador solar experimental.



(b) Modelagem 3D do sistema de referência experimental.

Figura 4.1: Projeto em 3D dos sistemas construídos.

É interessante notar que por meio dessa modelagem o sistema poderia ser totalmente impresso em 3D.

## 4.4 Materiais Utilizados

Os materiais utilizados e a razão da escolha encontram-se descritos nessa seção. A maioria dos recursos utilizados no projeto foram de reaproveitamento, doação ou empréstimos conseguidos na própria Universidade de Brasília.

### 4.4.1 Madeira

Devido à versatilidade da madeira ela foi utilizada na maior parte da estrutura de sustentação do rastreador. Além disso, ela possui um baixo ponto de condutividade térmica, bem diferente por exemplo do metal que, após longo período de exposição ao sol elevaria bastante sua temperatura, e conseqüentemente a da placa fotovoltaica, provocando perturbações no sistema. Foi utilizada madeira MDF em duas espessuras: 2mm e 5 mm, sendo que a menos espessa (2 mm), usou-se para as partes móveis, visando diminuir o torque que os motores deveriam oferecer, enquanto a de 5mm ficou nas áreas de proteção do circuito eletrônico. Foram necessárias as seguintes peças:

- 1 peça de 200 mm x 300 mm x 2 mm;

- 2 peças de 200 mm x 30 mm x 2 mm;
- 2 peças de 20 mm x 40 mm x 2 mm;
- 3 peças de 250 mm x 250 mm x 10 mm;
- 2 peças de 100 mm x 250 mm x 10 mm;
- 2 peças de 100 mm x 230 mm x 10 mm;
- 1 disco de diâmetro 250 mm e espessura 2 mm;

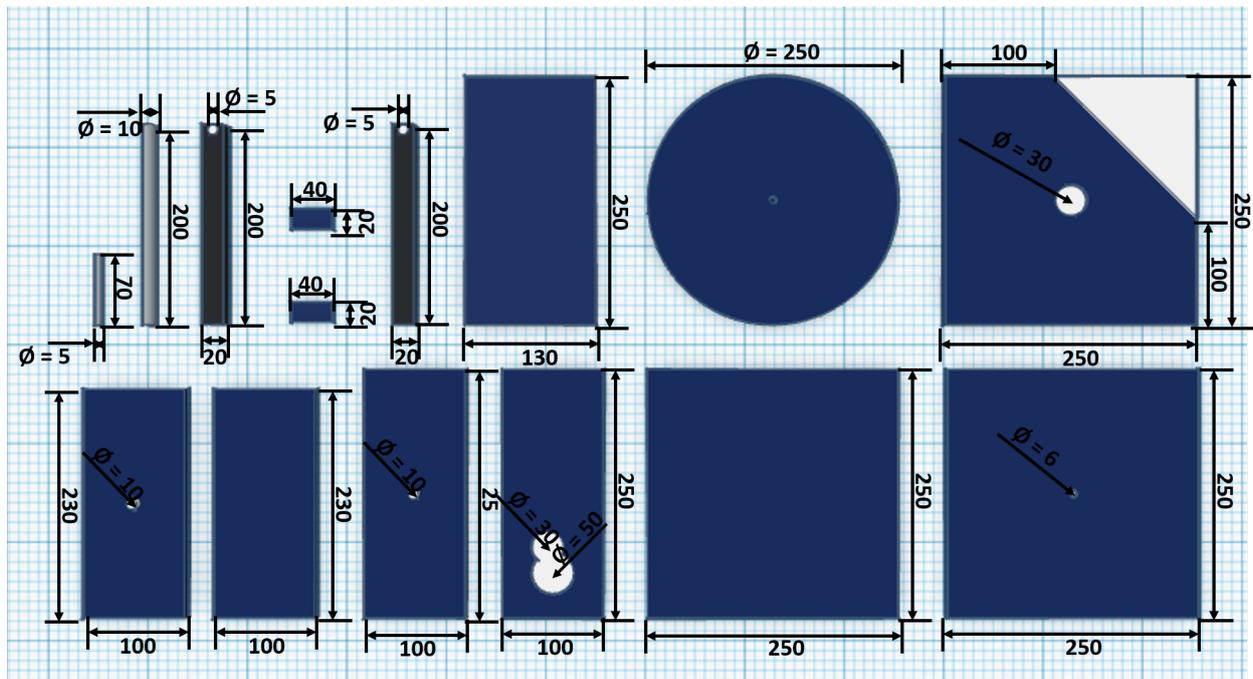


Figura 4.2: Peças utilizadas para montar o rastreador solar. Cotas em milímetros.

Todas as peças em madeira foram adquiridas na própria Universidade de Brasília, seja nos retalhos de móveis da prefeitura ou sobras de projetos da Oficina do SG 11. Vale ressaltar que a Figura 4.2 apresenta as dimensões do sistema mecânico modelado para a placa com o rastreador solar, enquanto que a Figura 4.3 apresenta as dimensões do sistema com a placa fixa. Algumas dessas peças foram furadas nos locais tal qual a Figura 4.2 sugere, seguindo as medidas indicadas dos diâmetros.

#### 4.4.2 Eixos e Rolamento

No rastreador existem dois eixos, sendo um feito de plástico que possui dimensões de 200mm de comprimento e 10mm de diâmetro, enquanto o outro é de metal e tem dimensões de 70mm de comprimento e 5mm de diâmetro que faz par com o rolamento de diâmetro de 6mm que foram encontrados no almoxarifado do SG 11, mas que podem ser feitos manualmente de madeira ou impressão 3D.

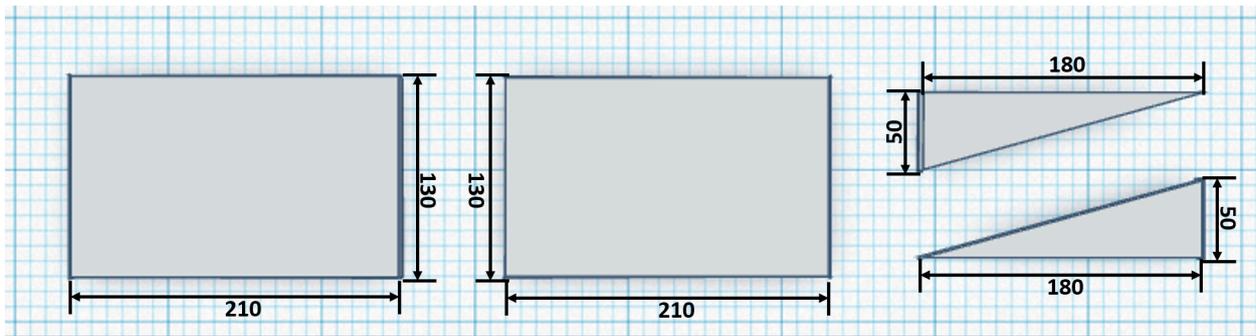


Figura 4.3: Peças utilizadas para montar o sistema fixo de referência. Cotas em milímetros.

### 4.4.3 Motores de Passo

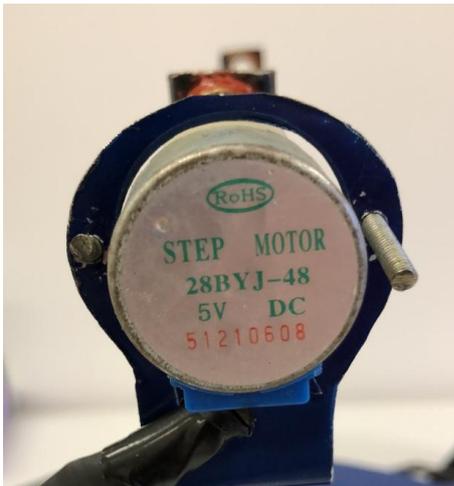
Como atuadores foram usados dois motores de passos 28BYJ-48, que são muito utilizados em projetos de pequeno porte, devido à sua versatilidade e baixíssimo custo. Além disso, os motores de passo tem características importantes para o projeto, como:

- Precisão de posicionamento;
- Excelente repetibilidade;
- Ótimo controle de velocidade, visto que a velocidade do motor está diretamente relacionada com a frequência de acionamento das fases;
- Permite que o sistema de controle seja aberto, pois na maioria dos casos dispensa realimentação;
- Pode manter-se imóvel sem causar danos;
- Elevado torque de retenção para rotações baixas;

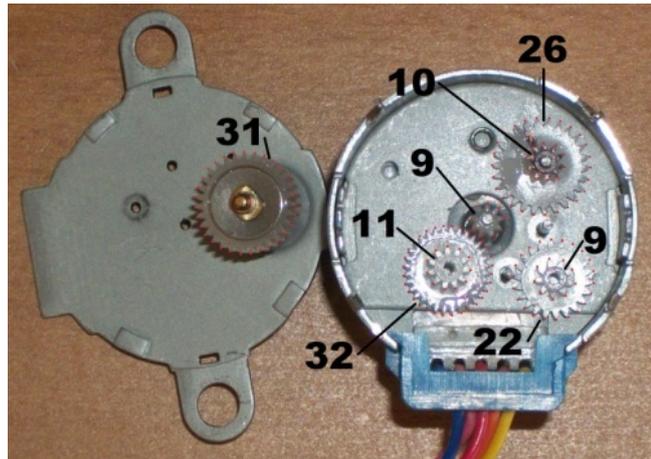
Eles possuem alimentação de 5 Volts conforme o *datasheet* II. Esse motor possui uma redução na ordem de 1/64, ou seja, em seu interior há um conjunto de engrenagens que reduz a velocidade de giro do motor(ou RPM - rotações por minuto) . Isso é interessante por dois motivos: primeiro que, devido às leis da física, ao se reduzir a rotação do motor aumenta-se a o torque disponível no sistema; segundo que, sendo a redução do motor na ordem de 1/64 (de acordo com o *datasheet*), para o motor dar uma volta(360°) em seu próprio eixo ele precisará dar 4096 passos, o que nos leva a obter uma resolução de aproximadamente 0,088° por passo.

Conforme mostrado na Figura 4.4b a caixa de redução tem várias engrenagens, com diferentes quantidades de dentes. O cálculo para determinar com maior precisão a redução, aproximada pelo fabricante no valor de 64, é descrito a seguir.

$$Redução = \frac{31 * 32 * 26 * 22}{11 * 10 * 9 * 9} = \frac{283712}{4455} = \frac{25792}{405} = 63,68395\dots$$



(a) Motor de passo 28BYJ-48.



(b) Caixa de redução do motor de passo 28BYJ-48. Os números são a quantidade de dentes em cada engrenagem.

Figura 4.4: Ilustrações sobre o motor de passo 28BYJ-48.

Assim sendo, o cálculo do número de passos do motor interno necessários para girar uma volta do eixo externo é dado por:

$$\text{Número de Passos} = \frac{64 * 25792}{405} = 4075,7728395 \dots$$

Esse valor pode ter uma pequena variação devido as folgas nas engrenagens.

O motor possui quatro bobinas, e cinco fios de saída, sendo um para cada enrolamento e o quinto fio é o comum, caracterizando assim um motor unipolar. Sua configuração pode ser vista na Figura 4.5. Dito isso, temos que o atuador funcionará corretamente se aplicarmos em seus enrolamentos internos (também chamados de fases ou bobinas) um comando elétrico seguindo uma sequência correta de forma a fazer o eixo do motor girar em incrementos bem precisos (valores múltiplos da resolução que é de aproximadamente  $0.088^\circ$ ). Assim sendo, teremos quatro pinos digitais do Arduino que irão acionar cada uma das fases do motor de passo por meio de um circuito acionador denominado *driver* do motor.

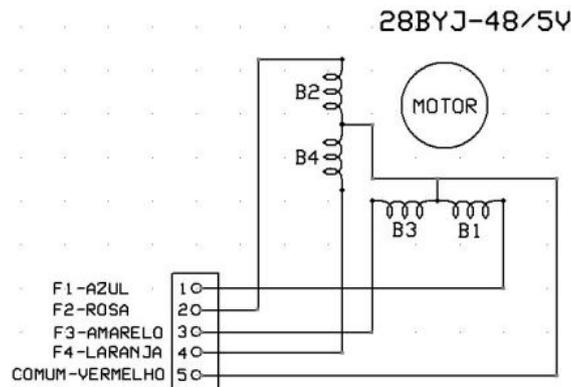


Figura 4.5: Enrolamentos do motor de passo 28BYJ-48.

O *datasheet* completo deste motor se encontra nos anexos.

#### 4.4.4 Drivers para Motores de Passo

Uma vez que o microcontrolador não fornece corrente suficiente para o acionamento do motor, é necessário usar um *driver* ou algum tipo de circuito intermediário. Este circuito é a unidade acionadora do motor e para este projeto fez-se necessário o uso de dois *drivers*, um para cada atuador, sendo que o modelo escolhido foi o módulo eletrônico ULN2003A da GBK, ilustrado na Figura 4.6.

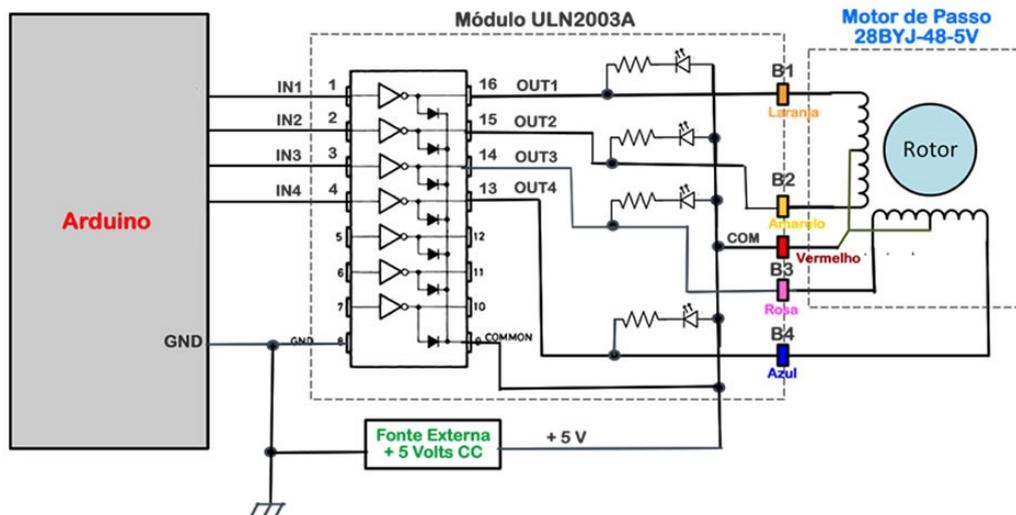


Figura 4.6: Esquemático do módulo eletrônico ULN2003A da GBK para motor de passo 28BYJ-48.

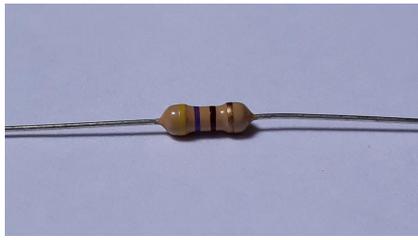
Este módulo é capaz de acionar motores de passo que exijam correntes de até 500 mA e possui quatro leds independentes que representam cada bobina (fase) a ser controlada, o que facilita na hora de implementação do sistema, uma vez que há este *feedback* visual. Ele utiliza o CI ULN2003A, que é composto por sete transistores do tipo darlington, cujo *datasheet* se encontra nos anexos deste trabalho. Nesse caso o controle do acionamento das bobinas é feito totalmente por meio do Arduino, ou seja, foi necessário o desenvolvimento do código responsável pela ordem de acionamento das fases, da velocidade, e do sentido.

#### 4.4.5 Resistores

Para o projeto foram utilizados os seguintes resistores:

- 4 resistores de 10 Ohms - 5W, tolerância +/- 5%;
- 4 resistores de filme de carbono de 470  $\Omega$  -  $\frac{1}{4}W$ , tolerância +/- 5%;

O resistor é um componente passivo, que transforma energia elétrica em energia térmica. Seu comportamento obedece à lei de Ohm ( $U = R.i$ ), o que nos leva a uma curva característica linear.



(a) Resistor de  $470 \Omega$  -  $\frac{1}{4}W$ .



(b) Resistor de  $10 \Omega$  -  $5W$ .

Figura 4.7: Resistores Utilizados.

#### 4.4.6 Placas Fotovoltaicas

O projeto contou com duas placas fotovoltaicas Policristalinas de Silício de dimensões  $19.4 \times 12 \times 0.3$  cm e peso  $0.086$  kg, cujas características nominais são  $18$  Volts de tensão de máximo pico e  $2.5$  Watts de potência máxima, considerando as condições de  $25^{\circ}C$  de temperatura e irradiância de  $1000W/m^2$ . Um exemplar pode ser visto na Figura 4.8. Além disso, a placa pode ser representada por uma fonte de corrente, onde a corrente máxima fornecida, considerando as condições a cima, é de  $138mA$ . Essa placa foi escolhida sobretudo devido ao seu tamanho e peso diminutos. Infelizmente seu *datasheet* completo não foi encontrado.



(a) Frente da Placa.



(b) Verso da Placa.

Figura 4.8: Placa Solar  $18V$   $2.5W$  Policristalina.

#### 4.4.7 Sensores LDR

O Light Dependent Resistor (LDR) é um sensor de fotorresistência, ou seja, é um componente eletrônico de característica resistiva variável de acordo com a intensidade luminosa. À medida que a intensidade luminosa aumenta sobre o LDR, a resistência, por sua vez, diminui e vice-versa. Segundo [17], os fótons que atingem a superfície do semicondutor liberam elétrons para a banda condutora, melhorando sua condutividade e diminuindo a resistência do componente. Neste projeto são utilizados quatro destes sensores, a fim de fazer o rastreamento dos raios solares mantendo a placa móvel sempre perpendicular à incidência solar. A Figura 4.9 apresenta uma

ilustração de um LDR.



Figura 4.9: Sensor Light Dependent Resistor.

#### 4.4.8 Microcontrolador

Devido à quantidade de portas necessárias ao projeto, utilizou-se o Arduíno Mega 2560 [18] como placa microcontroladora. Ele é baseado no circuito integrado (CI), microcontrolador, AT-mega2560 e possui 54 pinos de entrada/saída digital (dos quais 14 podem ser usados como saídas PWM, de acordo com seu *datasheet*, 16 entradas analógicas, 4 UARTs (portas seriais de hardware), um oscilador de cristal de 16 MHz, uma conexão USB, tomada de alimentação 12 V e um botão de reinicialização.. O Arduíno Mega 2560 é programado usando a IDE[19] (Integrated Development Environment ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado) do Arduíno. Assim sendo, todo o código desenvolvido para o rastreador foi implementado utilizando esta plataforma.

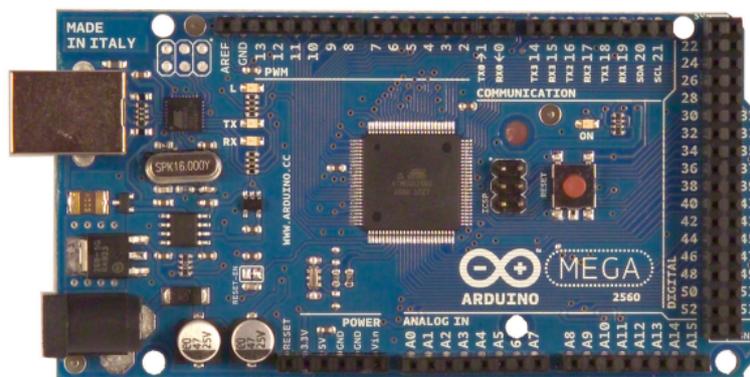


Figura 4.10: Arduíno Mega 2560, utilizado como placa microcontroladora do projeto.

#### 4.4.9 Shield Data Logger

O Data Logger é uma placa de circuito impressa (shield) que apresenta uma placa perfurada para a implementação do circuito. Os componentes são soldados e conectados tal qual a figura 4.15 sugere. Além disso, de acordo com [20], o shield apresenta um módulo de Real Time Clock (RTC) para a contagem do tempo mesmo quando o Arduíno está desligado, já que ele possui uma bateria externa capaz de gravar os horários e o calendário em tempo real. Ainda, conforme [20],

o Data Logger apresenta interface para entrada de cartão SD que funciona nos formatos FAT16 e FAT32.

O shield é compatível com diferentes versões do microprocessador do arduíno. Portanto, a versatilidade de funcionamento e as características que o data logger apresenta o torna desejado neste projeto, juntamente com o arduíno mega 2650. O Shield foi fixado no arduíno, assim como a figura 4.14 representa.

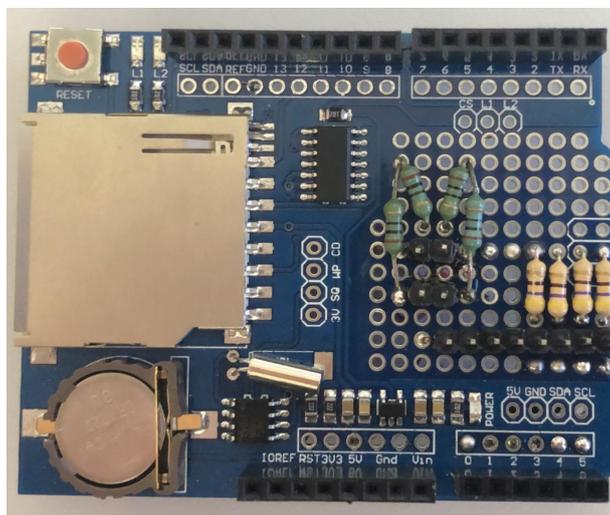


Figura 4.11: Datalogger Shield utilizado neste projeto, já com o circuito final soldado.

#### 4.4.10 Bornes e Fios de 1mm

Foram necessários os seguintes fios de 1mm revestidos para realizar a montagem do circuito:

- 12 fios de comprimento 80 cm;
- 05 fios de comprimento 60 cm;
- 18 jumpers macho fêmea de 20 cm.

Usou-se também 5 bornes e 10 modu machos.

#### 4.4.11 Colas, Soldas, Parafusos e Pregos

Por fim, foram utilizadas alguns materiais para fixar as peças, como pregos, cola para madeira, cola instântanea, cola silicone e fita dupla face de alta fixação, parafusos e porcas. Para o circuito definitivo, usou-se solda de estanho para fixar os componentes na placa perfurada.

## 4.5 Implementação

### 4.5.1 Montagem Estrutural

Após adquirir e cortar todas as peças conforme mostradas na Figura 4.2, deve-se montar a estrutura. Inicia-se o processo colando-se as quatro peças que possuem dois lados de 10 cm de modo que se forme as paredes de uma caixa. Feito isso, resta finalizar a caixa colocando-se a tampa de cima, que é a peça quadrada que possui um furo no meio e a tampa inferior, que é a peça sem o furo. A última madeira quadrada que possui um chanfro, será colocada como uma prateleira no interior da caixa e dará suporte para o motor e para o circuito eletrônico, que ficará fixado nela. Assim sendo, um dos motores será posicionado no furo desta prateleira com o auxílio de parafusos e porcas. Além da cola passada na caixa, usou-se também pregos para reforçar a estrutura.

Seguindo-se à montagem, o eixo de sete centímetros de comprimento é colado no centro do disco de raio 250 mm. Na parte contrária àquela que se colou o eixo, fixa-se em posição diametralmente oposta as duas barras laterais, usando fita dupla face. Em um destes pilares será afixado o segundo motor, responsável pelo giro no segundo grau de liberdade. Por fim, trespassa-se nos furos o eixo de 20 cm, sendo que este já deve ter sido previamente colado (aqui usou-se cola instantânea e silicone) na madeira aonde será posicionada a placa fotovoltaica. Nesta placa, também são fixados, em forma de cruz, as duas peças de 4cm x 2cm que servirão para fazer sombra nos LDRs e assim garantir que a placa está perpendicular aos raios solares, conforme mostrado na Figura 4.12.

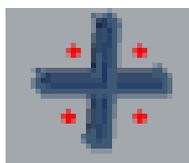


Figura 4.12: Disposição dos LDR's.

Além disso, no mesmo lado em que foi colado o eixo serão fixados 5 bornes, para que se possa conectar os fios da placa fotovoltaica e dos sensores LDRs. Assim sendo, tem-se também que os LDRs serão posicionados nos quadrantes formados pela cruz, de modo que o espaço entre estes seja o menor possível. Os fios dos motores e dos sensores e placa são conduzidos para o interior da caixa, passando-os pelos buracos de raio 1 cm pertencente às paredes da caixa. Na lateral que possui dois furos será posicionado o Arduino Mega com sua *shield*, de forma que o cabo de alimentação, e o cartão SD possam ser colocados e retirados sem que haja necessidade de desmontar o sistema.

Para o sistema fixo, bastou colar no retângulo de espessura 1 cm os apoios inclinados e, em seguida, o retângulo onde será fixada a placa solar. A Figura 4.13 mostra os sistemas já montados. Caso haja alguma dúvida, é interessante observar também a Figura 4.1 da modelagem dos sistemas.



(a) Rastreador solar construído.



(b) Estrutura da placa de referência.

Figura 4.13: Placa Solar 18V, 2.5W Policristalina.

#### 4.5.2 Circuito Eletrônico

Valendo-se de todos os materiais já citados em seção anterior a esta, tem-se que as conexões do sistema se darão conforme as Figuras 4.14 e 4.15.

Para realizar a leitura da energia gerada pela placa usou-se como carga uma resistência de  $20\Omega$ . Para conseguir este valor de resistência foram utilizados dois resistores de  $10\Omega$  dispostos em série, e  $5W$  de potência, uma vez que os resistores mais comuns são de  $\frac{1}{4}W$ , que é menor que a potência máxima que a placa pode gerar. Deve-se sempre lembrar que o Arduino Mega não suporta tensões maiores que 5 Volts, então em suas portas nada pode ultrapassar este valor e isto deve ser levado em conta na hora de realizar os cálculos. Este circuito foi duplicado, uma vez que as correntes das duas placas fotovoltaicas são distintas, gerando tensões distintas, e cada um dos circuitos teve uma extremidade posicionada ao *ground* (ou referência) do sistema e a outra a um pino de entrada analógica do Arduino Mega. Aqui foram utilizados os pinos A8 e A10.

Sabendo que a corrente máxima da placa é de  $0,139A$  e considerando que a tensão na porta do Arduino deve ser menor que  $4.5V$ , tem-se:

$$R = \frac{U}{i} = \frac{4.5}{0.139} = 32.37\Omega$$

Com isso, pode ser usado qualquer valor menor que  $32\Omega$  para a leitura da tensão gerada na placa. A precisão aumenta se o resistor aumenta, e diminui caso contrário. Assim sendo, optou-se, conforme dito anteriormente, na utilização de uma resistência de  $20\Omega$ .

Para a leitura dos LDRs foi necessário um circuito de divisão de tensão para mensurar corretamente os dados lidos por este. De acordo com o *datasheet* em anexo, os sensores LDRs possuem resistência nominal de  $400\Omega$ . Se colocarmos então o sensor em série com uma resistência de valor tal qual o nominal, sendo que um terminal do LDR será alimentado por 5 Volts, a partir do Ar-

duíno, e um terminal do resistor será colocado no *ground* (ou referência) do sistema, teremos que para o ponto de maior luminosidade a resistência do LDR diminuirá e a tensão entre o sensor e o resistor será próxima de 5 Volts. No caso contrário, no ponto de menor luminosidade a resistência do LDR aumentará, fazendo a tensão entre o resistor e o sensor ser próxima a 0 Volts. Assim, por segurança, tem-se que o resistor terá o valor de  $470\Omega$ .

Os motores foram ligados aos *drivers* e estes ao Arduíno Mega por meio de portas digitais. A ordem de ativação das bobinas do motor são controladas por programação do Arduíno Mega2670. Os *drivers* foram alimentados com 5 volts advindos do Arduino, bem como seus *grounds* foram conectados ao do microcontrolador. O circuito dos LDRs e da placa também foram ligados ao *ground*, de modo que todo o sistema tenha a mesma referência.

Devido ao uso da *Shield DataLogger* não foi necessário fazer o circuito para o RTC nem para o LDR, uma vez que estes foram implementados na fabricação da placa. Assim, foi preciso apenas encaixar a *shield* no Arduíno. A Figura 4.14 ilustra a conexão da *shield* no Arduíno Mega 2560, enquanto que a Tabela 4.1 mostra as conexões realizadas. A Figura 4.15 ilustra as conexões de todo o circuito utilizado neste projeto. São conectados os sensores LDR, os motores, os drivers dos motores e as placas fotovoltaicas. O esquema de conexão também está separado por cores, conforme a Tabela 4.2 mostra.

Relação de cores e conexões	
Cor do fio	Conexão
Vermelho	Alimentações
Preto	Ground (gnd)
Azul	Funcionamento do RTC e cartão SD
Laranja	Demais pinos gerais da shield no arduíno

Tabela 4.1: Esquema de cores da conexão do Datalogger Shield com o Arduíno da Figura 4.14.

Relação de cores e conexões	
Cor do fio	Conexão
Ciano	LDRs no arduíno
Rosa	Painéis fotovoltaicos no arduíno
Vermelho	Alimentações 5V do arduíno
Preto	Ground (gnd)
Verde	Saída do driver do motor inferior
Azul	Saída do driver do motor superior
Marrom	Motores de passos na entrada do driver

Tabela 4.2: Esquema de cores da fiação do circuito eletrônico da Figura 4.15.

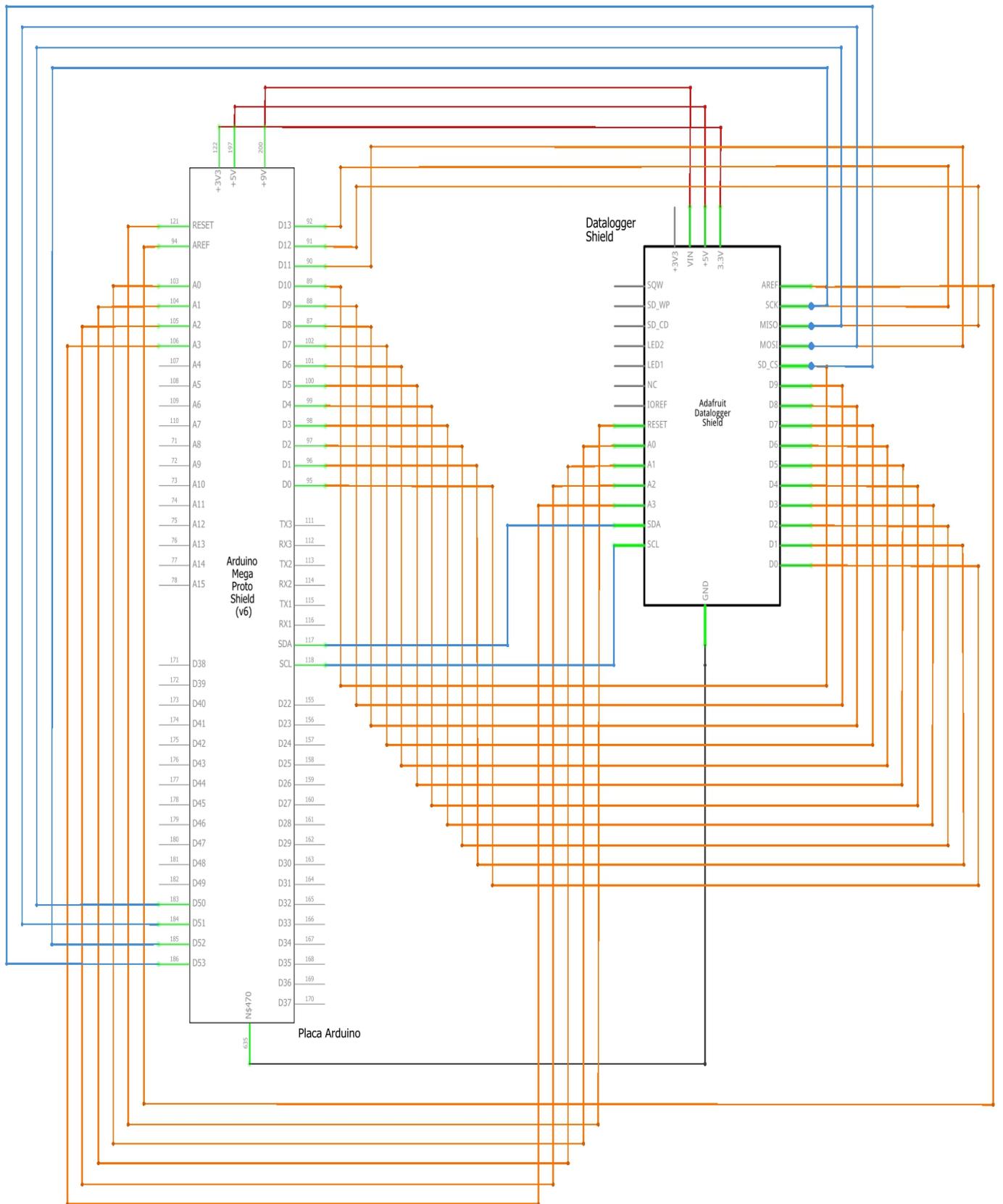


Figura 4.14: Esquemático da conexão do Datalogger Shield com o Arduino Mega 2560.

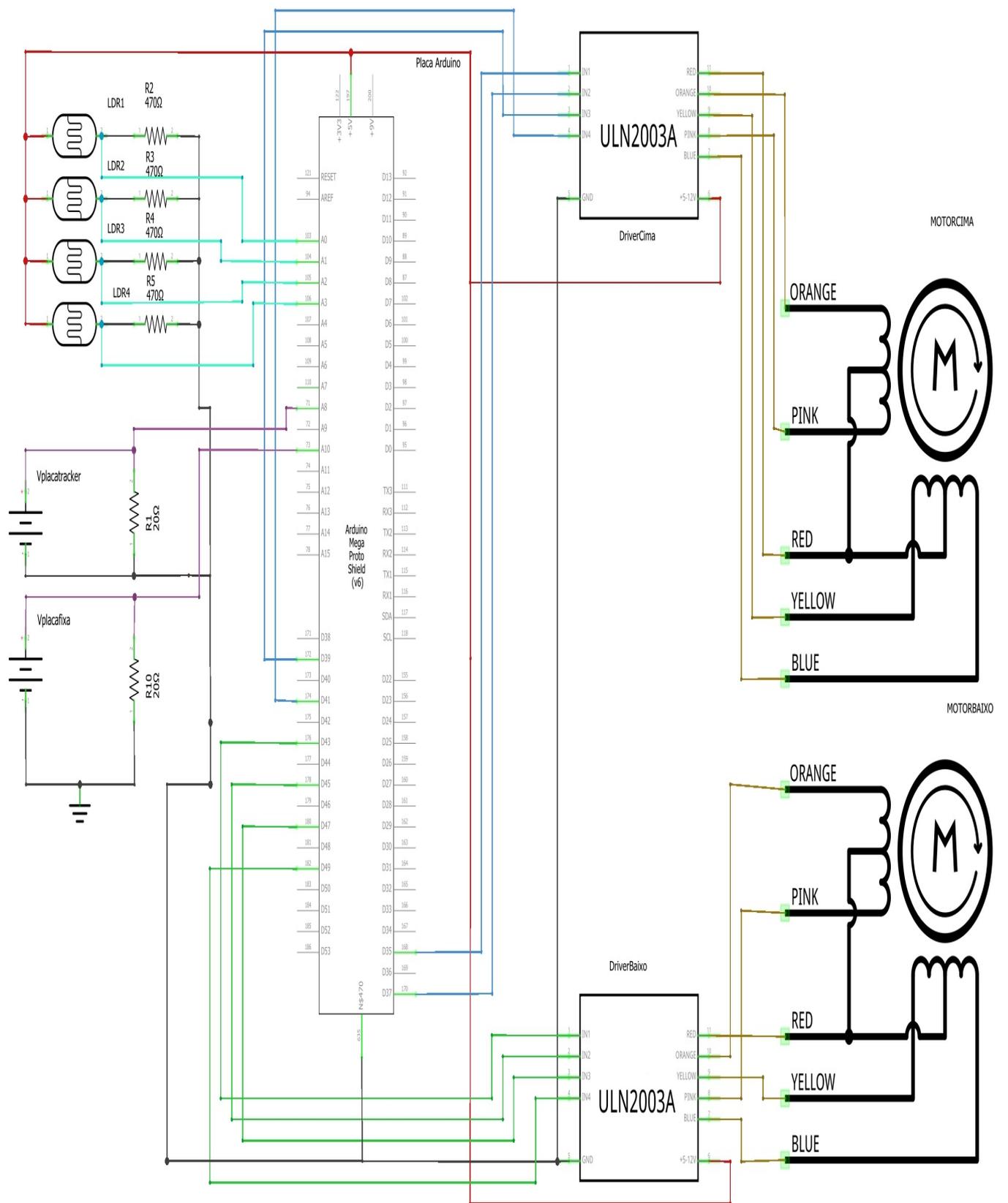


Figura 4.15: Esquemático do circuito elétrico completo.

### 4.5.3 Lógica Computacional

Esta subseção descreve o algoritmo utilizado no Arduíno e fazer o controle do sistema em linguagem C++. O código na íntegra se encontra na seção **Apêndice I: Programas utilizados**.

As bibliotecas incluídas neste algoritmo foram a do motor de passos (*Stepper.h*), a do RTC (*RTClib.h*) e a do cartão SD (*SD.h*). Além disso, algumas constantes foram determinadas, conforme a Tabela 4.3 mostra. A margem serve como limitador das médias das tensões sobre os LDRs, ou seja, a diferença das médias não pode ser superior ou inferior à margem especificada. O fluxograma da Figura 4.16 demonstra a lógica da diferença das médias. Posteriormente, realiza-se a identificação dos pinos e das portas utilizadas no arduíno. A Tabela 4.4 exemplifica o mapeamento das portas utilizadas. Após isso, inicializam-se os motores inferior e superior através da rotina *Stepper*, passando como parâmetros a quantidade de passos que o motor vai realizar em uma revolução e os pinos digitais que as saídas dos *drivers* do motores de passo vão conectar. Neste projeto, utiliza-se 112 passos por revolução para os dois motores e, por meio da rotina *setSpeed*, configura-se para que ambos os motores tenham 60 rotações por minuto (rpm).

Constantes no algoritmo	
Nome	Valor
Margem	40
Passos do motor	5

Tabela 4.3: Constantes configuradas no programa.

Mapeamento dos pinos no Arduíno Mega 2560			
Pinos Analógicos		Pinos Digitais	
Função	Porta	Função	Portas
Leitura da tensão do LDR canto inferior direito	A0	Funcionamento do motor superior	D35, D37, D39, D41
Leitura da tensão do LDR canto superior direito	A1	Funcionamento do motor inferior	D43, D45, D47, D49
Leitura da tensão do LDR canto superior esquerdo	A2		
Leitura da tensão do LDR canto inferior esquerdo	A3		
Leitura da tensão do sistema com rastreamento solar	A8		
Leitura da tensão do sistema fixo	A10		

Tabela 4.4: Mapeamento dos pinos analógicos e digitais do programa.

Feitas todas as configurações, inicializa-se o cartão SD, caso ele seja reconhecido. Se falhar, uma mensagem de falha aparece no *Serial Monitor* e nada acontece. Vale destacar que o *Serial Monitor* é o elo entre o computador o Arduíno, possibilitando o envio e o recebimento de informações na forma de texto. Isso é útil para depuração. Se cartão SD seja inicializado, uma mensagem é reportada e o programa dá continuidade. Em seguida, verifica-se a presença e o funcionamento do módulo RTC. Caso seja encontrado, o ajuste de data e hora é feito automaticamente na hora da compilação e o programa dá continuidade. Caso contrário, o programa fica preso num laço infinito, impossibilitando a realização do laço principal do programa (*void loop*).

Nesta parte do algoritmo, encontram-se os comandos usados para o funcionamento do sistema do rastreador solar, juntamente com a gravação de dados no cartão SD. A aquisição de tensões provenientes dos LDRs ocorre por meio do comando *analogRead*. Após isso, realizam-se médias das tensões lidas com relação aos lados da cruz fixada na plataforma da placa fotovoltaica. Como mencionado anteriormente, os cálculos das médias são realizados de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 4.16, bem como toda lógica computacional envolvida.

É importante salientar que são feitas duas leituras dos valores de tensão tanto da placa fixa quanto da placa móvel (com o sistema de rastreamento) num intervalo de um minuto. Dessa forma, os dados são gravados no cartão SD através da criação de um arquivo de texto denominado "dados.txt". Neste arquivo, registra-se: A data que os dados estão sendo colhidos no formato [DD/MM/AAAA] , o horário no formato [HH:MM], valor da tensão na placa com o rastreador solar, valor da tensão na placa fixa, as leituras dos valores de cada LDR. Como descrito anteriormente, a Figura 4.16 representa o fluxograma da lógica de programação utilizada neste projeto.

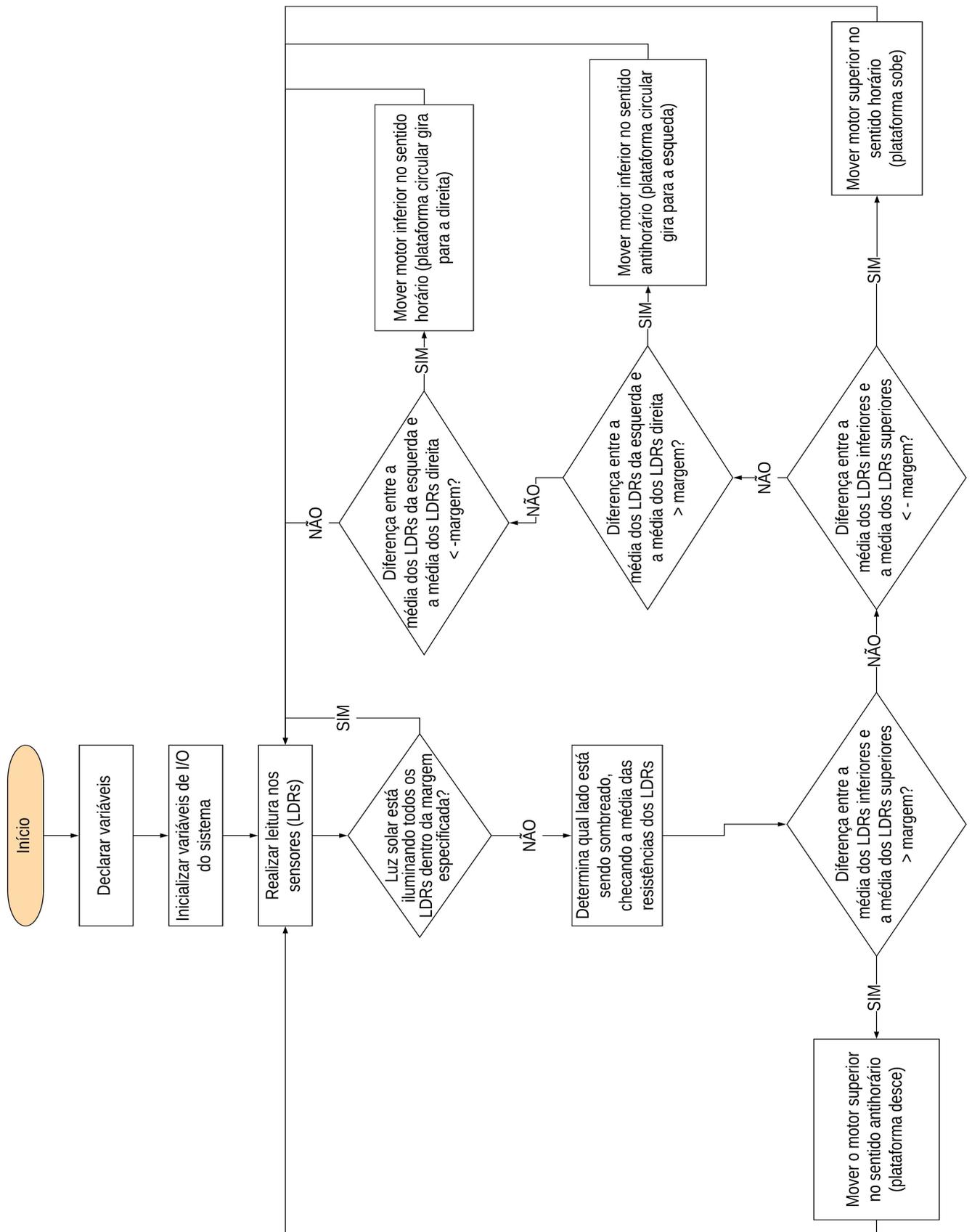


Figura 4.16: Fluxograma de funcionamento do algoritmo utilizado no projeto de rastreador solar.

# Capítulo 5

## Experimento

### 5.1 Introdução

Após a implementação do sistema foram feitos testes para averiguar se o rastreador solar atinge a eficiência energética esperada. Esta seção trata da metodologia utilizada para realizar este experimento, bem como dos dados que foram adquiridos e posteriormente a análise destes.

### 5.2 Descrição

Para obter os dados foi necessário expor o protótipo ao sol com o sistema em funcionamento e com a placa de referência devidamente posicionada. Assim sendo, o rastreador solar e a placa fixa foram levados ao telhado do prédio do SG-11, por ser um local que não possui sombras ao longo do dia, além de ser plano e conter tomadas para alimentação do sistema relativamente perto. O acesso ao telhado é obtido por meio do laboratório de antenas, o que nos privou de ir quando bem precisássemos.

Estipulou-se que os dados deveriam ser colhidos entre 8h00 e 18h00, preferencialmente durante todo este tempo, para colher dados suficientes e observar o comportamento durante boa parte do dia. A placa fixa foi posicionada apontada para o Norte. A Figura 5.1 mostra os sistemas móvel e fixo no telhado do SG-11 para a coleta de dados.

Fez-se necessário o uso de uma extensão para levar energia ao sistema, bem como protegê-lo contra água, ainda que minimamente, uma vez que o projeto foi colocado em teste em época de chuva. Infelizmente, pelo fato do protótipo não ser resistente à água, foi-se necessário retirá-lo do telhado quando apresentava pancadas de chuva, o que prejudicou o processo de aquisição de dados.



Figura 5.1: Aquisição de dados sendo feita no telhado do prédio SG-11.

### 5.3 Dados Adquiridos

Após deixar o protótipo do sistema de rastreador solar exposto à irradiação no telhado do SG-11, ao final do dia, recolheu-se os dados registrados no cartão SD para fazer os cálculos necessários na seção 5.4, bem como visualizar graficamente o comportamento da tensão gerada nos dois sistemas - fixo e com rastreador - ao longo do dia. A seguir, para fins de visualização, na Tabela 5.1, encontra-se uma pequena amostra dos dados coletados num intervalo de 10 min, das 13h às 13h10min.

Dados adquiridos no dia 02/12/2018							
Data	Hora	Tensão Placa Rastreador [V]	Tensão Placa Fixa [V]	LDR Superior Esquerdo	LDR Superior Direito	LDR Inferior Esquerdo	LDR Inferior Direito
02-12-18	13:00	1.11	1.03	741	706	741	708
02-12-18	13:01	1.04	0.97	736	689	736	692
02-12-18	13:02	0.94	0.87	718	677	718	680
02-12-18	13:03	0.91	0.85	715	682	715	682
02-12-18	13:04	0.87	0.81	718	674	718	677
02-12-18	13:05	0.85	0.81	716	661	716	659
02-12-18	13:06	0.93	0.88	721	671	721	669
02-12-18	13:07	1.03	0.97	731	687	731	686
02-12-18	13:08	1.04	0.97	731	698	731	697
02-12-18	13:09	0.98	0.92	728	695	728	695
02-12-18	13:10	1.05	1.02	736	695	736	693

Tabela 5.1: Amostra parcial dos dados colhidos para o dia 2 de dezembro de 2018. De 13h às 13h10min.

Com os dados coletados e com a utilização da ferramenta Excel, é possível traçar duas curvas para fazer o comparativo do sistema fixo e do sistema com rastreador. A Figura 5.2 apresentada

o resultado obtido das tensões ao longo do dia. O eixo horizontal é representado pelo tempo, enquanto que o eixo vertical é representado pela tensão gerada pelas placas fotovoltaicas. A curva azul denota os valores encontrados para o sistema com rastreador solar e se mostra predominante sobre a curva amarela, que representa os valores encontrados para o sistema fixo. Percebe-se que, por volta de 12h41min, ambos os painéis solares produziram a tensão máxima para esta data de coleta de dados (02 de Dezembro de 2018). Enquanto que a placa com o sistema móvel apresentou, neste horário, uma tensão próxima de 3,5V, a placa com o sistema fixo apresentou uma tensão menor, por volta de 3,25V. Nesse caso, para este horário, observa-se uma produção de tensão de aproximadamente 7,69% a mais para o sistema com rastreador solar em comparação ao sistema fixo. Vale ressaltar que os sistemas ficaram expostos ao Sol de 10h49min às 18h27min. Além disso, a condição climática desse dia era de tempo nublado com leves pancadas de chuva.

Semelhantemente ao dia 02 de Dezembro de 2018, foram coletadas as tensões da placa móvel e fixa nos dias 12, 13 e 14 de Dezembro de 2018. A partir da Figura 5.3 referente ao dia 12 de Dezembro de 2018, observa-se que a placa móvel atinge um valor de tensão máxima de aproximadamente 3,91V perto das 14h52min. Neste mesmo horário, a placa fixa apresenta um valor de tensão de 3,26V. Com isso, calcula-se uma produção de tensão de aproximadamente 19,94% a mais para o sistema com rastreador solar em comparação ao sistema fixo. Os sistemas ficaram expostos ao Sol de 09h16min às 18h05min, com o dia ensolarado pela manhã e um período de chuva e nuvens densas à tarde (por volta das 15h). Às 16h, aproximadamente, o céu apresentava nuvens menos densas e o Sol mais irradiante.

A partir da Figura 5.4 referente ao dia 13 de Dezembro de 2018, observa-se que a placa móvel atinge um valor de tensão máxima de aproximadamente 3,88V perto das 10h35min. Neste mesmo horário, a placa fixa apresenta um valor de tensão de 2,83V. Com isso, calcula-se uma produção de tensão de aproximadamente 37,10% a mais para o sistema com rastreador solar em comparação ao sistema fixo. Os sistemas ficaram expostos ao Sol de 09h55min às 19h, com o dia ensolarado.

Finalmente, a partir da Figura 5.5 referente ao dia 14 de Dezembro de 2018, observa-se que a placa móvel atinge um valor de tensão máxima de aproximadamente 3,93V perto das 13h31min. Neste mesmo horário, a placa fixa apresenta um valor de tensão de 3,59V. Com isso, calcula-se uma produção de tensão de aproximadamente 9,47% a mais para o sistema com rastreador solar em comparação ao sistema fixo. Os sistemas ficaram expostos ao Sol de 07h às 17h46min, com o dia ensolarado pela manhã e um período de chuva e nuvens à tarde (por volta das 14h). Às 16h, aproximadamente, o céu apresentava nuvens menos densas e o Sol mais irradiante.

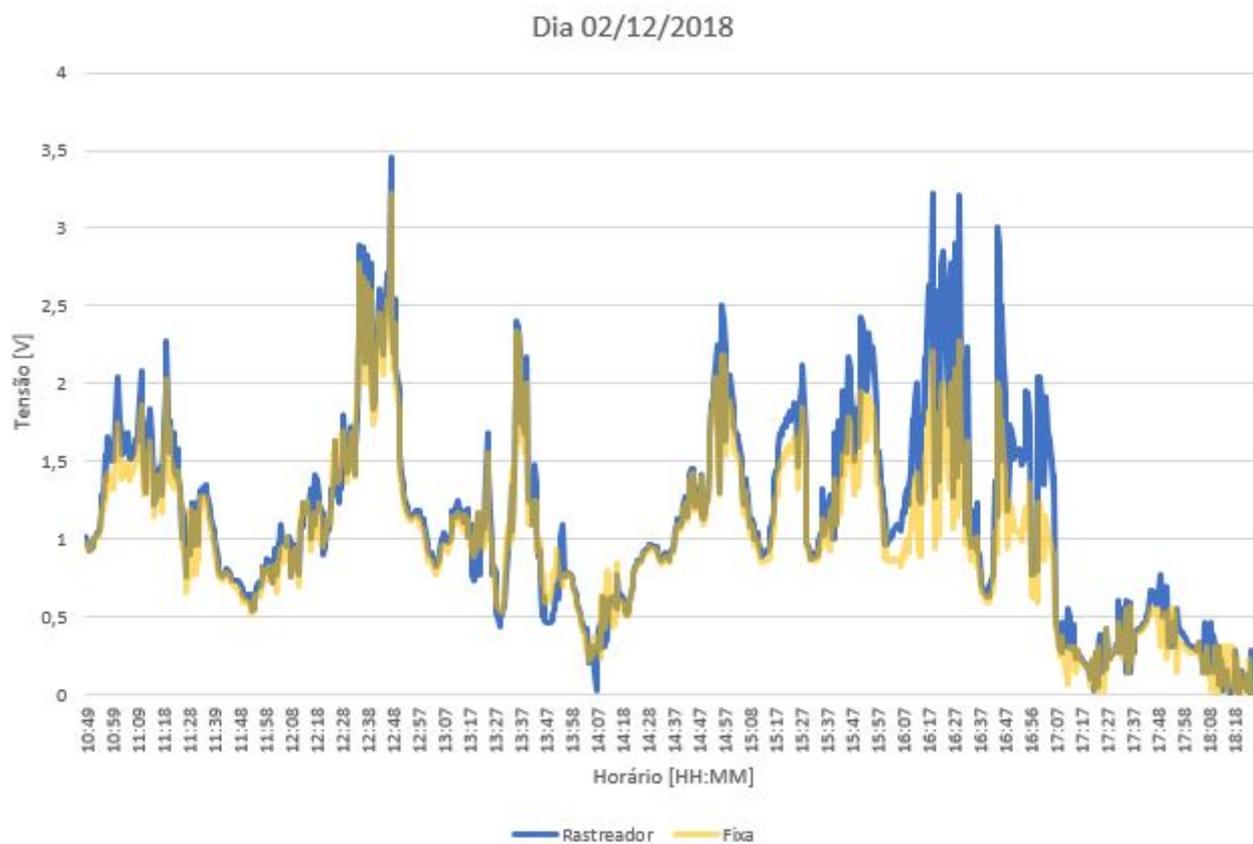


Figura 5.2: Comparativo das tensões colhidas para o sistema fixo versus sistema com rastreador solar. Dia nublado; 7,63 horas colhidas sem interrupção.

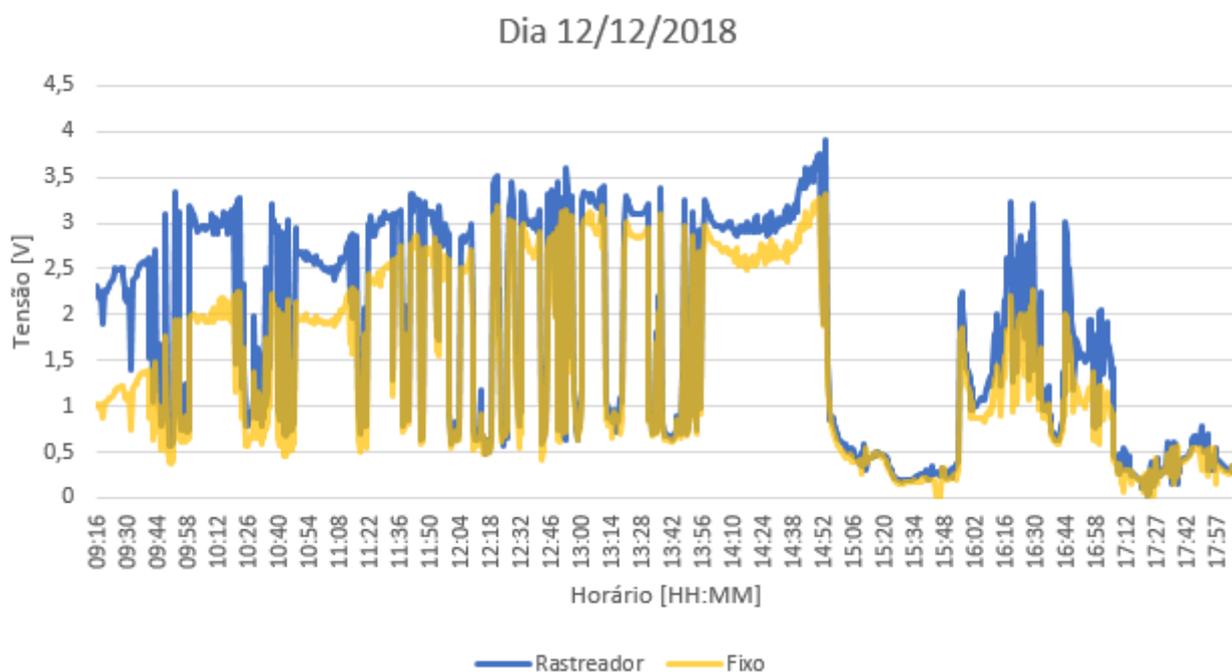


Figura 5.3: Comparativo das tensões colhidas para o sistema fixo versus sistema com rastreador solar. Dia ensolarado; 8,81 horas colhidas sem interrupção.

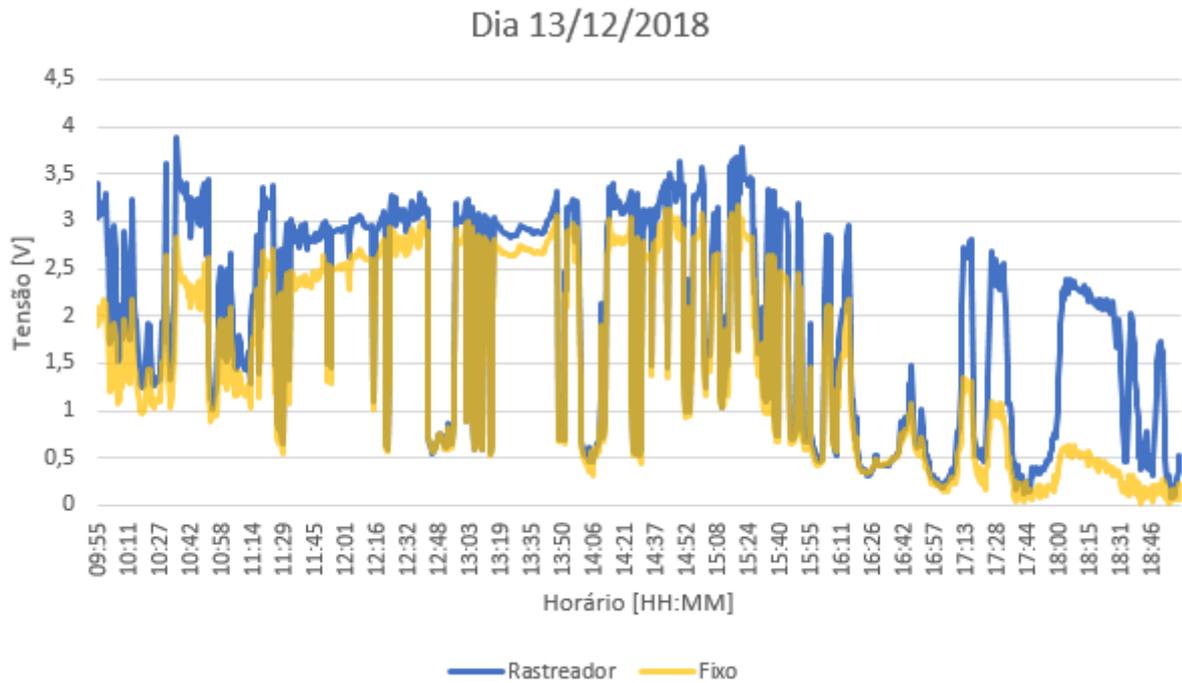


Figura 5.4: Comparativo das tensões colhidas para o sistema fixo versus sistema com rastreador solar. Dia Ensolarado; 9,08 horas colhidas sem interrupção.

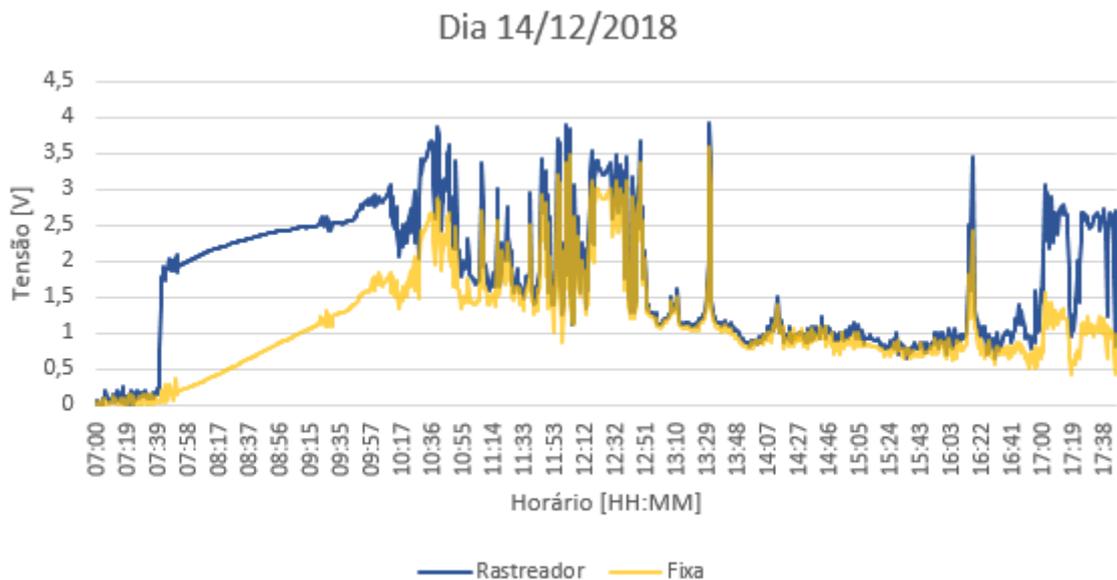


Figura 5.5: Comparativo das tensões colhidas para o sistema fixo versus sistema com rastreador solar. Dia ensolarado, porém com nuvens e chuvisco no meio da tarde; 10,76 horas colhidas sem interrupção.

## 5.4 Análise dos dados

A partir dos dados colhidos, foram realizados alguns cálculos a fim de mensurar a energia gerada por cada um dos sistemas e para cada um dos dias colhidos. Como se conhece a carga destes, que é uma resistência de  $20\Omega$ , calculou-se a potência por meio da equação:

$$Potência[W] = \frac{Tensão^2 [V^2]}{Resistência [\Omega]}$$

A potência gerada para cada ponto consta nas Figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9. Nestes é possível observar que o sistema com rastreador solar fica muito à frente do sistema fixo nos períodos matutino antes das 10h30min e no vespertino após às 16h30, indo ao encontro da teoria previamente explanada neste trabalho, e que pode ser visto na Figura 2.13, seção 2.4. No entanto, os dados colhidos não abrangem todo o período solar e, por tal motivo, há a hipótese de que o sistema móvel seja ainda mais eficiente do que os resultados demonstrados neste trabalho, uma vez que colhendo diariamente de 6h às 20h, espera-se que a média de geração das placas fixas versus móveis seja ainda mais discrepante. É importante lembrar que o horário descrito nos gráficos considera o horário de verão em Brasília, assim sendo, o meio dia solar está por volta de 13h e não 12h.

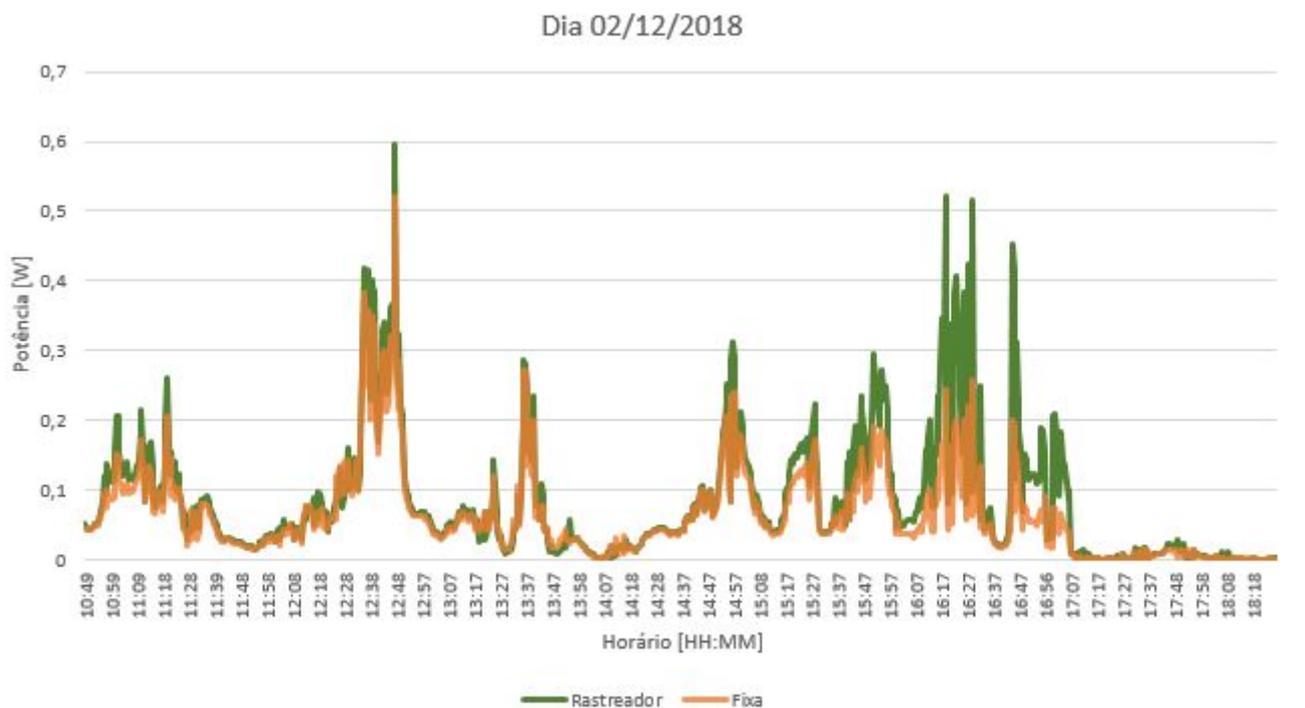


Figura 5.6: Comparativo das potências calculadas para o sistema fixo versus sistema com rastreador solar. Dia nublado; 7,63 horas colhidas sem interrupção.

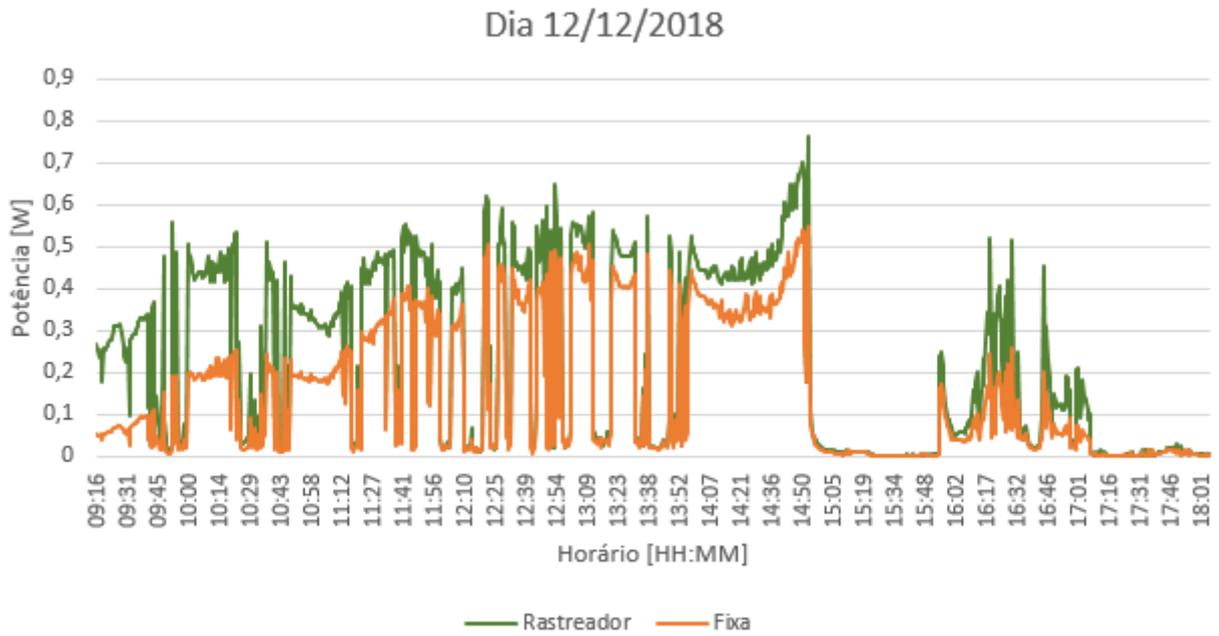


Figura 5.7: Comparativo das potências calculadas para o sistema fixo versus sistema com rastreador solar. Dia ensolarado; 8,81 horas colhidas sem interrupção.

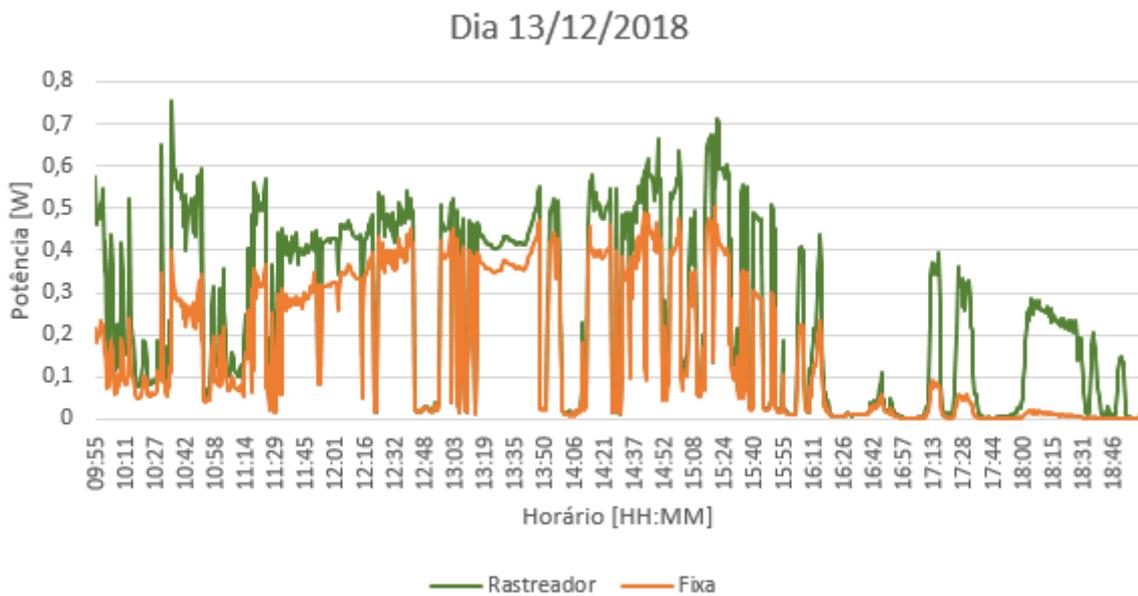


Figura 5.8: Comparativo das potências calculadas para o sistema fixo versus sistema com rastreador solar. Dia Ensolarado; 9,08 horas colhidas sem interrupção.

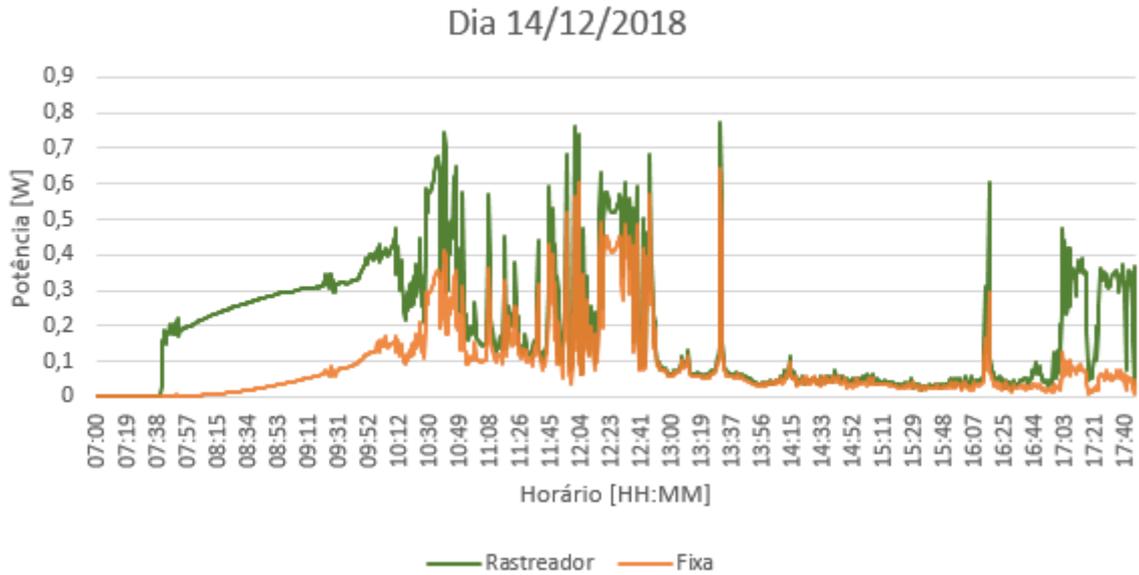


Figura 5.9: Comparativo das potências calculadas para o sistema fixo versus sistema com rastreador solar. Dia ensolarado, porém com nuvens e chuva no meio da tarde; 10,76 horas colhidas sem interrupção.

Em seguida, valendo-se da potência encontrada e do tempo de exposição em horas foi calculada a energia gerada em W/h para cada dia, por meio da fórmula:

$$Energia[Wh] = Potência[W] * Tempo[h]$$

Dados gerados				
Dia	Placa	Média Tensão [V]	Média Potência [W]	Energia Gerada [Wh]
02.12.2018	Fixa	1.007	0.065	0.497
	Móvel	1.127	0.083	0.637
12.12.2018	Fixa	1.425	0.148	1.308
	Móvel	1.772	0.221	1.953
13.12.2018	Fixa	1.500	0.163	1.489
	Móvel	1.939	0.248	2.254
14.12.2018	Fixa	1.127	0.086	0.927
	Móvel	1.721	0.186	2.010

Tabela 5.2: Análise dos dados colhidos.

Com os dados da Tabela 5.2, podemos calcular a porcentagem que a placa com rastreador solar produziu a mais de energia que a placa móvel. Na Tabela 5.3 estão os valores encontrados, que foi calculado por meio da equação:

$$RendimentoComparativo = \left( \frac{Energia_{Móvel}}{Energia_{Fixa}} \right) * 100$$

Comparação da Eficiência	
Dia	Rendimento[%]
02.12.2018	128.23
12.12.2018	149.32
13.12.2018	151.40
14.12.2018	216.76

Tabela 5.3: Rendimento do sistema com rastreador considerando o fixo como referência (100%).

Isso evidencia o comportamento esperado, uma vez que a placa móvel deixa o ângulo de incidência de irradiação menor em um maior período, gerando mais energia ao longo do dia. Tirando a média destes valores, encontramos que o rendimento foi de 161.42%, o que significa que, em média, o sistema com o rastreador gerou 61,42% a mais de energia que o sistema fixo padrão, inclinado a 15° e apontado para o norte.

Ao mesmo tempo, é necessário dizer que a porcentagem encontrada aqui revela mais sobre o comportamento do sistema do que sobre a quantidade exata de geração encontrada quando são comparados os dois sistemas, haja vista que tal quantitativo deve ser embasado em uma maior quantidade de dados, que infelizmente não pode ser colhida devido às condições climáticas e ao tempo de desenvolvimento do trabalho.

## Capítulo 6

# Considerações Finais

### 6.1 Conclusões

Como dito anteriormente, um sistema de rastreamento solar visa maximizar a produção energética, movimentando os painéis fotovoltaicos de forma a acompanhar o Sol ao longo do dia. Dessa forma, construiu-se um projeto em que o sistema móvel obriga que o ângulo de incidência dos raios solares sobre a placa fotovoltaica seja o mais estreito possível ao longo dos dias. A estrutura projetada e desenvolvida cumpriu bem o que se esperava dela.

O experimento realizado recolheu dados para a localidade de Brasília e, a partir dos resultados experimentais obtidos, foi possível observar um aumento considerável de aproximadamente 61% na produção de energia gerada pelo sistema com rastreamento solar em relação ao sistema com o painel fixo. As medições foram feitas durante condições climáticas não muito favoráveis, visto que nesta época do ano é comum o tempo estar nublado e com algumas pancadas de chuvas. Ainda assim, o protótipo construído mostrou um desempenho satisfatório, aproximando com os resultados teóricos encontrados na pesquisa [21], realizada anteriormente na Universidade de Brasília. Ao mesmo passo, é importante ressaltar que a porcentagem encontrada revela mais sobre o comportamento do sistema do que precisamente sobre a quantidade de energia gerada quando são comparados os dois sistemas, tendo em vista que este quantitativo deve possuir um embasamento com uma maior quantidade de dados.

### 6.2 Perspectivas Futuras

Melhorias podem ser implementadas no algoritmo utilizado no sistema com o rastreamento solar. Por vezes, quando uma nuvem mais densa se torna um obstáculo e fica na frente do Sol, o sistema se encontrava perdido, não sabendo se orientar corretamente e assim, procurava o local com maior luminosidade. Para corrigir tal problema, pode-se construir uma topologia de malha aberta, integrada à topologia de malha fechada construída através da leitura dos sensores LDRs. Dessa forma, com um sistema de malha aberta, é possível realizar a previsão dos ângulos de incidência solar ao longo do horário do dia e, juntamente com a leitura dos sensores, posicionar

o painel de forma mais consistente em casos como quando houver nuvens densas presentes na atmosfera.

Além disso, dados não foram colhidos em um dia sem muitas nuvens presentes e com uma grande intensidade dos raios solares. Assim, propõe-se utilizar este projeto numa época com menos possibilidade de chuva e clima menos nublado para observar o comportamento do sistema em outra época do ano, fazendo as devidas comparações com o sistema fixo.

Por fim, seria interessante implementar um sistema mais robusto para fixar no telhado colhendo dados constantemente, que poderiam ser usados para novas pesquisas relacionadas ao tema, como por exemplo, para estimar o custo que um projeto real (um produto, e não um protótipo) de rastreador solar deve ter para que seja vantajoso sua instalação em Brasília.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LENARDIC, D. *PV Resources*. 2015. Acesso em 17 abr. 2018. Disponível em: <<http://www.pvresources.com>>.
- [2] ALMEIDA, P. M. de. *Condicionamento da Energia Solar Fotovoltaica para Sistemas Interligados à Rede Elétrica*. Acesso em 02 Jul. 2018. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/labsolar/2011/05/26/condicionamento/>>.
- [3] CHRISTIAN. *The width of the space charge region in a pn-junction*. Physics Stack Exchange. Acesso em 29 Ago. 2018. Disponível em: <<https://physics.stackexchange.com/q/243172>>.
- [4] JESUS, H. A. et al. *Curvas características das células fotovoltaicas*. Acesso em 29 Ago. 2018. Disponível em: <<http://alagador.tripod.com/4.htm>>.
- [5] SOLAR, G. d. T. de E. Fotovoltaica (cresesb/cepel)-. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*, Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php>, 2013.
- [6] SOLARIS Áurea. *Manual de Projeto e Instalação de Sistemas Fotovoltaicos*. [S.l.: s.n.], 2018.
- [7] CAMPOS, M. S.; ALCANTARA, L. D. S. de. Programa para o cálculo da variação da direção de incidência dos raios solares ao longo do ano.
- [8] MOHAMMAD, N.; KARIM, T. Design and implementation of hybrid automatic solar-tracking system. *Journal of Solar Energy Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 135, n. 1, 2013.
- [9] PASSOS, F. *Seguidor Solar - Tracker: Vantagens e Desvantagens Parte 1*. Acesso em 21 abr. 2018. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/seguidor-solar—tracker-vantagens-e-desvantagens-parte-1.html>>.
- [10] ESLOVÁQUIA, U. T. na. *Photovoltaic Power Plants or Big Solar parks*. Acesso em 28 nov. 2018. Disponível em: <<http://www.solar-motors.com/gb/solar-power-plant-d498.shtml>>.
- [11] NASCIMENTO, C. A. do. Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica. *Diss. Universidade Federal de Lavras*, 2004.
- [12] RONILSON. *Célula Fotovoltaica – O Guia Técnico Absolutamente Completo*. 2017. Acesso em 12 set. 2017. Disponível em: <<http://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>>.

- [13] SOLAR, P. *Célula Fotovoltaica*. 2017. Acesso em 20 out. 2017. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/celula-fotovoltaica.html>>.
- [14] KRAUTER. *O Módulo Fotovoltaico*. 2017. Acesso em 21 out. 2017. Disponível em: <<http://www.solar.coppe.ufrj.br/practica1.html>>.
- [15] SHAYANI, R. A. et al. Conceitos básicos de engenharia solar fotovoltaica. In: , *publisher = TexUsina Fotovoltaica Jaíba Solar Planejamento e Engenharia e Gráfica e Editora Ltda*. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2017. cap. 3, p. 63–100. ISBN 9788588041127.
- [16] MARSH, J. *Solar Trackers: Everything You Need to Know*. 2018. Acesso em 21 abr. 2018. Disponível em: <<https://news.energysage.com/solar-trackers-everything-need-know/>>.
- [17] RYAN, V. *Light Dependent Resistor*. 2002.
- [18] TUTORIAL, A. M. *Getting Started with Arduino and Genuino MEGA2560*. Acesso em 02 Dez. 2018. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoMega2560>>.
- [19] TUTORIAL, A. *Arduino Software (IDE)*. Acesso em 02 Dez. 2018. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Environment>>.
- [20] ADAFRUIT. *Adafruit Datalogger Shield Overview*. Acesso em 19 nov. 2018. Disponível em: <<https://learn.adafruit.com/adafruit-data-logger-shield/shield-overview>>.
- [21] ALCÂNTARA, C. D. Ferramenta para estimar o desempenho de sistemas fotovoltaicos com diferentes estruturas de inclinação e tecnologias – uma análise comparativa do ganho proveniente da utilização de seguidor de sol e concentrador solar. *Universidade de Brasília, Distrito Federal*, p. 117, 2013.

# APÊNDICE

# I. PROGRAMAS UTILIZADOS

## I.1 MATLAB

```
1 %% Simulador
2 % A partir do modelo teorico de orbita e rotacao
3 ... terrestre em torno do Sol, este algoritmo calcula
4 ... a variacao do angulo de incidencia dos raios solares
5 ... para aplicacao em sistemas fotovoltaicos. Como referencia
6 ... a esta analise, escolheu-se Brasilia, que possui uma variacao
7 ... de latitude de aproximadamente 15 graus, no sentido do polo sul,
8 ... da linha do equador. Este programa realiza os calculos
9 ... para traar os graficos que servira de suporte para a analise.
10
11 %% Main
12
13 clear all;
14 N = 1:1:365; % vetor de dias
15 T = 5:((19-5)/364):19; % vetor de hora do dia
16 ... (dia comeca as 5h e vai ate 19h, variando de
17 ... , aproximadamente, 2 minutos e 20 segundos)
18 phi = -15.02; % angulo (em graus) de latitude de brasilia em relacao a linha do
19 ... equador
20
21 [psi, alpha, theta_z] = azim_alt_zen(N,T,phi);
22 % psi eh o vetor angulo azimutal
23 % alpha eh o vetor angulo de altitude solar
24 %theta_z eh o angulo de zenite
25
26 figure (1);
27 plot(N, theta_z);
28 set(gca, 'XTick', 0:30:365);
29 xlabel('Dias do ano');
30 ylabel('Angulo de Zenite ( ^{o} )');
31 title('Angulo de Zenite VS Dias do ano');
32 hold on;
33
34 figure(2);
35 plot(T, psi);
36 set(gca, 'XTick', 5:1:20);
37 xlabel('Horario do dia');
38 ylabel('Angulo Azimutal ( ^{o} )');
39 title('Angulo Azimutal VS Horario do dia');
40 hold on
```

Simulador\_TG.m

Código principal (main)

## Função `azim_alt_zen`

```
1 function [psi, alpha, theta_z] = azim_alt_zen(N,T,phi)
2     %Calculo do omega (hora angular)
3     omega = (12-T)*15;
4
5     %Calculo do delta (declinacao solar)
6     delta = 23.45.* sind(360*((N-80)/365));
7     figure (3);
8     plot(N,delta);
9     set(gca, 'XTick', [0:30:365]);
10    xlabel('Dias do ano');
11    ylabel('Declinacao solar ( ^{o} )');
12    title('Declinacao solar VS Dias do ano');
13    hold on;
14
15    %Calculo do angulo de zenite
16    theta_z = -(phi - delta);
17
18    %Calculo do alpha (angulo de altitude solar)
19
20    A = (sind(delta).*sind(phi)) + (cosd(delta).*cosd(phi).*cosd(omega));
21    alpha = asind(A);
22
23    %Calculo do psi (angulo azimutal)
24    P = ((-sind(alpha).*sind(phi) + sind(delta))./(cosd(alpha).*cosd(phi)));
25    psi = acosd(P);
26
27 end
```

`azim_alt_zen.m`

Função do cálculo dos ângulos de azimute, altitude solar e zênite

## I.2 Arduíno

```
1  /*
2  Trabalho de Graduacao 2
3  Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasilia
4
5  Projeto obrigatorio desenvolvido como requisito parcial a obtenção do grau
6  de
7  Engenheiro de Controle e Automacao pela Universidade de Brasilia (UnB).
8
9  Desenvolvedores/Orientandos:
10     - Amanda Alina da Cruz Silva           13/0100153
11     - Gabriel Monteiro Araujo da Silva     12/0011859
12
13  Orientador:
14     - Marco Antonio Freitas do Egito Coelho   Departamento de
15     Engenharia Eletrica.
16
17  */
18
19  #include <Stepper.h>
20  #include "RTClib.h"
21  #include <SPI.h>
22  #include <SD.h>
23
24  #define MARGEM 40
25  #define PASSOS 5
26
27  /*
28  PARA USAR NO ARDUINO MEGA 2560 !!!
29
30  A4 -> 20
31  A5 -> 21
32  D13 -> 52
33  D12 -> 50
34  D11 -> 51
35  D10 -> 53
36
37  */
38
39  RTC_DS1307 rtc;
40
41  File file;
42
43  int BaixoDireita = 0;
44  int CimaDireita = 1;
45  int BaixoEsquerda = 2;
46  int CimaEsquerda = 3;
47
48  int analogPinPlacaTracker = 8;
49  int analogPinPlacaFixa = 10;
50
```

```

49
50 int LeituraCD;
51 int LeituraCE;
52 int LeituraBD;
53 int LeituraBE;
54
55 int MediaBaixo;
56 int MediaCima;
57 int MediaDireita;
58 int MediaEsquerda;
59
60
61 byte Pino_CS = 53;
62
63 int start_time = 0;
64 int timeout    = 0;
65
66 float valorPlacaTracker = 0;
67 float valorPlacaFixa = 0;
68
69 // initialize the stepper library:
70 Stepper mcima(112, 35, 37, 39, 41); //motor de baixo
71 Stepper mbaixo(112, 43, 45, 47, 49); //motor de cima
72 void setup()
73 {
74 // set the speed at 60 rpm:
75   mbaixo.setSpeed(60);
76   mcima.setSpeed(60);
77
78   start_time = millis();
79   Serial.begin(9600);
80
81 //No sketch de exemplo mostra a boa prática para gerenciar a
   inicializa o
82   Serial.println("Iniciando o cart o SD ...");
83   if (!SD.begin(Pino_CS)){
84     Serial.println("Falhou!");
85     return;
86   }
87
88   Serial.println("Cart o SD iniciado.");
89   Serial.println();
90
91 //valida a inicializa o
92   if (!rtc.begin()){
93     Serial.println("RTC n o encontrado!");
94     while (1); //fica aqui pra sempre
95   }
96   if (!rtc.isrunning()){
97     Serial.println("RTC n o est em funcionamento!");
98
99     //rtc_.setDOW(TUESDAY); //Define o dia da semana

```

```

100     rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__))); //Ajuste de data e hora na
        compila o , pela substitui o das macros
101
102     //rtc.adjust(DateTime(2018, 1, 1, 0, 0, 0)); //ajuste manual: DateTime(
        year, month, day, hour, minute, second)
103 }
104 }
105
106 void loop(void)
107 {
108     //aquisi ao de dados
109     LeituraCD = analogRead(CimaDireita);
110     LeituraCE = analogRead(CimaEsquerda);
111     LeituraBD = analogRead(BaixoDireita);
112     LeituraBE = analogRead(BaixoEsquerda);
113
114     /*Descomentar para visualizar graficamente o comportamento dos LDRs*/
115     // Serial.println(LeituraCD);
116     // Serial.print(" ");
117     // Serial.println(LeituraCE);
118     // Serial.print(" ");
119     // Serial.println(LeituraBD);
120     // Serial.print(" ");
121     // Serial.println(LeituraBE);
122
123     //"tratamento" dos dados
124     MediaBaixo = (LeituraBD + LeituraBE)/2;
125     MediaCima = (LeituraCD + LeituraCE)/2;
126     MediaDireita = (LeituraBD + LeituraCD)/2;
127     MediaEsquerda = (LeituraBE + LeituraCE)/2;
128
129     if((MediaBaixo - MediaCima) > MARGEM)
130     {
131         //descer
132         mcima.step(-PASSOS);
133     } else if((MediaBaixo - MediaCima) < -MARGEM)
134     {
135         //subir
136         mcima.step(PASSOS);
137     }
138
139     if((MediaEsquerda - MediaDireita) > MARGEM)
140     {
141         //esquerda
142         mbaixo.step(-PASSOS);
143     } else if((MediaEsquerda - MediaDireita) < -MARGEM)
144     {
145         //direita
146         mbaixo.step(PASSOS);
147     }
148     timeout = millis() - start_time;
149     if (timeout > 10000){

```

```

150     delay(20000);
151     valorPlacaTracker = analogRead(analogPinPlacaTracker);
152     valorPlacaFixa = analogRead(analogPinPlacaFixa);
153     log(valorPlacaTracker, valorPlacaFixa, LeituraCD, LeituraCE, LeituraBD,
        LeituraCE);
154     start_time = millis();
155 }
156 }
157
158 void log(float valorPlacaTracker, float valorPlacaFixa, int LeituraCD, int
        LeituraCE, int LeituraBD, int LeituraBE){
159     Serial.println("Loggin..");
160     file = SD.open("dados.txt", FILE_WRITE);
161
162     DateTime now = rtc.now();
163
164     file.print(now.day(), DEC);
165     Serial.print(now.day(), DEC);
166     file.print('/');
167     Serial.print('/');
168     file.print(now.month(), DEC);
169     Serial.print(now.month(), DEC);
170     file.print('/');
171     Serial.print('/');
172     file.print(now.year(), DEC);
173     Serial.print(now.year(), DEC);
174     file.print("\t");
175     Serial.print("\t");
176     file.print(now.hour(), DEC);
177     Serial.print(now.hour(), DEC);
178     file.print(':');
179     Serial.print(':');
180     file.print(now.minute(), DEC);
181     Serial.print(now.minute(), DEC);
182     //file.print(':');
183     //Serial.print(':');
184     //file.print(now.second(), DEC);
185     //Serial.print(now.second(), DEC);
186     file.print("\t");
187     Serial.print("\t");
188
189     file.print((valorPlacaTracker/1023)*5);
190     Serial.print((valorPlacaTracker/1023)*5);
191     file.print("\t");
192     Serial.print("\t");
193     file.print((valorPlacaFixa/1023)*5);
194     Serial.print((valorPlacaFixa/1023)*5);
195     file.print("\t");
196     Serial.print("\t");
197
198     file.print(LeituraCE);
199     Serial.print(LeituraCE);

```

```

200     file . print ( "\ t " );
201     Serial . print ( "\ t " );
202     file . print ( LeituraCD );
203     Serial . print ( LeituraCD );
204     file . print ( "\ t " );
205     Serial . print ( "\ t " );
206     file . print ( LeituraBE );
207     Serial . print ( LeituraBE );
208     file . print ( "\ t " );
209     Serial . print ( "\ t " );
210     file . print ( LeituraBD );
211     Serial . print ( LeituraBD );
212     file . print ( "\ t " );
213     Serial . print ( "\ t " );
214
215
216     // file . print ( valorPlacaTracker );
217     Serial . print ( valorPlacaTracker );
218     // file . print ( "\ t " );
219     Serial . print ( "\ t " );
220     // file . print ( valorPlacaFixa );
221     Serial . print ( valorPlacaFixa );
222     // file . print ( "\ t " );
223     Serial . print ( "\ t " );
224
225     Serial . print ( "\ t " );
226     file . print ( "\ n " );
227     file . close ( );
228     delay ( 1000 );
229     Serial . println ( " Terminado . " );
230 }

```

Listing I.1: Rastreador Solar

# ANEXOS

# I. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD

O CD contém os seguintes arquivos relativos à este trabalho de Conclusão de Curso:

- Relatório do Trabalho de Graduação em pdf;
- Código para simulação em MatLab;
- Código em Arduíno do rastreador solar;
- Arquivos de modelagem da placa fixa;
- Arquivos de modelagem da placa móvel;
- Arquivos da montagem do circuito eletrônico;
- Arquivos com os dados coletados.

## II. DATASHEETS UTILIZADOS

## Light Dependent Resistor - LDR

Two cadmium sulphide(cds) photoconductive cells with spectral responses similar to that of the human eye. The cell resistance falls with increasing light intensity. Applications include smoke detection, automatic lighting control, batch counting and burglar alarm systems.



### Applications

Photoconductive cells are used in many different types of circuits and applications.

#### Analog Applications

- Camera Exposure Control
- Auto Slide Focus - dual cell
- Photocopy Machines - density of toner
- Colorimetric Test Equipment
- Densitometer
- Electronic Scales - dual cell
- Automatic Gain Control – modulated light source
- Automated Rear View Mirror

#### Digital Applications

- Automatic Headlight Dimmer
- Night Light Control
- Oil Burner Flame Out
- Street Light Control
- Absence / Presence (beam breaker)
- Position Sensor

### Electrical Characteristics

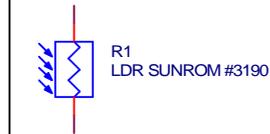
Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Cell resistance	1000 LUX	-	400	-	Ohm
	10 LUX	-	9	-	K Ohm
Dark Resistance	-	-	1	-	M Ohm
Dark Capacitance	-	-	3.5	-	pF
Rise Time	1000 LUX	-	2.8	-	ms
	10 LUX	-	18	-	ms
Fall Time	1000 LUX	-	48	-	ms
	10 LUX	-	120	-	ms
Voltage AC/DC Peak		-	-	320	V max
Current		-	-	75	mA max
Power Dissipation				100	mW max
Operating Temperature		-60	-	+75	Deg. C



## Guide to source illuminations

Light source Illumination	LUX
Moonlight	0.1
60W Bulb at 1m	50
1W MES Bulb at 0.1m	100
Fluorescent Lighting	500
Bright Sunlight	30,000

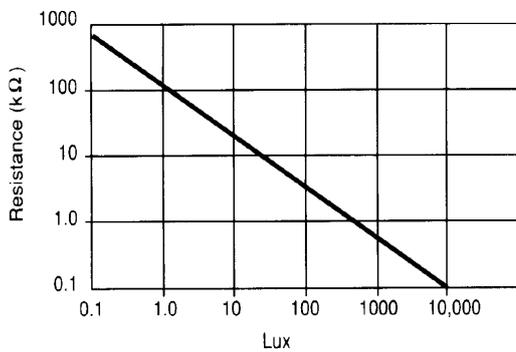
FIGURE 1 CIRCUIT SYMBOL



## Sensitivity

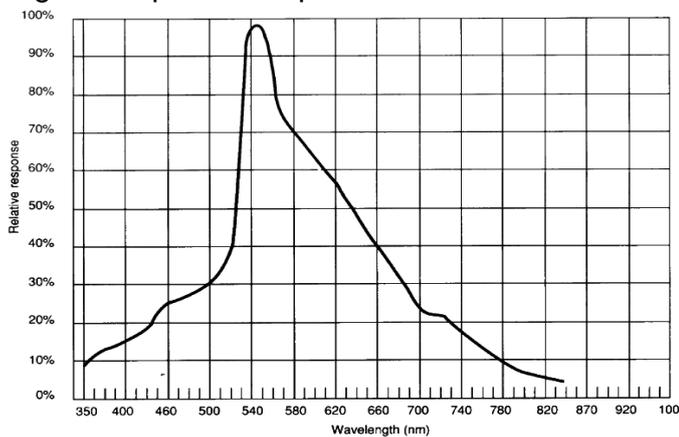
The sensitivity of a photodetector is the relationship between the light falling on the device and the resulting output signal. In the case of a photocell, one is dealing with the relationship between the incident light and the corresponding resistance of the cell.

FIGURE 2 RESISTANCE AS FUNCTION OF ILLUMINATION



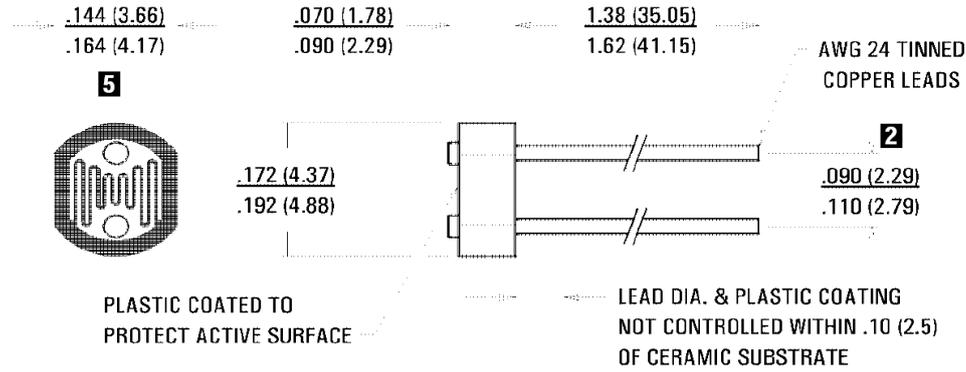
## Spectral Response

Figure 3 Spectral response



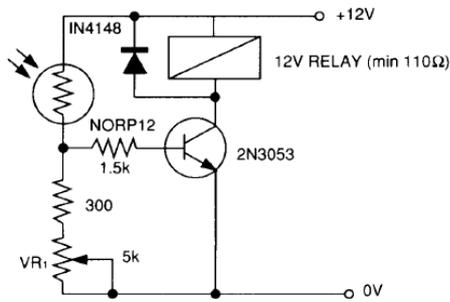
Like the human eye, the relative sensitivity of a photoconductive cell is dependent on the wavelength (color) of the incident light. Each photoconductor material type has its own unique spectral response curve or plot of the relative response of the photocell versus wavelength of light.

## Dimensions



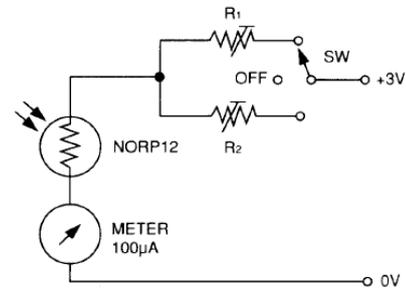
## Typical Application Circuits

Figure 6 Sensitive light operated relay



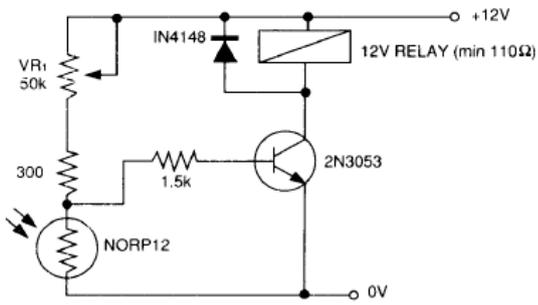
Relay energised when light level increases above the level set by VR<sub>1</sub>

Figure 9 Logarithmic law photographic light meter



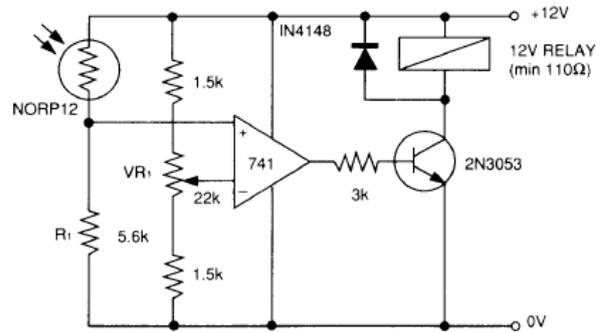
Typical value R<sup>1</sup> = 100kΩ  
 R<sup>2</sup> = 200kΩ preset to give two overlapping ranges.  
 (Calibration should be made against an accurate meter.)

Figure 7 Light interruption detector



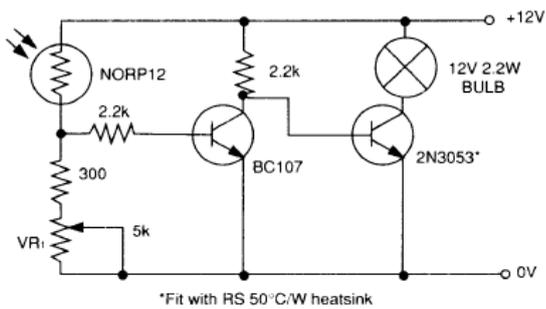
As Figure 6 relay energised when light level drops below the level set by  $VR_1$

Figure 10 Extremely sensitive light operated relay



(Relay energised when light exceeds preset level.)  
Incorporates a balancing bridge and op-amp.  $R_1$  and NORP12 may be interchanged for the reverse function.

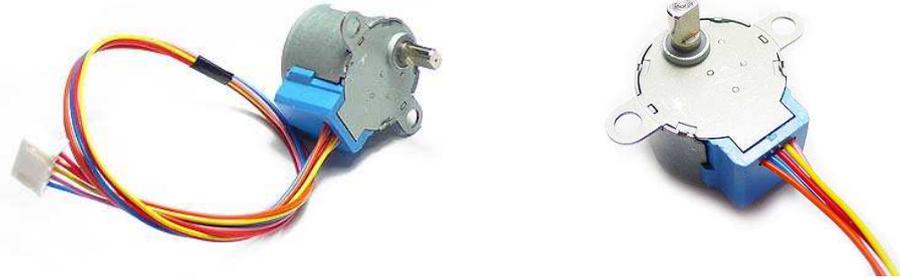
Figure 8 Automatic light circuit



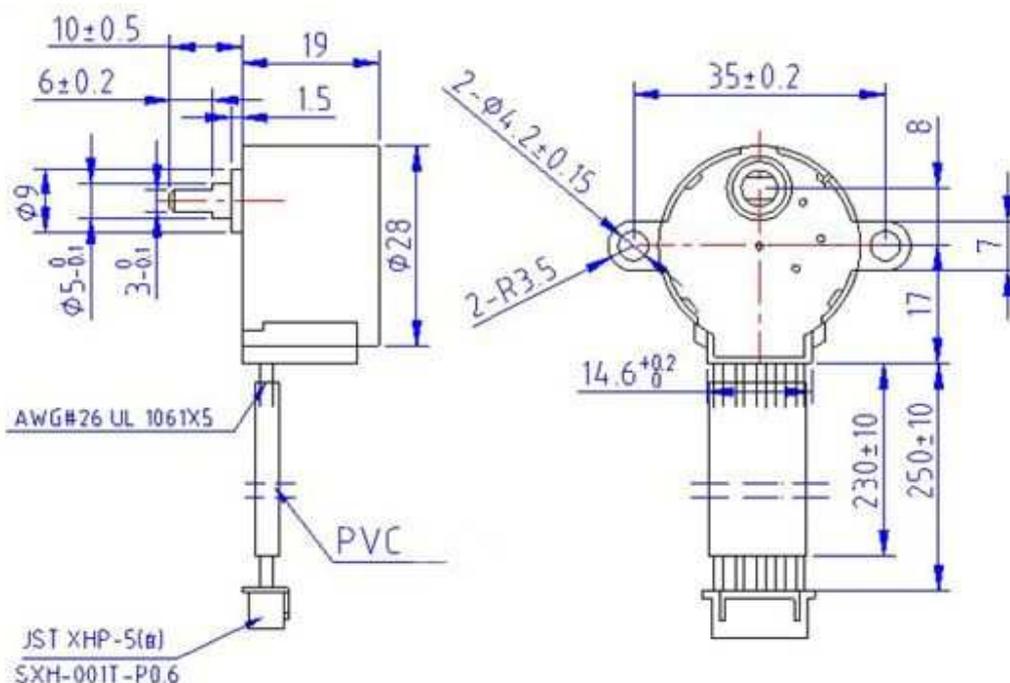
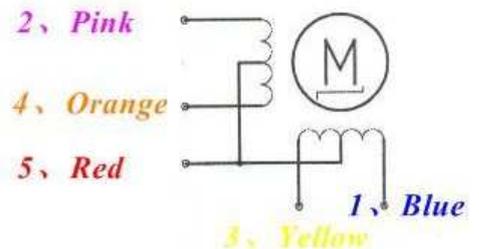
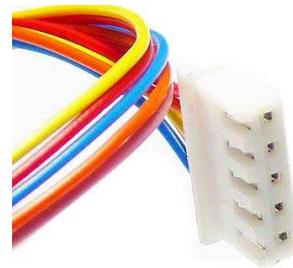
\*Fit with RS 50°C/W heatsink

## 28BYJ-48 – 5V Stepper Motor

The 28BYJ-48 is a small stepper motor suitable for a large range of applications.



Rated voltage :	5VDC
Number of Phase	4
Speed Variation Ratio	1/64
Stride Angle	5.625°/64
Frequency	100Hz
DC resistance	50Ω±7%(25°C)
Idle In-traction Frequency	> 600Hz
Idle Out-traction Frequency	> 1000Hz
In-traction Torque	>34.3mN.m(120Hz)
Self-positioning Torque	>34.3mN.m
Friction torque	600-1200 gf.cm
Pull in torque	300 gf.cm
Insulated resistance	>10MΩ(500V)
Insulated electricity power	600VAC/1mA/1s
Insulation grade	A
Rise in Temperature	<40K(120Hz)
Noise	<35dB(120Hz, No load, 10cm)
Model	28BYJ-48 – 5V





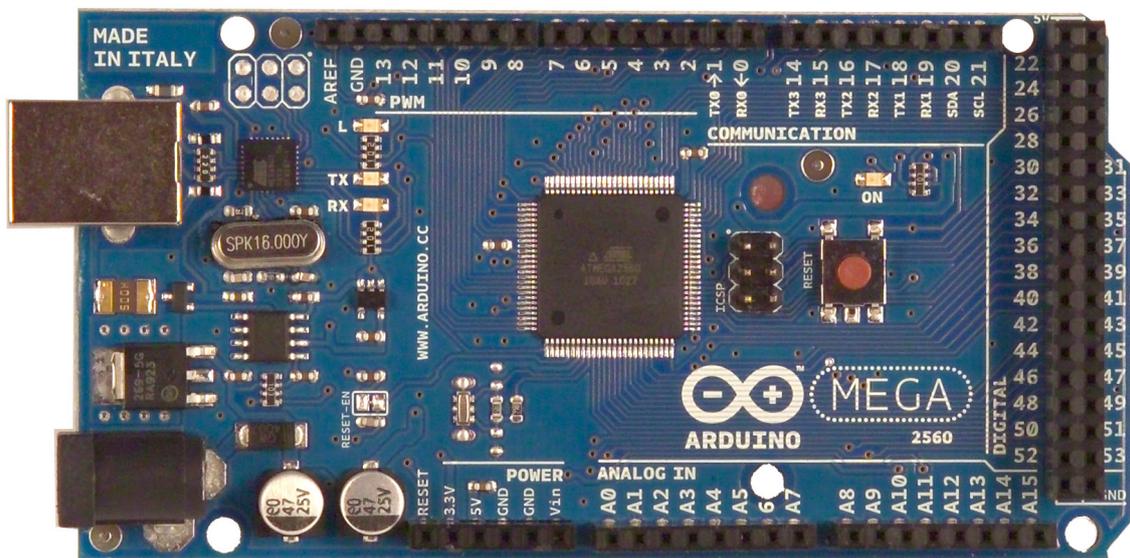
[www.robotshop.com](http://www.robotshop.com)

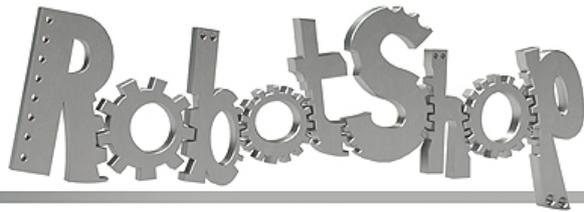


La robotique à votre service! - Robotics at your service!



## Arduino Mega 2560 Datasheet

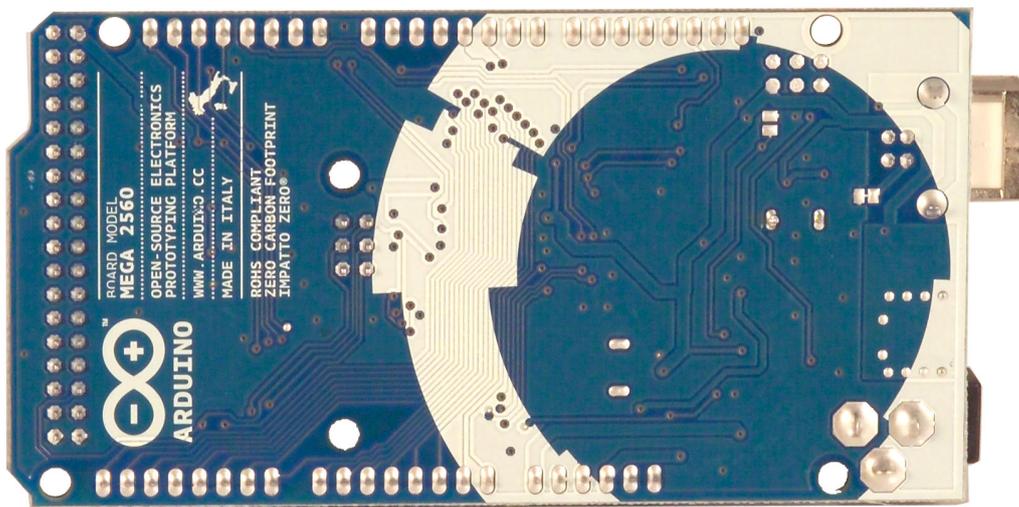




www.robotshop.com



La robotique à votre service! - Robotics at your service!

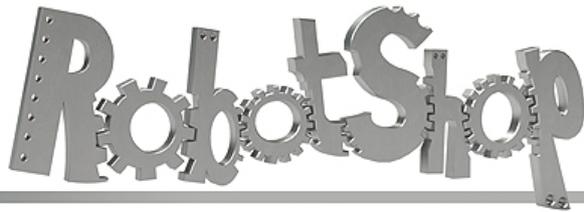


## Overview

The Arduino Mega 2560 is a microcontroller board based on the ATmega2560 ([datasheet](#)). It has 54 digital input/output pins (of which 14 can be used as PWM outputs), 16 analog inputs, 4 UARTs (hardware serial ports), a 16 MHz crystal oscillator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started. The Mega is compatible with most shields designed for the Arduino Duemilanove or Diecimila.

## Schematic & Reference Design

EAGLE files: [arduino-mega2560-reference-design.zip](#)



www.robotshop.com



La robotique à votre service! - Robotics at your service!

Schematic: [arduino-mega2560-schematic.pdf](#)

## Summary

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

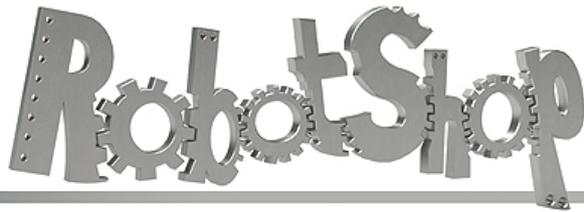
## Power

The Arduino Mega can be powered via the USB connection or with an external power supply. The power source is selected automatically.

External (non-USB) power can come either from an AC-to-DC adapter (wall-wart) or battery. The adapter can be connected by plugging a 2.1mm center-positive plug into the board's power jack. Leads from a battery can be inserted in the Gnd and Vin pin headers of the POWER connector.

The board can operate on an external supply of 6 to 20 volts. If supplied with less than 7V, however, the 5V pin may supply less than five volts and the board may be unstable. If using more than 12V, the voltage regulator may overheat and damage the board. The recommended range is 7 to 12 volts.

The Mega2560 differs from all preceding boards in that it does not use the FTDI USB-to-serial driver chip. Instead, it features the Atmega8U2 programmed as a USB-to-serial converter.



www.robotshop.com



La robotique à votre service! - Robotics at your service!

The power pins are as follows:

- **VIN.** The input voltage to the Arduino board when it's using an external power source (as opposed to 5 volts from the USB connection or other regulated power source). You can supply voltage through this pin, or, if supplying voltage via the power jack, access it through this pin.
- **5V.** The regulated power supply used to power the microcontroller and other components on the board. This can come either from VIN via an on-board regulator, or be supplied by USB or another regulated 5V supply.
- **3V3.** A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 50 mA.
- **GND.** Ground pins.

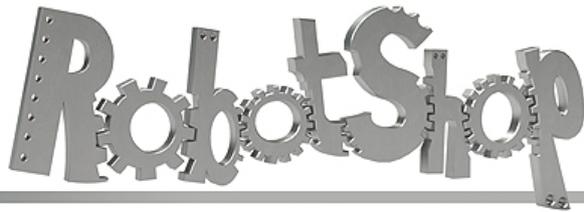
## Memory

The ATmega2560 has 256 KB of flash memory for storing code (of which 8 KB is used for the bootloader), 8 KB of SRAM and 4 KB of EEPROM (which can be read and written with the [EEPROM library](#)).

## Input and Output

Each of the 54 digital pins on the Mega can be used as an input or output, using [pinMode\(\)](#), [digitalWrite\(\)](#), and [digitalRead\(\)](#) functions. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive a maximum of 40 mA and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50 kOhms. In addition, some pins have specialized functions:

- **Serial: 0 (RX) and 1 (TX); Serial 1: 19 (RX) and 18 (TX); Serial 2: 17 (RX) and 16 (TX); Serial 3: 15 (RX) and 14 (TX).** Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data. Pins 0 and 1 are also connected to the corresponding pins of the ATmega8U2 USB-to-TTL Serial chip.
- **External Interrupts: 2 (interrupt 0), 3 (interrupt 1), 18 (interrupt 5), 19 (interrupt 4), 20 (interrupt 3), and 21 (interrupt 2).** These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or falling edge, or a change in value. See the [attachInterrupt\(\)](#) function for details.
- **PWM: 0 to 13.** Provide 8-bit PWM output with the [analogWrite\(\)](#) function.
- **SPI: 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS).** These pins support SPI communication using the [SPI library](#). The SPI pins are also broken out on the ICSP header, which is physically compatible with the Uno, Duemilanove and Diecimila.
- **LED: 13.** There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH



www.robotshop.com



**La robotique à votre service! - Robotics at your service!**

value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.

- **I<sup>2</sup>C: 20 (SDA) and 21 (SCL).** Support I<sup>2</sup>C (TWI) communication using the [Wire library](#) (documentation on the Wiring website). Note that these pins are not in the same location as the I<sup>2</sup>C pins on the Duemilanove or Diecimila.

The Mega2560 has 16 analog inputs, each of which provide 10 bits of resolution (i.e. 1024 different values). By default they measure from ground to 5 volts, though it is possible to change the upper end of their range using the AREF pin and `analogReference()` function.

There are a couple of other pins on the board:

- **AREF.** Reference voltage for the analog inputs. Used with [analogReference\(\)](#).
- **Reset.** Bring this line LOW to reset the microcontroller. Typically used to add a reset button to shields which block the one on the board.

## Communication

The Arduino Mega2560 has a number of facilities for communicating with a computer, another Arduino, or other microcontrollers. The ATmega2560 provides four hardware UARTs for TTL (5V) serial communication. An ATmega8U2 on the board channels one of these over USB and provides a virtual com port to software on the computer (Windows machines will need a .inf file, but OSX and Linux machines will recognize the board as a COM port automatically). The Arduino software includes a serial monitor which allows simple textual data to be sent to and from the board. The RX and TX LEDs on the board will flash when data is being transmitted via the ATmega8U2 chip and USB connection to the computer (but not for serial communication on pins 0 and 1).

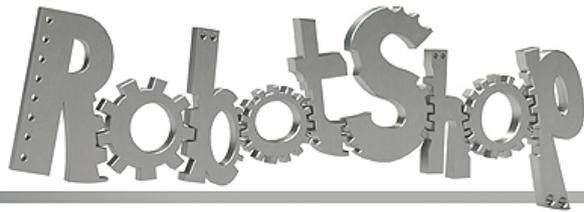
A [SoftwareSerial library](#) allows for serial communication on any of the Mega2560's digital pins.

The ATmega2560 also supports I<sup>2</sup>C (TWI) and SPI communication. The Arduino software includes a `Wire` library to simplify use of the I<sup>2</sup>C bus; see the [documentation on the Wiring website](#) for details. For SPI communication, use the [SPI library](#).

## Programming

The Arduino Mega can be programmed with the Arduino software ([download](#)). For details, see the [reference](#) and [tutorials](#).

The ATmega2560 on the Arduino Mega comes preburned with a [bootloader](#) that allows you to upload new code to it without the use of an external hardware programmer. It



www.robotshop.com



La robotique à votre service! - Robotics at your service!

communicates using the original STK500 protocol ([reference](#), [C header files](#)). You can also bypass the bootloader and program the microcontroller through the ICSP (In-Circuit Serial Programming) header; see [these instructions](#) for details.

## Automatic (Software) Reset

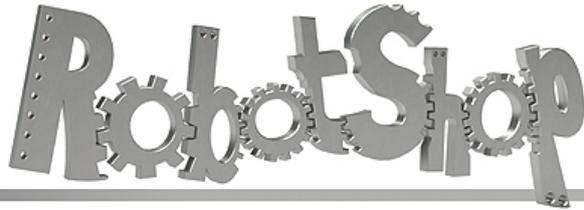
Rather than requiring a physical press of the reset button before an upload, the Arduino Mega2560 is designed in a way that allows it to be reset by software running on a connected computer. One of the hardware flow control lines (DTR) of the ATmega8U2 is connected to the reset line of the ATmega2560 via a 100 nanofarad capacitor. When this line is asserted (taken low), the reset line drops long enough to reset the chip. The Arduino software uses this capability to allow you to upload code by simply pressing the upload button in the Arduino environment. This means that the bootloader can have a shorter timeout, as the lowering of DTR can be well-coordinated with the start of the upload. This setup has other implications. When the Mega2560 is connected to either a computer running Mac OS X or Linux, it resets each time a connection is made to it from software (via USB). For the following half-second or so, the bootloader is running on the Mega2560. While it is programmed to ignore malformed data (i.e. anything besides an upload of new code), it will intercept the first few bytes of data sent to the board after a connection is opened. If a sketch running on the board receives one-time configuration or other data when it first starts, make sure that the software with which it communicates waits a second after opening the connection and before sending this data.

The Mega2560 contains a trace that can be cut to disable the auto-reset. The pads on either side of the trace can be soldered together to re-enable it. It's labeled "RESET-EN". You may also be able to disable the auto-reset by connecting a 110 ohm resistor from 5V to the reset line; see [this forum thread](#) for details.

## USB Overcurrent Protection

The Arduino Mega2560 has a resettable polyfuse that protects your computer's USB ports from shorts and overcurrent. Although most computers provide their own internal protection, the fuse provides an extra layer of protection. If more than 500 mA is applied to the USB port, the fuse will automatically break the connection until the short or overload is removed.

## Physical Characteristics and Shield Compatibility



[www.robotshop.com](http://www.robotshop.com)



**La robotique à votre service! - Robotics at your service!**

The maximum length and width of the Mega2560 PCB are 4 and 2.1 inches respectively, with the USB connector and power jack extending beyond the former dimension. Three screw holes allow the board to be attached to a surface or case. Note that the distance between digital pins 7 and 8 is 160 mil (0.16"), not an even multiple of the 100 mil spacing of the other pins.

The Mega2560 is designed to be compatible with most shields designed for the Uno, Diecimila or Duemilanove. Digital pins 0 to 13 (and the adjacent AREF and GND pins), analog inputs 0 to 5, the power header, and ICSP header are all in equivalent locations. Further the main UART (serial port) is located on the same pins (0 and 1), as are external interrupts 0 and 1 (pins 2 and 3 respectively). SPI is available through the ICSP header on both the Mega2560 and Duemilanove / Diecimila. *Please note that I<sup>2</sup>C is not located on the same pins on the Mega (20 and 21) as the Duemilanove / Diecimila (analog inputs 4 and 5).*