



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

RANDRES CIDES LOPES DE OLIVEIRA

SISTEMA OFF GRID: UMA UTILIZAÇÃO DO ARDUÍNO COMO FORMA DE
OTIMIZAR O NÍVEL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PROVENIENTE DE
CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

CARAÚBAS

2024

RANDRES CIDES LOPES DE OLIVEIRA

**SISTEMA OFF GRID: UMA UTILIZAÇÃO DO ARDUÍNO COMO FORMA DE
OTIMIZAR O NÍVEL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PROVENIENTE DE
CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Zenner Silva Pereira.

CARAÚBAS

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

0048s Oliveira , Randres Cides Lopes de.
Sistema off grid: uma utilização do arduino
como forma de otimizar o nível de produção de
energia elétrica proveniente de células
fotovoltaicas / Randres Cides Lopes de Oliveira
. - 2024.
78 f. : il.

Orientador: Zenner Silva Pereira .
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2024.

1. energia. 2. células fotovoltaicas . 3.
arduino . 4. automação . I. Pereira , Zenner Silva
, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo) autor(a).

Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

RANDRES CIDES LOPES DE OLIVEIRA

**SISTEMA OFF GRID: UMA UTILIZAÇÃO DO ARDUÍNO COMO FORMA DE
OTIMIZAR O NÍVEL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PROVENIENTE DE
CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 12 / 04 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



ZENNER SILVA PEREIRA

Data: 19/04/2024 20:23:55-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Zenner Silva Pereira (UFERSA)

Presidente

Documento assinado digitalmente



JOSE JUNIOR ALVES DA SILVA

Data: 24/04/2024 11:18:35-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Júnior Alves da Silva (UFERSA)

Membro Examinador

Documento assinado digitalmente



PEDRO NERI BANDEIRA DE SOUZA

Data: 20/04/2024 08:42:46-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Téc. Me. Pedro Neri Bandeira de Souza (UFERSA)

Membro Examinador

*Dedico esse trabalho a minha família,
por tudo que fizeram e fazem por mim.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por todas as bênçãos que me proporcionou até hoje, pois sem ele nada disso seria possível.

Agradeço a minha família por todo carinho e dedicação pois sem ela jamais teria chegado até aqui, pois foram eles que sempre estiveram ao meu lado dando apoio e coragem para seguir em frente e lutar por meus objetivos.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Zenner Silva por seu apoio, dicas e ensinamentos durante essa parte da minha trajetória acadêmica. Sua dedicação e comprometimento foram de fundamental importância para a construção deste trabalho. Sou grato por sua paciência bem como todo auxílio que me deu durante a realização desta pesquisa. Agradeço aos amigos que fiz que fiz durante toda a minha jornada acadêmica, em especial agradeço a Caellison Moraes e João Victor Praxedes que estão comigo em todas as disciplinas desde o início do curso, me ajudando e dando animo para seguir em frente.

Gostaria de agradecer também a todos os professores, no qual dedicaram seu tempo a passar seus conhecimentos e experiências que contribuíram significativamente para a minha formação como profissional e como ser humano.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

Albert Einstein

RESUMO

O aumento exorbitante do nível populacional tem ocasionado em uma demanda maior por produção de energia, energias essas que podem ser produzidas de por meio de fontes não renováveis como a queima de combustíveis fósseis, usinas nucleares ou por meio de energias renováveis como biomassa, eólica e solar. No Brasil, o uso de células fotovoltaicas tem se destacado, impulsionado pelo aumento na produção de energia solar. Contudo, a eficiência dessas células ainda pode ser otimizada. Nesse contexto, o estudo propõe o desenvolvimento de um protótipo de automação usando o Arduino para maximizar a produção de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas. A metodologia incluiu a construção de um rastreador solar de eixo duplo controlado pelo Arduino e a coleta de dados de duas células fotovoltaicas, uma fixa e outra móvel com o rastreador. Os resultados mostraram que a célula móvel teve um desempenho superior na produção de energia. Com isso, conclui-se que a utilização de equipamentos capazes de expor módulos fotovoltaicos a maior intensidade de luz possível resulta em um melhor desempenho por parte das células fotovoltaicas e consequentemente aumenta o nível de produção de energia elétrica fornecida por elas. Além disso é destacado a viabilidade e eficácia do uso do Arduino como microcontrolador para sistemas de automação e análise de dados em energia solar, abrindo caminho para futuras melhorias na eficiência energética e aplicação educacional dessas tecnologias.

Palavras-chave: energia; células fotovoltaicas; arduino; automação.

ABSTRACT

The exorbitant increase in population levels has led to a greater demand for energy production, which can be generated through non-renewable sources such as burning fossil fuels, nuclear power plants, or renewable sources like biomass, wind, and solar energy. In Brazil, the use of photovoltaic cells has stood out, driven by the rise in solar energy production. However, the efficiency of these cells can still be optimized. In this context, the study proposes the development of an automation prototype using Arduino to maximize electricity production through photovoltaic cells. The methodology involved building a dual-axis solar tracker controlled by Arduino and collecting data from two photovoltaic cells, one fixed and the other mobile with the tracker. The results showed that the mobile cell had superior performance in energy production. Thus, it is concluded that using equipment capable of exposing photovoltaic modules to higher light intensity results in better performance from photovoltaic cells and consequently increases the level of electricity production provided by them. Additionally, the feasibility and effectiveness of using Arduino as a microcontroller for automation systems and data analysis in solar energy are highlighted, paving the way for future improvements in energy efficiency and educational application of these technologies.

Keywords: energy; photovoltaic cells; arduino; automation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Incidência da radiação solar na superfície.....	21
Figura 2: Separação das bandas de energia	22
Figura 3: Corte transversal de uma célula fotovoltaica	24
Figura 4: Célula, módulo, arranjo.....	24
Figura 5: Associação de células fotovoltaicas em paralelo.....	25
Figura 6: Associação de células fotovoltaicas em série.....	25
Figura 7: Divisão das partes que compõem um módulo fotovoltaico.....	26
Figura 8: Célula e módulo fotovoltaico monocristalino e policristalino	27
Figura 9: Célula fotovoltaica de disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS)	28
Figura 10: Célula fotovoltaica de perovskita.....	29
Figura 11: Curva I-V de uma célula fotovoltaica	31
Figura 12: Ponto de máxima potência traçada pela curva da corrente e tensão	31
Figura 13: Curva característica I-V com diferentes níveis de irradiação solar	32
Figura 14: Curva característica I-V para variadas temperaturas	33
Figura 15: Ângulos da geometria solar.....	34
Figura 16: Movimento do sol ao passar do ano.....	35
Figura 17: Composição de um sistema off grid.....	36
Figura 18: Composição de um sistema híbrido.....	36
Figura 19: Composição de um sistema on grid	37
Figura 20: Alguns tipos de arduino existentes	39
Figura 21: Interface IDE do arduino	40
Figura 22: Arduino Mega 2560.....	46
Figura 23: Micro servo 9g.....	47
Figura 24: Sensor de tensão DC 0 – 25V	47
Figura 25: LDR.....	48
Figura 26: Recortes do papelão duplo	48
Figura 27: Caixa/base para os servos motores.....	49
Figura 28: Base para a célula fotovoltaica e LDR's	49
Figura 29: Vista frontal do protótipo com a célula inclinada 45°	50
Figura 30: Vista frontal com a célula posicionada em 90°	50
Figura 31: Vista superior	51
Figura 32: Vista lateral esquerda	51
Figura 33: Vista lateral direita	52
Figura 34: Vista frontal.....	52
Figura 35: Vista posterior do protótipo coma célula inclinada em 45°	53
Figura 36: Triângulo de medidas para base da célula fixa	54
Figura 37: Base da célula fixa	55
Figura 38: Caixa armazenadora de sensores.....	55
Figura 39: Montagem inicial do circuito	56
Figura 40: Implementações dos sensores de tensão e corrente.....	57
Figura 41: Circuito finalizado.....	58

Figura 42: Parte inicial do código (I)	59
Figura 43: Parte inicial do código (II).....	59
Figura 44: void setup	60
Figura 45: Loop parte I.....	61
Figura 46: Loop parte II	61
Figura 47: Loop parte III.....	62
Figura 48: Lógica de controle dos micros servos	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Matriz energética brasileira	18
Gráfico 2: Aumento da energia solar no Brasil 2013 - fev. de 2024	19
Gráfico 3: Curva das tensões 01 x 02 do dia 22 de março de 2024.....	65
Gráfico 4: Curva das potências 01 x 02 do dia 22 de março de 2024	67
Gráfico 5: Energia das células 01 e 02 do dia 22 de março de 2024	68
Gráfico 6: Curva das tensões 01 x 02 do dia 24 de março de 2024.....	70
Gráfico 7: Curva das potências 01 x 02 do dia 24 de março de 2024	71
Gráfico 8: Energia das células 01 e 02 do dia 22 de março de 2024	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de arduinos e suas especificidades.....	39
Tabela 2: Tensões e correntes do dia 22 de março de 2024.....	64
Tabela 3: Potências do dia 22 de março de 2024.....	66
Tabela 4: Tensões e correntes do dia 24 de março de 2024.....	69
Tabela 5: Potências do dia 24 de março de 2024.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
eV	Elétron-Volt
DDP	Diferença de potencial
EVA	Acetato de etil vinila
m-Si)	Silício monocristalino
p-Si	Silício policristalino
CIS	Seleneto de cobre índio
CIGS	Disseleneto de cobre índio e gálio
CdTe	Telureto de cádmio
HJT/HIT	Híbrido de hétero junção
DSSC	Célula fotovoltaica sensibilizada por corantes
FF	Fator de forma
G	Potência da radiação
A _c	Área da célula
a _w	Ângulo azimutal da superfície
a _s	Ângulo azimutal do sol
CC/DC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
LDR	Resistor Dependente de Luz
JST	Terminal sem solda do Japão
GND	Ground/Referência/terra

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Grau Celsius
η	Eficiência de conversão
γ	Ângulo de incidência
α	Altura solar
β	Ângulo da inclinação da superfície
Ω	Ohm

Sumário

1.INTRODUÇÃO.....	17
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. IRRADIAÇÃO SOLAR	20
2.2. CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	22
2.2.1. Efeito fotovoltaico	22
2.2.2. Célula, módulo e arranjo fotovoltaico.....	24
2.2.3. Tipos de células	26
2.2.3.1. Primeira geração	26
2.2.3.2. Segunda geração	28
2.2.3.3. Terceira geração	29
2.2.4. Características de uma célula fotovoltaica.....	30
2.2.4.1. Curva característica I-V.....	30
2.2.4.2. Influência da irradiação solar e da temperatura	32
2.3. ÂNGULOS DA GEOMETRIA SOLAR.....	33
2.4. TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	35
2.4.1. Sistema <i>off grid</i>	35
2.4.1.1. Sistema híbrido	36
2.4.2. Sistema <i>on grid</i>	37
2.5. ARDUINO	37
2.5.1. Hardware do Arduino	38
2.5.2. Software do Arduino.....	40
2.5.2.1. IDE do Arduino	40
2.5.3. Linguagem de Programação	42
2.5.3.1. Valores	42
2.5.3.2. Funções.....	43
2.5.3.3. Estruturas de controle de fluxo.....	44
3.METODOLOGIA	45
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS	45
3.1.1. Arduino Mega 2560	46
3.1.2. Micro servo	46
3.1.3. Sensor de tensão DC 0 – 25V	47
3.1.4. LDR	47

3.2. MONTAGEM DO RASTREADOR SOLAR	48
3.3. LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO DO RASTREADOR.....	58
4.RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	64
4.1. PRIMEIRO DIA DE ANÁLISE.....	64
4.2. SEGUNDO DIA DE ANÁLISE.....	69
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
REFERÊNCIAS.....	75
ANEXO A – CÓDIGO DE FUNCIONAMENTO DO RASTREADOR SOLAR.....	77

1. INTRODUÇÃO

Desde o início da Revolução industrial ocorrida na segunda metade do século XVIII na Inglaterra, o mundo tem passado por intensas mudanças, isso em decorrência do aumento exorbitante do nível populacional da humanidade que tem demandado de um maior processo de produção, resultando em uma maior extração dos recursos naturais do planeta. O processo de produção industrial intensificou a exploração e a queima de combustíveis fósseis como o petróleo, carvão, gás natural e etc.

O aumento da queima desses combustíveis fósseis tem resultado em uma maior emissão de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, desta forma, agravando ainda mais o efeito estufa. Tendo em vista a crítica situação em que o mundo se encontra, pesquisas têm sido feitas com o intuito de descobrir fontes de energias que sejam capazes de suprir a necessidade energética da sociedade e que sejam consideradas energias limpas, ou seja, que não emitam gases poluentes no ambiente. Atualmente as energias conhecidas são classificadas em dois tipos: renováveis e não renováveis (DOS ANJOS, 2019). Energias renováveis são aquelas em que a sua restituição ocorre de forma natural, como exemplo temos a energia solar (proveniente do sol), a energia eólica (gerada através dos ventos), a energia hidráulica (produzida através de correntes de água doce), a energia maremotriz e ondomotriz (proveniente do movimento das marés e das ondas, respectivamente), biomassa (produzida através de matérias orgânicas) e a energia geotérmica (produzida pelo calor da Terra). As energias não renováveis são aquelas que possuem quantidade finita na natureza e sua reposição necessita de milhares ou milhões de anos, como exemplo temos os combustíveis fósseis.

É válido ressaltar que nem toda energia renovável pode ser considerada uma energia limpa e nem toda energia não-renovável é uma energia ‘suja’. O conceito de limpa ou suja está relacionado a emissão de gases poluentes, mas, mesmo não emitindo esses compostos amplificadores do efeito estufa, os mais variados tipos de energia ainda impactam de forma negativa o meio ambiente, pois uma geração de energia incapaz de causar degradação ambiental ainda não existe. Para facilitar a compreensão pode-se citar a energia produzida através da biomassa, que é considerada renovável, contudo, não é limpa devido ao fato que produz gases poluentes na atmosfera como o dióxido de carbono (CO_2), o dióxido de nitrogênio (NO_2) e o enxofre (S). E como exemplo de energia não-renovável é possível citar a energia nuclear, que apesar de gerar graves riscos ao meio ambiente devido ao “lixo tóxico”, é considerada uma energia limpa por não gerar agravantes ao aquecimento global.

Para que haja a produção de energias renováveis faz-se necessário vários estudos a respeito dos impactos ambientais, pois construções como a de uma usina hidrelétrica, podem modificar um ambiente inteiro, com o desmatamento de florestas e a barragem dos rios, além de ocorrer o deslocamento de uma população inteira caso seja necessário (DOS ANJOS, 2019). Todos esses custos de construções e instalações tornam a produção das energias renováveis bastante elevada, dificultando o acesso em larga escala da população a esse tipo de energia.

As fontes de energias repositivas ainda são pouco utilizadas mundialmente se comparadas com as fontes de energias limitadas. No início dos anos 2000, cerca de 80% de toda energia mundial era a base de combustíveis fósseis, 7% correspondiam a energia nuclear, 11% eram de hidrelétricas e apenas 2% advindas das energias solar, eólica e biocombustíveis (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Contudo, em decorrência da preocupação aos impactos causados ao planeta com a extração de combustíveis fósseis, a utilização das energias provenientes do sol e dos ventos têm ganhado mais espaço em meio a população mundial, com destaque maior na energia solar que sofreu um aumento considerável nos seus níveis de pesquisa e de produção. O Brasil tem se destacado com relação aos outros países no que se diz respeito a produção de energia elétrica proveniente da irradiação solar, como mostra o gráfico 1.

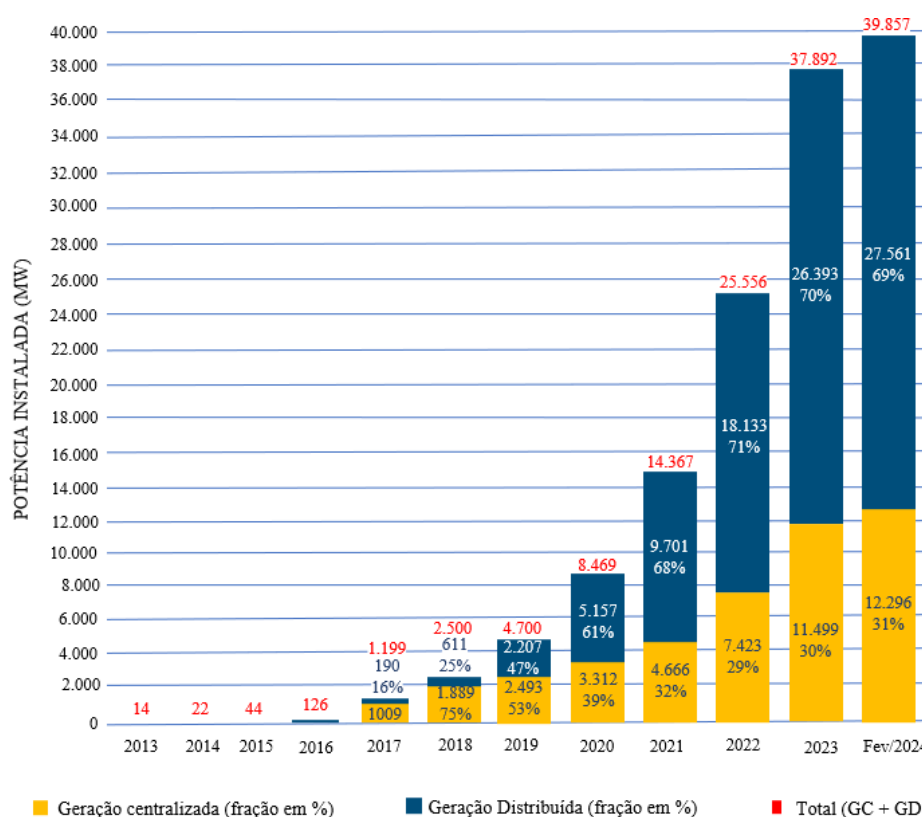
Gráfico 1: Matriz energética brasileira



Fonte: ANEEL/ABSOLA, 2024

Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), de 2019 a fevereiro de 2024 o nível de produção de energia utilizando células fotovoltaicas no Brasil aumentou em aproximadamente 700%, como mostra o gráfico 2. Tal aumento está relacionado ao posicionamento geográfico do Brasil, tendo em vista que as regiões semiáridas estão bem próximas a linha do equador, onde a incidência solar é bastante considerável, facilitando o processo de produção de energia fotovoltaica.

Gráfico 2: Aumento da energia solar no Brasil 2013 - fev. de 2024



Fonte: Adaptado de ANEEL/ABSOLAR, 2024.

Esse aumento exorbitante na matriz energética solar, têm resultado em mais pesquisas para desenvolver métodos que aprimorem a captação de energia solar e transformá-la em energia elétrica. Assim, vários estudos de utilização das células fotovoltaicas para atingir sua máxima eficiência estão sendo realizados, pois até o presente momento só é possível transformar cerca de 18% da energia proveniente do sol em energia elétrica através das células fotovoltaicas comercializadas. Algumas dessas análises são feitas combinando diferentes compostos das células fotovoltaicas, modificando sua composição e sua estrutura. Outros estudos conciliam a robótica às células fotovoltaicas, buscando garantir que elas absorvam uma maior intensidade de irradiação solar. Mas afinal, é possível otimizar a produção de energia

elétrica advindas de células fotovoltaicas em combinação com a automação? Como montar um mecanismo capaz de garantir uma maior exposição da célula fotovoltaica a irradiação solar? E como saber se esse método realmente produz eficiência maior que o método convencional?

Partido deste pensamento, este trabalho tem por objetivo desenvolver um protótipo de automação, utilizando a plataforma eletrônica do Arduino, capaz de fazer com que uma célula fotovoltaica seja submetida a maior intensidade da irradiação proveniente do sol possível, para que esta venha a garantir um melhor desempenho na produção de energia elétrica. Para tanto, faz-se necessário que haja um embasamento a respeito das células fotovoltaicas e como esses semicondutores transformam a energia solar em elétrica. Após isso, será realizada a montagem de um sistema *off grid* no qual a composição se dará por duas células fotovoltaicas, em que uma delas estará sendo analisada em seu posicionamento comum, ou seja, fixo em uma determinada angulação, enquanto a outra será posta sobre uma base ligada ao programador eletrônico que fará com que a célula acompanhe o posicionamento do sol, com o intuito de que esta receba a maior intensidade de irradiação solar possível. Além disso, ambas as células estarão sendo monitoradas por sensores de tensão para que ao final das análises seja possível produzir gráficos de corrente versus tensão (IxV) e compará-los, desta forma será possível averiguar qual célula fotovoltaica obteve o melhor desempenho no processo de produção de energia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. IRRADIAÇÃO SOLAR

O Sol desempenha um papel fundamental como principal fonte de energia para o nosso planeta, emitindo energia na forma de radiação e funcionando como base de toda a vida na Terra. Essa energia solar viaja por meio de ondas eletromagnéticas, com apenas uma pequena fração da radiação (aproximadamente duas partes por milhão) alcançando a superfície terrestre. Dessa energia, metade se manifesta como luz visível, enquanto a outra metade se distribui entre as formas de infravermelho e ultravioleta (DOS ANJOS, 2019).

Para analisar a radiação na superfície terrestre é essencial ter conhecimento a respeito da intensidade da radiação e de sua composição. A radiação solar que alcança a parte superior da atmosfera passa por uma série de processos até atingir o solo devido as flutuações climáticas, dentre esses processos é possível citar, reflexões, dispersões e absorções. A soma das componentes direta, difusa e refletida resultam na incidência total da radiação solar sobre um

corpo que esteja situado ao solo (FADIGAS, 2012), a representação deste esquema está apresentado na figura 1. A radiação direta é aquela proveniente exclusivamente do disco solar e que não passou por alterações de direção, exceto as causadas pela refração atmosférica. Já a radiação difusa refere-se à energia recebida por um corpo após a alteração da trajetória dos raios solares devido à reflexão ou difusão na atmosfera. A quantidade de radiação refletida está diretamente relacionada às características do solo e à orientação do equipamento captador.

Figura 1: Incidência da radiação solar na superfície



Fonte: FADIGAS, 2012.

Os níveis de radiação solar na superfície da Terra variam com as estações do ano, isso, em decorrência da inclinação do eixo de rotação em relação ao plano da órbita em torno do sol. A localização geográfica também é um forte atenuante, devido principalmente às diferenças de latitude, condições meteorológicas e altitudes. O Brasil possui um ótimo índice de radiação solar, em destaque temos a região nordeste, que possui um dos maiores potenciais do mundo no que diz respeito a irradiação solar, com valores que variam de 200 a 250 W/m² de potência contínua, esses valores equivalem a variação de 1752 kWh/m² a 2190kWh/m² por ano de radiação incidente.

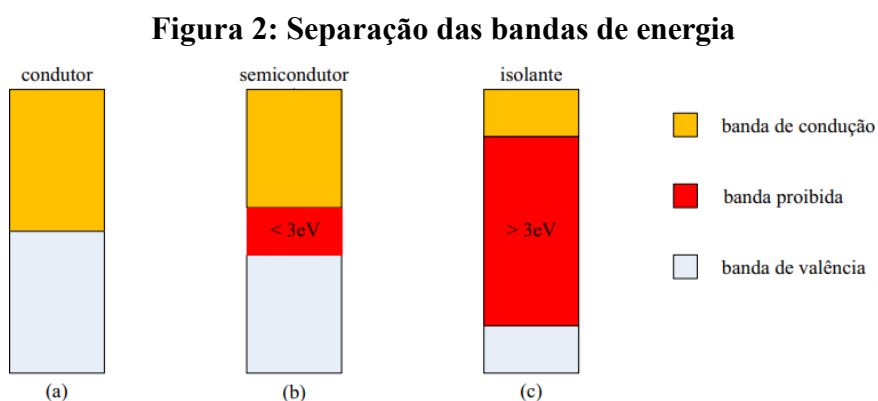
2.2. CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

As células fotovoltaicas são dispositivos elétricos compostos por materiais semicondutores, que são capazes de transformar a energia provida do sol em energia elétrica, por meio do efeito fotovoltaico. Esses semicondutores possuem uma camada denominada banda de valência, no qual possui um excesso de elétrons livres e outra região chamada de banda de condução, onde há ausência de elétrons, gerando assim as chamadas “lacunas” ou “buracos” (FADIGAS, 2012).

2.2.1. Efeito fotovoltaico

A luz é identificada como uma onda eletromagnética, isso em decorrência das suas características físicas como a capacidade de sofrer refração, dispersão e polarização. Além disso ela é composta por partículas denominadas fótons, sendo estes os responsáveis por transportar a energia contida na radiação eletromagnética.

A condutividade elétrica de um material é definida por meio das bandas de energia, podendo este material ser classificado como condutor, semicondutor ou isolante. Os semicondutores e isolantes possuem uma característica em comum que é a separação entre a banda de valência e banda de condução (DOS ANJOS, 2019). Essa separação é definida como *gap*, que por sua vez é a denominação dada a energia necessária para que o elétron salte da banda de valência para a banda de condução. Nos materiais semicondutores essa energia pode atingir até 3eV (elétron-volt) diferente dos isolantes que podem atingir níveis acima deste valor (PINHO; GALDINO, 2014). A figura 2 mostra a representação destas bandas de energia para materiais condutores, semicondutores e isolantes.



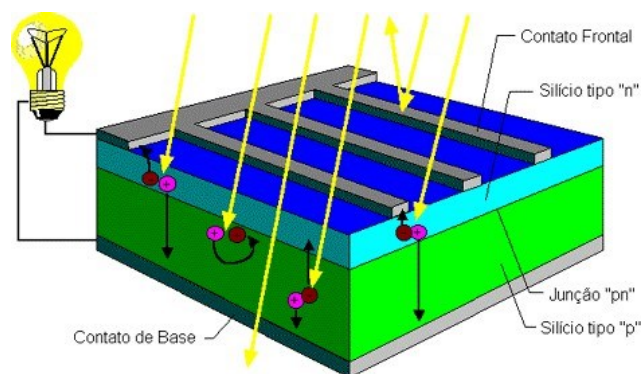
Fonte: PINHO; GALDINO, 2014.

O silício é o segundo elemento mais abundante na natureza, e atualmente é o semicondutor mais utilizado na produção de células fotovoltaicas, devido a composição eletrônica de seus átomos, que possuem quatro elétrons que interligam-se formando uma rede cristalina (GOETZE, 2017). Contudo, em sua forma pura o silício não é capaz de transformar a luz do sol em energia elétrica, para isso se faz necessário acrescentar átomos de outros materiais ao silício, fazendo assim com que ele torne-se impuro, dando origem assim ao processo de dopagem, que nada mais é do que aplicar impurezas a um determinado material.

Ao aplicar átomos de fósforo que possuem cinco elétrons de ligação a átomos de silício resultará em um elétron livre, esse excesso de elétrons faz com que surja a camada do tipo “n” que por sua vez é carregada negativamente. De maneira oposta, ao aplicar átomos de boro que possuem apenas três elétrons de ligação, fará com que um dos elétrons do silício não realize sua ligação, gerando assim as chamadas lacunas ou buracos, e desta forma gerando a camada tipo “p” que é caracterizada por ser carregada positivamente. Ao aplicar átomos de boro em uma metade de silício puro e na outra metade átomos de fósforo, a ligação das duas metades formará a chamada junção PN (GOETZE, 2017). Com essa junção, alguns elétrons do tipo n passam a preencher algumas lacunas do tipo p, a captura desses elétrons pelos buracos resulta na formação de um campo elétrico permanente, que impede a passagem de mais elétrons da camada n para a camada p.

Ao expor o semicondutor dopado com fósforo e boro a luz solar, caso os fótons provenientes do sol possuam uma energia maior que a energia de gap, irá ocorrer a formação de pares de elétron-lacuna, e caso esse fenômeno ocorra onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas sofrerão uma aceleração que resultará em uma corrente percorrendo a junção PN, e assim temos a formação do chamado efeito fotovoltaico que nada mais é do que a formação de uma diferença de potencial (DDP) que resulta no deslocamento de cargas. Desta forma, ao conectar as extremidades do silício dopado por um fio será produzida uma corrente por meio do deslocamento dos elétrons (PINHO; GALDINO, 2014). Essa formação de corrente é representada na figura 3 onde é mostrado o corte transversal de uma célula fotovoltaica.

Figura 3: Corte transversal de uma célula fotovoltaica

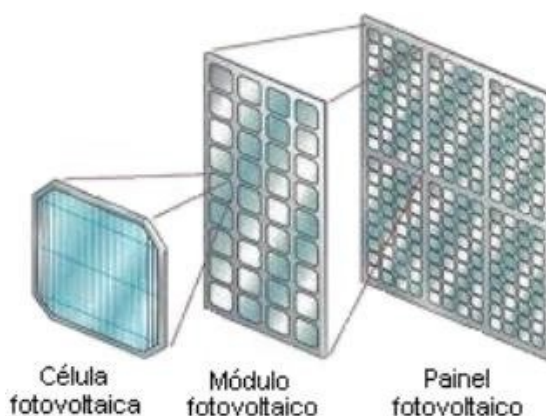


Fonte: CRESESB, 2006.

2.2.2. Célula, módulo e arranjo fotovoltaico

A célula fotovoltaica é uma unidade básica de conversão direta de energia solar, mas somente ela não é capaz de produzir grandes quantidades de tensão e corrente, para se obter níveis elevados de eletricidade é necessário que diversas células sejam interligadas e encapsuladas, formando assim o módulo fotovoltaico. Ainda é possível produzir mais energia unindo dois ou mais módulos fotovoltaicos, dando origem assim aos painéis ou arranjos fotovoltaicos (GASPARIN, 2009). Essa diferenciação de célula, módulo e arranjo é mostrada na figura 4.

Figura 4: Célula, módulo, arranjo

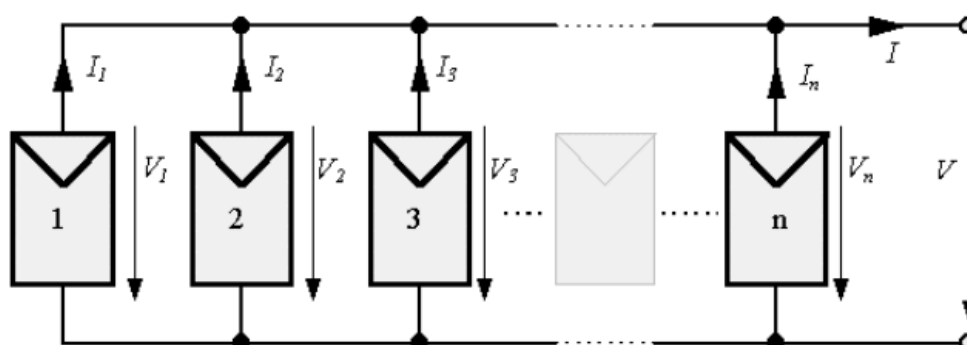


Fonte: Valente, 2011.

Para conectar as células fotovoltaicas utiliza-se uma faixa condutora muito fina, de forma que esta seja colocada de cima para baixo em cada célula solar, até que todas as células

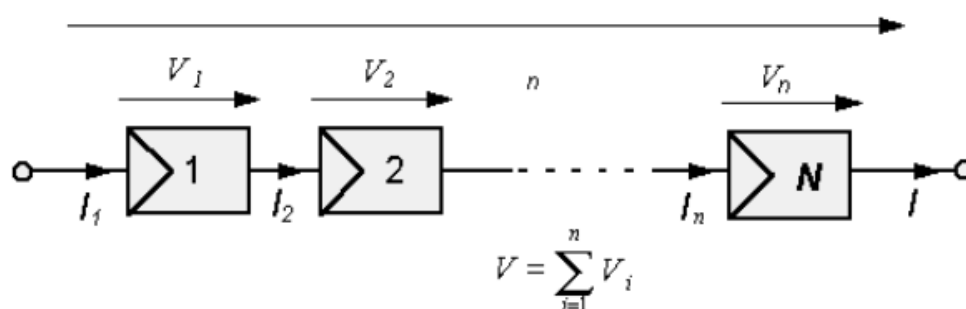
do painel solar fotovoltaico encontram-se ligadas, dando origem a um circuito. O arranjo das células nos módulos pode ser feito conectando-as em série ou em paralelo. Para que seja obtida uma corrente mais elevada a ligação das células devem ser feitas em paralelo para que assim seja somadas as correntes enquanto a tensão no módulo é exatamente a da célula. A conexão em série permite o aumento da tensão do arranjo, onde são feitas as somas da tensão de cada célula, as representações destes circuitos são apresentadas nas figuras 5 e 6, respectivamente.

Figura 5: Associação de células fotovoltaicas em paralelo



Fonte: CRESESB, 2006.

Figura 6: Associação de células fotovoltaicas em série

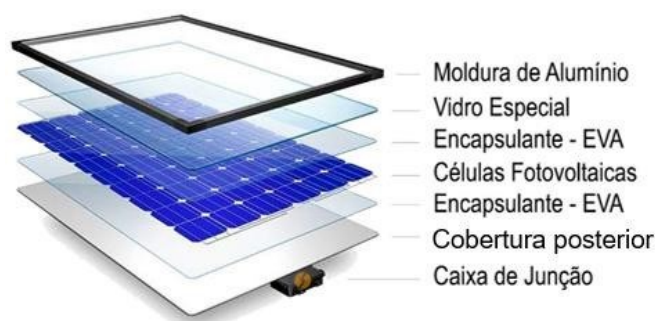


Fonte: CRESESB, 2006.

A estrutura de um módulo ou painel fotovoltaico é composto por várias camadas que dividem-se em: cobertura, encapsulante, as células conectadas em série ou paralelo, em seguida adiciona-se um encapsulante novamente e logo após tem-se a cobertura posterior. A cobertura pode ser revestida com diferentes tipos de materiais como o acrílico, polímeros e o vidro. Dentre estes, o vidro o material mais utilizado entre as células comercializadas devido ao seu custo, alta transparência, estabilidade, impermeabilidade a água e a gases bem como a sua facilidade para limpeza (GASPARIN, 2009). O encapsulante garante a adesão entre as células, o material mais utilizado para esta função é o acetato de etil vinila (EVA), sendo este um polímero estável

a variação de temperatura e a exposição à radiação ultravioleta, além de ser transparente e possuir baixa resistência térmica. A cobertura posterior possui uma rigidez dielétrica que garante o isolamento elétrico do módulo, além de ser impermeável, na maioria dos casos para esta função é utilizado um polímero conhecido como *Tedlar*. Para garantir a resistência física do módulo, todas essas camadas são envolvidas por uma moldura de alumínio, e por fim é inserida a caixa de conexão, posicionada na parte posterior do módulo onde é feita a ligação dos terminais elétricos (GASPARIN, 2009). A esquematização dessas camadas que compõem o módulo fotovoltaico é mostrada na figura 7.

Figura 7: Divisão das partes que compõem um módulo fotovoltaico



Fonte: Adaptado de Portal Solar.

2.2.3. Tipos de células

Nos dias atuais há uma vasta variedade de tipos de células fotovoltaicas que diferenciam-se apenas pela sua composição e estrutura física. Essas variações ocorreram com o passar dos anos em decorrência dos estudos feitos com o intuito de aprimorar a produção de energia e tornar as células mais acessíveis (DOS ANJOS, 2019). De maneira geral os tipos de células existentes são divididos em três grupos denominados gerações, que serão apresentadas a seguir.

2.2.3.1. Primeira geração

A primeira geração é composta por apenas dois tipos de células fotovoltaicas, sendo elas a de silício monocristalino (m-Si) e a de silício policristalino (p-Si), essa geração apresenta o

melhor desempenho no que diz respeito a produção de energia e é a mais comercializada popularmente.

- **Monocristalino:** Este tipo de célula passa por um processo de produção minucioso conhecido como método de Czochralski, que envolve colocar uma quantidade específica de silício puro em um forno de fusão chamado cadinho, a aproximadamente 1400°C. Após o silício ser derretido, uma semente de monocristal de silício é adicionada a essa composição e, durante o processo de resfriamento enquanto o forno rotaciona, a semente de monocristal faz com que os demais átomos de silício cristalizem-se de forma única. Isso resulta em um novo monocristal com cerca de 30cm de diâmetro e vários metros de comprimento. Em seguida, este cilindro é cortado para se tornar um retângulo, que é então cortado em lâminas com aproximadamente 0,3mm de espessura. Essas lâminas passam por dopagem para criar as camadas do tipo n e tipo p, formando assim a célula fotovoltaica. Por fim, as bordas dessas placas são cortadas em formas octogonais para evitar curtos-circuitos. Este tipo de célula apresenta uma cor uniforme e escura, além de ter uma eficiência que varia entre 15% a 18%, segundo informações do Portal Solar.
- **Policristalino:** O processo de produção das células de silício policristalino é bastante semelhante ao monocristalino, com algumas modificações significativas. No caso do policristalino, não é inserida a semente de monocristal de silício na mistura, permitindo que o silício cristalize livremente, formando múltiplos cristais e dando origem ao seu nome. O processo de formação do cilindro, corte e dopagem são os mesmos, mas neste tipo de célula, as pontas não são cortadas, resultando em uma forma quadrada em vez de octogonal. Devido a ter menos etapas em seu processo de fabricação, as células policristalinas tendem a ter um custo inferior às monocristalinas. De acordo com informações do Portal Solar elas também apresentam uma eficiência um pouco menor, variando entre 13% e 15%. A figura 8 mostra as células monocristalinas e policristalinas, respectivamente.

Figura 8: Célula e módulo fotovoltaico monocristalino e policristalino

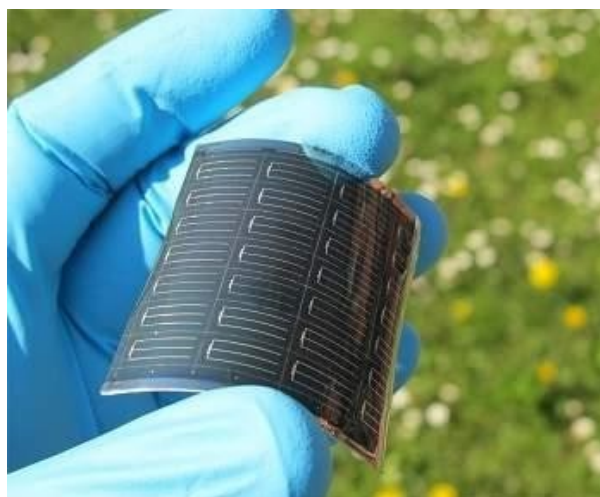


Fonte: Adaptado de NeoSolar, [s.d.].

2.2.3.2. Segunda geração

A segunda geração, baseada em películas finas ou filmes finos, começou a ser produzida nos anos 90 como uma alternativa mais econômica às células de silício cristalino. No entanto, essa abordagem não teve muito sucesso devido à sua baixa eficiência e vida útil, especialmente com a redução dos preços das células de silício cristalino. Mesmo assim, as células de filme fino apresentam algumas vantagens, como a redução do uso de matéria-prima e um processo de produção mais simples, além de serem flexíveis, o que as torna adaptáveis a diversas situações. As células fotovoltaicas de filme fino são fabricadas de maneira totalmente diferente das células tradicionais de silício cristalino. Elas utilizam uma base, que pode ser de vidro, metal ou plástico, onde o material semicondutor é depositado por meio de processos como vaporização, pulverização ou até mesmo impressão. Segundo dados do Portal Solar a eficiência dessas células varia de 5% a 14%. Por exemplo, a célula composta por silício amorfo (a-Si) tem eficiência de 5% a 9%, a célula de seleneto de cobre índio (CIS) apresenta eficiência de 11% a 14%, a célula de disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS) tem eficiência de 10%, enquanto a célula composta por telureto de cádmio (CdTe) varia de 6% a 9%. A figura 9 mostra um exemplo de célula fotovoltaica da segunda geração.

Figura 9: Célula fotovoltaica de disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS)



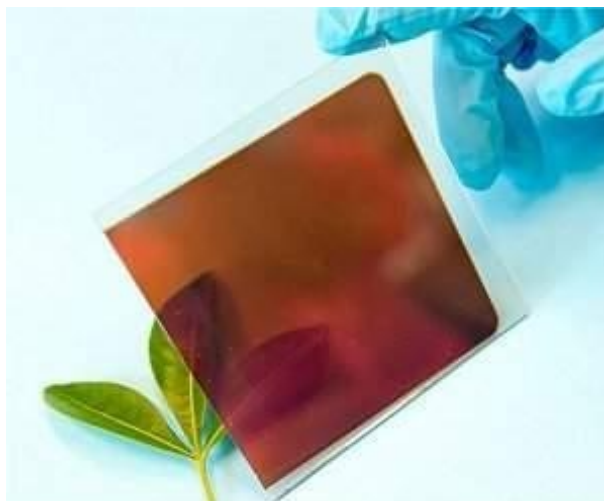
Fonte: Inovação tecnológica, 2011.

2.2.3.3. Terceira geração

A terceira geração é a mais recente, tendo suas produções iniciais no começo dos anos 2000, o que explica por que ainda não recebeu muito destaque entre os módulos fotovoltaicos. Alguns exemplos dessa geração mostram eficiências superiores às células da primeira geração. Um exemplo é a célula fotovoltaica híbrida de heterojunção (HJT/HIT), que combina células de silício cristalino em camadas com silício amorfo, resultando em uma eficiência de +20% em comparação com as células de silício cristalino. No entanto, o alto custo de produção torna essa tecnologia inviável comercialmente. Outro exemplo é a célula fotovoltaica de perovskita, que atinge uma eficiência de 25%, mas sua curta vida útil e baixa estabilidade em ambientes quentes e úmidos a tornam impraticável para o mercado atualmente.

Dentre as células da terceira geração, uma que está ganhando destaque devido ao baixo custo de produção, resistência e eficiência é a célula fotovoltaica sensibilizada por corantes (*Dye-sensitized solar cell* - DSSC). Elas têm custos de produção mais baixos em comparação com outras tecnologias, apresentam uma eficiência variando de 8% a 14% e têm boa resistência mecânica. A figura 10 mostra uma célula fotovoltaica de perovskita.

Figura 10: Célula fotovoltaica de perovskita



Fonte: Inovação tecnológica, 2013.

2.2.4. Características de uma célula fotovoltaica

Como mencionado anteriormente, a incidência da luz do sol sobre um semicondutor com uma junção p-n ligado a um circuito externo resulta na formação de uma corrente elétrica. Desta forma é possível representar a célula a partir de seus parâmetros elétricos de saída sendo estes corrente e a tensão, em relação a fatores que influenciam na entrada, que por sua vez são a temperatura da célula e irradiância.

2.2.4.1. Curva característica I-V

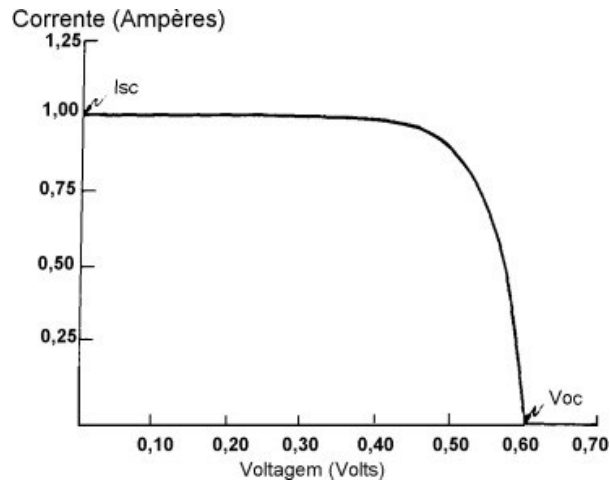
A curva característica é um parâmetro crucial usado para descrever a eficiência de uma célula, módulo ou arranjo fotovoltaico. Esse método consiste na representação matemática do comportamento da corrente em função da tensão. Para cada carga conectada aos terminais da célula, é possível obter um par de valores I , V , com isso é traçada a curva característica I versus V . Os parâmetros elétricos de um arranjo fotovoltaico são determinados sob as condições padrão de teste (STC, *Standard Test Conditions*), as quais envolvem uma radiação solar padrão de 1000W/m^2 , temperatura padrão de 25° Celsius e uma massa de ar igual à 1,5 (GOETZE, 2017).

A potência do módulo é dada em W_p (Watt - pico), e seu valor máximo, ou máxima potência (P_m) como é conhecida, é atingida quando multiplica-se a corrente de máxima potência (I_{pm}) pela tensão de máxima potência (V_{pm}), como mostra a equação (1).

$$P_m = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (1)$$

Outros dois parâmetros essenciais para gerar a curva I-V são: a corrente de curto circuito (I_{sc}), que é identificada como a corrente máxima que um dispositivo pode produzir correspondendo a tensão nula, e a tensão de circuito aberto (V_{oc}), que por sua vez é a tensão máxima que uma célula ou módulo pode produzir quando a corrente é nula. Nesses parâmetros a potência é nula, pois ambas as componentes não podem coexistir ao mesmo tempo, uma representação da curva I-V é mostrada na figura 11.

Figura 11: Curva I-V de uma célula fotovoltaica

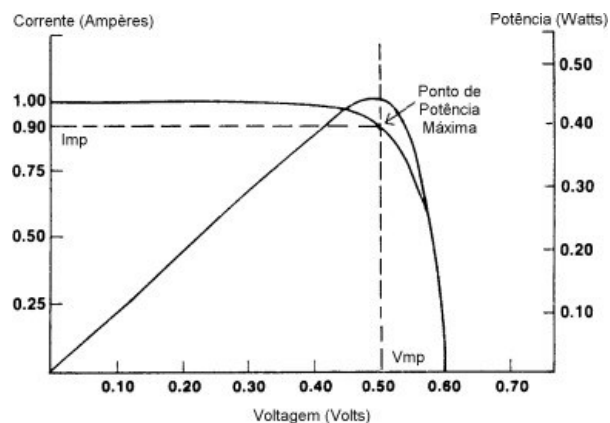


Fonte: CRESESB, 2006.

O ponto de máxima potência fica localizado no “joelho” da curva. A curva característica aproxima-se do ideal quando seu formato assemelha-se a um retângulo, no qual os vértices são I_{sc} e V_{oc} , a grandeza que representa o quanto a curva assemelha-se do ideal é o fator de forma (FF), (GOETZE, 2017). O fator de forma está subordinado as características de fabricação da célula, como por exemplo a dopagem, o tipo de semiconductor utilizado, as conexões do módulo, entre outros. Desta forma, quanto melhor a qualidade da célula melhor será o resultado do FF e a curva I-V será mais semelhante a um retângulo. A fórmula do FF é apresentado na equação (2) e a representação gráfica dessas grandezas é mostrado na figura 12.

$$FF = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{sw} \cdot V_{ow}} \quad (2)$$

Figura 12: Ponto de máxima potência traçada pela curva da corrente e tensão



Fonte: CRESESB, 2006.

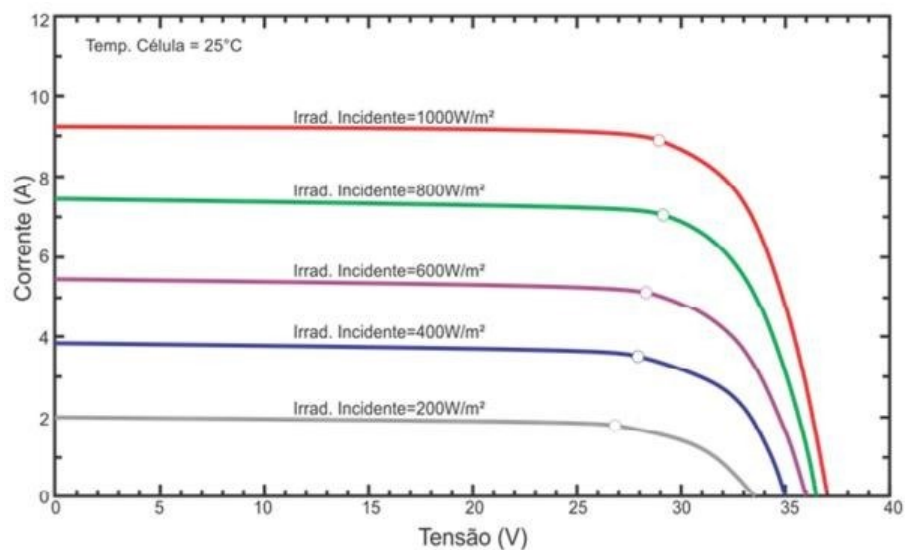
A eficiência de conversão η de uma célula fotovoltaica é calculada pela razão entre a potência entregue a uma carga P_{out} e a potência da radiação G que incide sobre a área da célula A_c , bem como mostra a equação (3).

$$\eta = \frac{P_{out}}{A_c \cdot G} \quad (3)$$

2.2.4.2. Influência da irradiação solar e da temperatura

As células fotovoltaicas quando expostas à luz do sol, produzem energia na forma de corrente contínua. A temperatura e o nível da irradiação solar estão diretamente ligados ao desempenho que as células ou módulos são capazes de exercer. Um nível de irradiação elevado faz com que haja uma corrente maior em relação a tensão, como mostra a figura 13, pois um maior índice de luminosidade implica uma maior quantidade de fótons para energizar os elétrons.

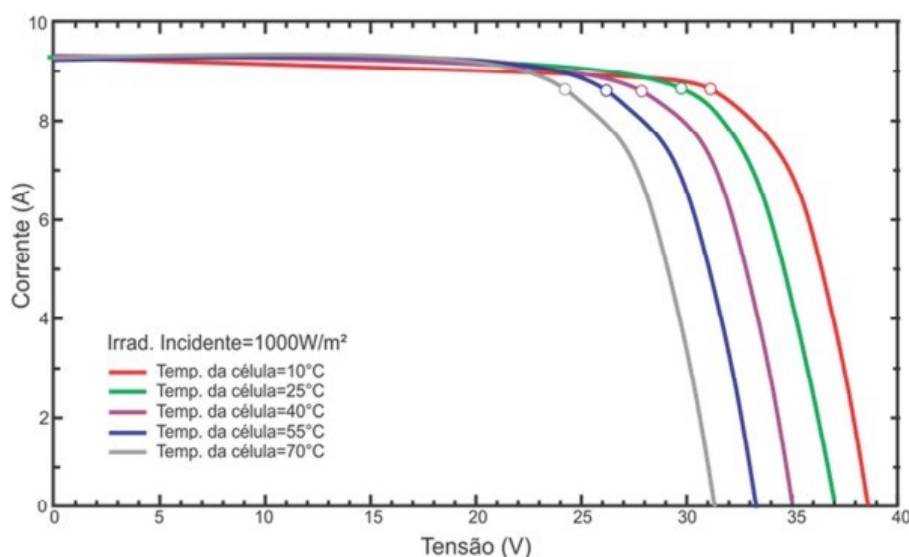
Figura 13: Curva característica I-V com diferentes níveis de irradiação solar



Fonte: Goetze, 2017.

Por outro lado, com o aumento do índice de luminosidade, há o aumento da temperatura que resulta em uma diminuição no valor da tensão e em consequência disso a eficiência decresce. Como mostra a figura 14, a tensão de circuito aberto cai à medida que a temperatura da célula aumenta, resultando em uma diminuição da potência dos módulos.

Figura 14: Curva característica I-V para variadas temperaturas



Fonte: Goetze, 2017.

2.3. ÂNGULOS DA GEOMETRIA SOLAR

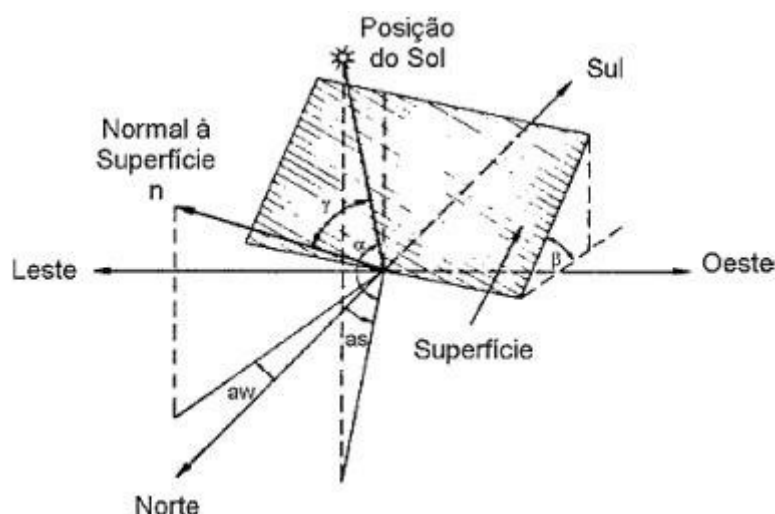
A circundação da Terra em torno do sol ao longo do ano resulta em uma órbita com formato elíptico em um plano que possui uma inclinação de aproximadamente $23,5^\circ$ com relação ao plano equatorial. As diferentes mudanças da elevação do sol no decorrer dos dias, meses e ano é resultado desta inclinação. Declinação solar é o nome dado entre o ângulo formado entre os raios solares e a linha do equador, sendo que este pode variar de $-23,5^\circ$ a $23,5^\circ$ no decorrer do ano. A trajetória do movimento aparente do sol em uma dada localidade do planeta é resultado da soma da declinação com a latitude local (ALVES, 2018).

A inclinação de $23,5^\circ$ do eixo terrestre tem um impacto direto na forma como os raios solares alcançam a superfície. Essa influência é observada ao examinar as relações geométricas entre os raios solares e a superfície terrestre, como exemplificado pelo ângulo de incidência (γ), que é o ângulo formado pelos raios do sol e a superfície de captação. A projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção norte-sul formam um ângulo denominado ângulo azimutal da superfície (a_w), que por sua vez pode variar entre -180° a 180° no qual é considerado positivo se estiver à esquerda do norte geográfico e negativo caso o ângulo seja formado a direita. A figura 15 demonstra a visualização destes ângulos bem como os que serão citados a seguir.

Além do ângulo azimutal da superfície há também o ângulo azimutal do sol (a_s) que é identificado como a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul, e este

assim como o a_w também pode variar de -180° a 180° . O ângulo formado entre o raio solar e a projeção do mesmo sobre o plano horizontal é denominado altura solar (α), (ALVES, 2018). E além destes já citado há também o ângulo da inclinação da superfície (β), que corresponde ao ângulo em que uma placa solar forma com a superfície horizontal em que ela está instalada.

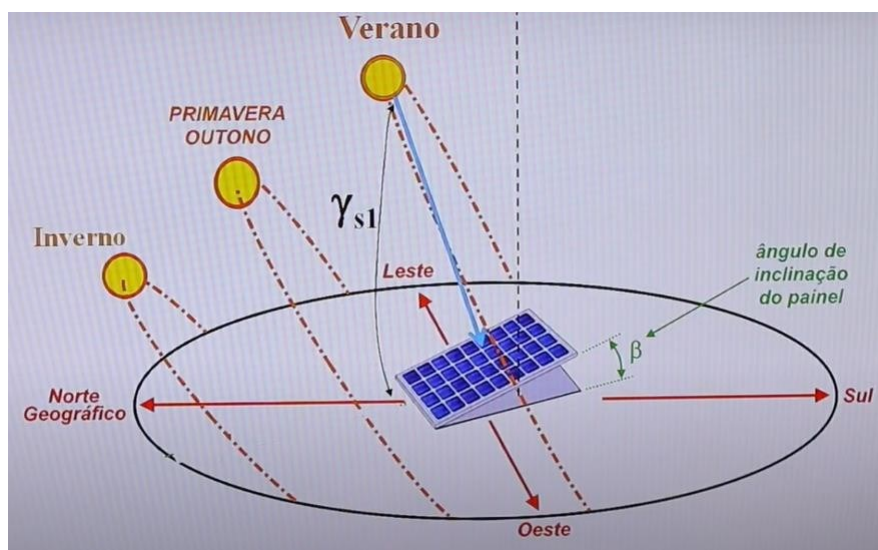
Figura 15: Ângulos da geometria solar



Fonte: Alves, 2018.

Durante a instalação de um módulo ou arranjo fotovoltaico é recomendado que o ângulo β adotado seja o mesmo que corresponde a latitude do local ou o mais próximo possível, além disso recomenda-se que o painel seja direcionado para o norte geográfico. Essas recomendações garantem que o painel receba o máximo de irradiação solar durante o ano, levando em conta que movendo de leste a oeste o sol faz uma trajetória de 180° , sendo que ao meio dia ele formará aproximadamente um ângulo de 90° com a superfície, como mostra a figura 16. Além disso, a inclinação próxima à latitude local não apenas favorece a otimização da captura de luz solar, mas também facilita a limpeza natural dos módulos por meio da chuva e do vento. No entanto, uma inclinação inferior a 10° não é aconselhável, pois isso comprometeria a eficácia da limpeza natural.

Figura 16: Movimento do sol ao passar do ano



Fonte: Curso solar USP, 2021.

2.4. TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Atualmente existem dois tipos de sistemas fotovoltaicos, sendo estes o sistema *on grid* que por sua vez é ligado à rede de distribuição de uma concessionária ou empresa de energia elétrica, há também o sistema autônomo ou fora da rede (*off grid*) que como o nome já diz, ele não fica interligado a uma rede de distribuição externa. Cada um deles possuem suas peculiaridades em seu processo de montagem, os sistemas autônomos podem ser puramente fotovoltaicos ou mesclados com algum outro tipo de gerador de energia como por exemplo um aerogerador ou um gerador a diesel (PINHO; GALDINO, 2014), denominado assim um sistema híbrido.

2.4.1. Sistema *off grid*

É um sistema autônomo, ou seja, fornece energia elétrica sem o auxílio da rede de distribuição da concessionária ou de cooperativas. Para a montagem desse sistema se faz necessário a utilização de módulos fotovoltaicos que atuam como a fonte produtora de energia, ligados a uma bateria ou a um banco de baterias (dependendo da demanda de energia) que servirão para armazenar a energia fornecida pelos módulos, contudo para que a energia produzida pelas células fotovoltaicas não danifiquem a bateria, é necessário a implementação de um controlador de carga, que tem a função de evitar o acúmulo excessivo de energia nas

baterias, além disso como os módulos produzem energia em forma de corrente contínua (CC) e as baterias também a armazenam dessa forma, é necessário ligar um inversor entre a bateria e a carga, pois esse aparelho é capaz de converter a corrente contínua em corrente alternada (AC), a figura 17 mostra a esquematização desse sistema.

Figura 17: Composição de um sistema off grid



Fonte: Cavalheiro, 2021.

2.4.1.1. Sistema híbrido

Os sistemas híbridos são sistemas autônomos que operam em conjunto com outros geradores, como os eólicos a combustíveis fósseis, como mostra a figura 18. Seu processo de montagem segue os mesmos passos que o sistema *off grid* puramente de módulos fotovoltaicos. Contudo, devido a implementação de novos tipos de geradores, o controle para a energia produzida torna-se mais complexo pois é necessário integrar as a potência fornecida por ambos os geradores através dos inversores.

Figura 18: Composição de um sistema híbrido

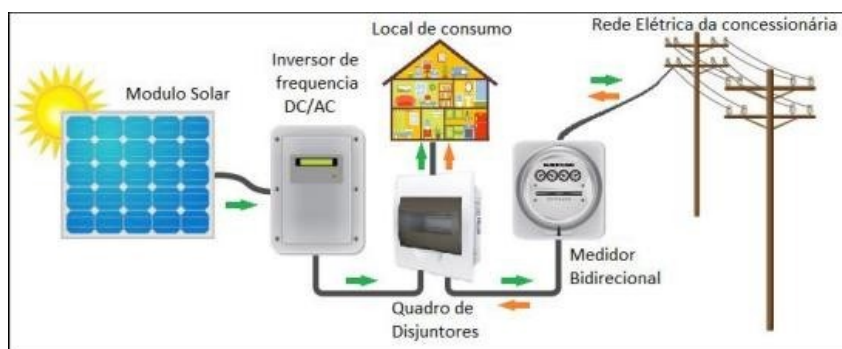


Fonte: CRESESB, 2006.

2.4.2. Sistema *on grid*

Diferente do sistema *off grid*, o *on grid* precisa estar ligado à rede de distribuição da concessionária, além de dispensar a utilização das baterias e do controlador de carga. O inversor permanecerá sendo utilizado para transformar a corrente CC em corrente AC, porém ele também terá a função de sincronizar a corrente fornecida pelos módulos fotovoltaicos com a corrente da rede de distribuição. Como não há banco de armazenamento de energia toda a eletricidade produzida e não consumida pela carga, é direcionada para a rede de distribuição pública. Devido a esse fato, é implementado um relógio medidor bidirecional que gira no sentido contrário quando o sistema fotovoltaico envia energia para a rede da concessionária, isso gera créditos para o dono daquela rede. Esses créditos podem ser aproveitados posteriormente quando a demanda de energia é maior que a produção. A representação deste sistema é mostrada na figura 19.

Figura 19: Composição de um sistema on grid



Fonte: Cavalheiro, 2021.

2.5. ARDUINO

O primeiro protótipo do que se conhece hoje por arduino foi criado no Instituto de Interatividade e Design na cidade de Ivrea na Itália, no ano de 2005. Esse dispositivo eletrônico foi criado com o pressuposto de desenvolver um mecanismo facilmente programável, com um bom custo benefício e de fácil acessibilidade para pessoas que não fossem programadores profissionais. O projeto foi desenvolvido com o princípio *open source*, desta forma todos os programas desenvolvidos em sua plataforma são de domínio público, podendo serem copiados, modificados e aprimorados por qualquer indivíduo (SILVEIRA, 201).

O arduino pode ser identificado como um microcontrolador pois o mesmo possui memória RAM, memória flash, uma CPU e portas de entrada e saída de dados interligados pelo mesmo circuito, diferenciando-se de um computador devido a ausência de interfaces para monitor, teclado e mouse. O arduino apresenta uma vantagem que o diferencia de outros microcontroladores que é o fato de não estar preso somente ao sistema operacional do *Windows*, mas atuar também em *Linux* e *Macintosh*. A linguagem de programação utilizada é a C, o que garante uma expansão das programações através das bibliotecas C++ (DOS ANJOS, 2019).

Esse microcontrolador é composto por duas partes principais, sendo estas o *hardware*, que pode ser identificada como a parte física do dispositivo e o *software* que caracteriza-se como o programa que garante o desenvolvimento ou a execução das ações que o hardware deve realizar, ou seja, é o conjunto de instruções que dizem ao hardware o que fazer.

2.5.1. Hardware do Arduino

O hardware do arduino nada mais é do que a junção dos componentes eletrônicos montados em uma placa de circuito impresso que realizam a comunicação com o computador. Ele é baseado nos microcontroladores AVR da Atmel, com destaque nos modelos ATmega8, ATmega168, ATmega328 e no ATmega1280.

Seguindo a base desses modelos, o microcontrolador possui pinos de entrada ou saída de sinais digitais que podem ser utilizados como entrada ou saída digitais conforme for definido pela programação. Contém também entradas analógicas que podem ser usados para medir os valores das tensões que estão sendo aplicadas sobre os mesmos (MCROBERTS; BÁSICO, 2011). Além de ter pinos de saída analógica que são pinos digitais que podem ser configurados como entradas ou saída analógicas.

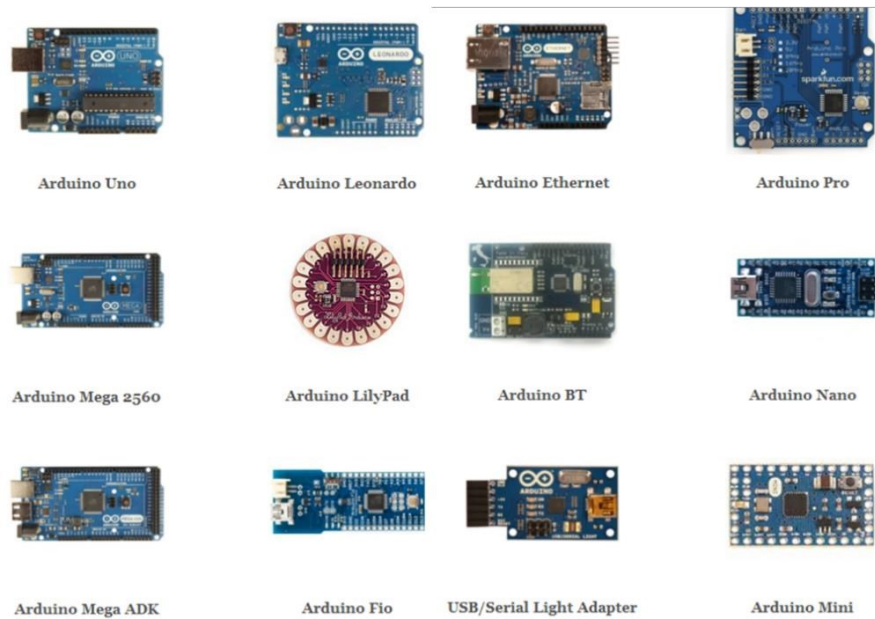
Nos dias atuais há uma vasta variedade de tipos de arduinos, cada um deles com características e funcionalidades específicas. Dentre essas distinções é possível citar: desempenho mais rápido, tamanhos variados, capacidade para ser costurado sobre tecidos, funcionamento via bluetooth, alimentação através de cabo USB ou fontes de alimentação externas que forneçam corrente contínua, entre outros. A tabela 01 e a figura 20 apresentam alguns modelos e suas características. Contudo, mesmo possuindo divergências consideráveis no hardware, no que diz respeito a programação do software as diferenças são mínimas.

Tabela 1: Tipos de arduinos e suas especificidades

	UNO	MEGA 2560	LEONARDO	DUE	ADK	NANO	PRO MINI	ESPLORA
Microcontrolador	ATmega328	ATmega2560	ATmega32u4	AT91SAM3X8E	ATmega2560	ATmega168 (versão 2.x) ou ATmega328 (versão 3.x)	ATmega168	ATmega32u4
Portas digitais	14	54	20	54	54	14	14	-
Portas PWM	6	15	7	12	15	6	6	-
Portas analógicas	6	16	12	12	16	8	8	-
Memória	32K (0,5K usado pelo bootloader)	256K (8K usado pelo bootloader)	32K (4K usado pelo bootloader)	512K disponível para aplicações	256K (8K usado pelo bootloader)	16K (ATmega168) ou 32K (ATmega328) (bootloader: 2K)	16K (2K usado pelo bootloader)	32K (4K usado pelo bootloader)
Clock	16Mhz	16Mhz	16Mhz	84Mhz	16Mhz	16Mhz	8Mhz (modelo 3.3v) ou 16Mhz (modelo 5v)	16Mhz
Conexão	USB	USB	Micro USB	Micro USB	USB	USB Mini-B	Serial/Módulo USB externo	Micro USB
Conector para alimentação externa	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
Tensão de operação	5V	5V	5V	3.3V	5V	5V	3.3 ou 5V, dependendo do modelo	5V
Corrente máxima portas E/S	40mA	40mA	40mA	130mA	40mA	40mA	40mA	-
Alimentação	7-12Vdc	7-12Vdc	7-12Vdc	7-12Vdc	7-12Vdc	7-12Vdc	3.3-12V (modelo 3.3v) ou 5-12V (modelo 5v)	5V

Fonte: Maker Hero, 2014.

Figura 20: Alguns tipos de arduino existentes



Fonte: Arduino aprendizes, 2015.

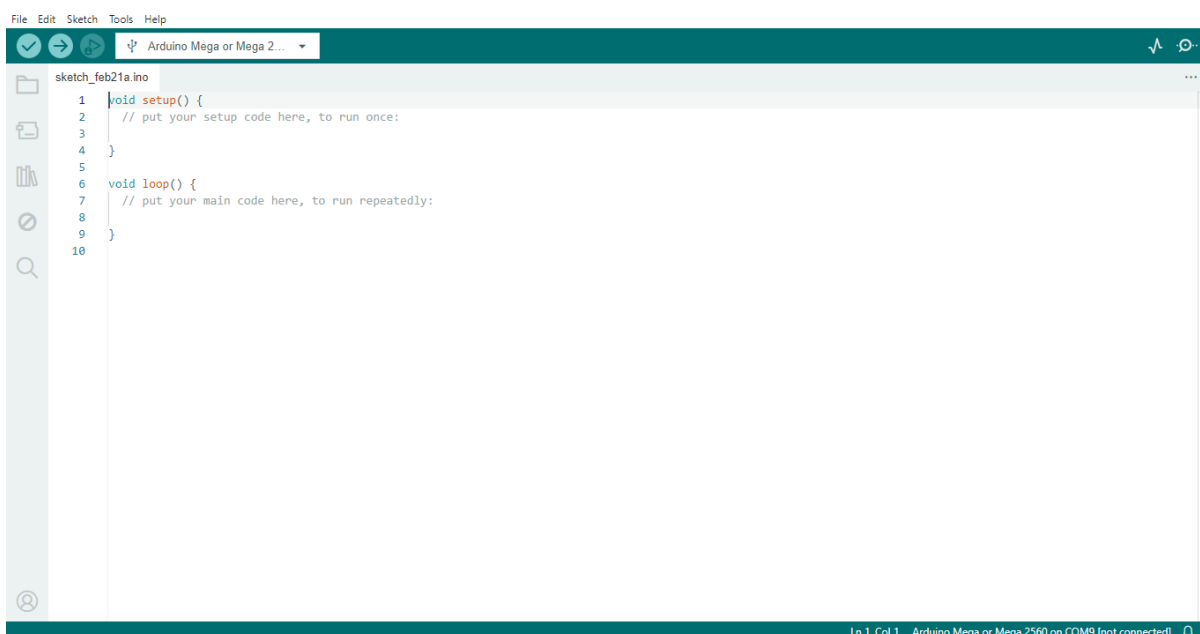
2.5.2. Software do Arduino

Para que os microcontroladores apresentados anteriormente funcionem é necessário a utilização de peças, memórias, entradas, chip e circuitos. Contudo, somente esses componentes eletrônicos não são capazes de fazer o arduino funcionar, para isso é necessário que haja um programa que instrua o hardware a executar as devidas ações, que neste caso é software (DOS ANJOS, 2019).

2.5.2.1. IDE do Arduino

O programa/software empregado na programação do Arduino é conhecido como *Integrated Development Environment*, ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) e todos os seus programas desenvolvidos são chamados de *sketches* ou esboços. A IDE é como um algoritmo que reúne diversas funcionalidades e ferramentas em uma única interface principal, simplificando o processo de desenvolvimento de software. Essa interface centralizada (figura 21) permite realizar atividades como edição, compilação e gravação de programas de maneira mais eficiente.

Figura 21: Interface IDE do arduino



Fonte: autoria própria, 2024.

Ao abrir a interface do arduino, o usuário depara-se com uma imagem semelhante a figura 21 (dependendo da versão da IDE utilizada). Nesta imagem é possível identificar as três partes no qual a IDE é dividida, sendo estas: a *toolbar* (barra de ferramentas), a *sketch window* (o código) e a janela de mensagens. A Toolbar fica localizada na parte superior da tela e nela são contidos itens ou botões que fornecem acesso às funções mais utilizadas, esses itens são identificados como *file*, *edit*, *sketch*, *tools* e *help*.

- *file* (arquivo): este menu contém opções relacionadas à manipulação de arquivos e configurações do projeto como criar um novo, abrir um arquivo existente, salvar alterações feitas e entre outros;
- *edit* (editar): este menu contém opções relacionadas à edição de texto, como copiar, colar, desfazer, refazer e outras funcionalidades típicas de um editor de texto;
- *sketch* (esboço): é uma opção que permite a você realizar ações relacionadas ao seu projeto ou código-fonte, verificação e compilação do código montado, abertura do *serial monitor* e entre outras funções
- *tools* (ferramentas): este menu contém várias opções e configurações relacionadas às ferramentas e configurações específicas do ambiente de desenvolvimento, como por exemplo selecionar o tipo de placa de arduino a ser utilizada, a porta serial em que o microcontrolador será ligado ao computador, abre a janela do Monitor Serial, que permite visualizar a comunicação serial entre a placa Arduino e o computador e entre outras ferramentas;
- *help* (ajuda): contém recursos e informações que podem ser úteis para os desenvolvedores, como por exemplo tutoriais para iniciantes, informações sobre a solução de problemas e outros tópicos que facilitem o desenvolvimento do código para o programador.

A *sketch window* é área principal da interface onde é possível escrever, editar e visualizar o código-fonte do projeto. A janela de mensagens é comumente referida ao monitor serial, que por sua vez é uma ferramenta útil para monitorar e interagir com a comunicação serial entre a placa Arduino e o computador. É na janela serial que observa-se os dados enviados da placa do arduino para o computador, o processo inverso também pode ser realizado.

2.5.3. Linguagem de Programação

A linguagem de programação capacita o programador a empregar um método padronizado que possibilita a especificação precisa dos dados com os quais um computador irá operar, assim como a definição de como esses dados serão armazenados ou transmitidos. A linguagem utilizada na programação do Arduino é derivada da linguagem C que abrange um leque de comandos de manipulação que podem ser divididos em três partes, sendo estas: valores (variáveis ou constantes), funções e estruturas de controle de fluxo.

2.5.3.1. Valores

➤ Constantes:

As constantes na linguagem de programação do arduino são valores predefinidos que não mudam nunca, por isso o nome de constantes e estas também dividem-se em três tipos, sendo:

- *True/False* (verdadeiro/falso): São constantes booleanas, relacionadas à álgebra de Boole, que caracterizam os estados lógicos 1 e 0, representando ligado e desligado, respectivamente. No contexto booleano, algo é considerado verdadeiro se for diferente de zero, enquanto é considerado falso se for igual a zero.
- *High/Low* (alto/baixo): Essas constantes estabelecem os níveis de tensão nos pinos do Arduino. O estado alto corresponde ao nível de +5 volts, ou seja, ligado; enquanto o estado baixo corresponde ao nível de terra, ou zero volts, que significa desligado.
- *Input/Output* (entrada/saída): Essas constantes são empregadas juntamente com a função *pinMode()* para especificar a configuração de um pino específico no Arduino, determinando se funcionarão como saída ou como entrada.

➤ Variáveis

Variáveis são designações que os programas atribuem a locais específicos na memória. Como o termo sugere, o conteúdo desses locais de memória pode ser alterado durante a execução do programa (SILVEIRA, 2011). Todas as variáveis devem ser declaradas no início do programa, antes de serem utilizadas. A declaração de uma variável envolve a previsão de um tipo, um nome e, opcionalmente, um valor inicial que pode ser modificado por funções ao longo do programa. As variáveis podemos ser divididas em cinco tipos, sendo elas:

- *int*: armazenam valores numéricos inteiros, sem parte decimal, abrangendo tanto positivos quanto negativos, com capacidade de até 2 bytes na memória RAM.
- *long*: que guardam valores inteiros de até 4 bytes.
- *boolean*: para valores de até 1 byte.
- *float*: armazenam valores em formato de ponto flutuante, incluindo casas decimais, com uma capacidade máxima de até 4 bytes.
- *char*: São variáveis de 1 byte destinadas a armazenar um caractere ASCII.

2.5.3.2. Funções

Funções em linguagens de programação são comparáveis a sub-rotinas ou procedimentos, sendo blocos de código pequenos usados para construir o programa principal. Elas podem ser criadas pelo programador para executar tarefas repetitivas simples ou podem ser integradas diretamente ao programa principal na forma de bibliotecas. Na linguagem de programação do arduino existem duas funções que são obrigatórias, as mesmas são exibidas na figura 19 e são elas o *setup()* e *loop()*, em linguagem C todas as funções recebem um par de parênteses que sucedem seu nome.

- *setup()*: como mencionado anteriormente, é uma parte essencial do código e é chamada uma única vez quando o programa começa a ser executado. Sua principal função é configurar e inicializar variáveis, pinos e configurações iniciais antes que o loop principal do programa comece a ser executado.
- *loop()*: essa é a segunda função obrigatória na programação do arduino e diferentemente da função *setup()*, que é executada apenas uma vez no início do programa, a função *loop()* é executada repetidamente em um loop contínuo após a conclusão da *setup()*. É dentro da função *loop()* que o código é escrito para que o arduino execute continuamente enquanto o programa estiver em execução, desta forma, esta função é responsável por criar a lógica principal do programa.

As duas funções citadas anteriormente são as consideradas obrigatórias para a programação do arduino, contudo existem outras funções que não são obrigatórias, mas são consideradas importantes e são muito utilizadas, são elas:

- *pinMode()*: utilizada para configurar um pino como entrada ou saída.
- *digitalRead()*: lê o estado de um pino digital (HIGH ou LOW).
- *digitalWrite()*: define o estado de um pino digital como HIGH ou LOW.

- *analogRead()*: lê um valor analógico de um pino (de 0 a 1023).
- *analogWrite()*: gera um sinal PWM (modulação por largura de pulso) em um pino.
- *delay()*: pausa a execução do programa por um determinado número de milissegundos.
- *Serial.begin()*: inicializa a comunicação serial para interação com outros dispositivos ou comunicação com o computador.
- *Serial.print()* e *Serial.println()*: imprime dados na porta serial (monitor serial) para fins de depuração.

2.5.3.3. Estruturas de controle de fluxo

Estruturas de controle de fluxo são ferramentas que permitem direcionar a execução do código de acordo com condições específicas ou controlar a repetição de determinadas instruções, com isso elas influenciam o fluxo de execução do programa. Essas estruturas dividem-se em dois grupos, sendo eles:

- Estruturas condicionais:
 - *if*: A estrutura condicional *if* é usada para executar um bloco de código se uma determinada condição for verdadeira. Se a condição não for atendida, o bloco de código dentro do *if* não será executado.
 - *else*: Executa um bloco de código se a condição do *if* for falsa.
 - *else if*: Permite avaliar múltiplas condições em sequência.
- Estruturas de repetição:
 - *while*: A estrutura de repetição *while* executa um bloco de código enquanto uma condição específica for verdadeira. O bloco de código continuará sendo executado repetidamente até que a condição seja avaliada como falsa.
 - *do-while*: Similar ao *while*, mas garante que o bloco de código seja executado pelo menos uma vez antes de verificar a condição.
 - *for*: A estrutura de repetição *for* é usada para iterar sobre uma sequência de valores ou realizar uma ação um número específico de vezes. É especialmente útil quando você sabe quantas vezes deseja executar um bloco de código.

3. METODOLOGIA

A metodologia desse trabalho divide-se em duas etapas, sendo a primeira dedicada a pesquisa bibliográfica, onde buscou-se informações a respeito da composição das células fotovoltaicas bem como seu funcionamento, além disso foi estudado a respeito do microcontrolador arduino e como executar programas em sua interface. Na segunda parte foram colocados em prática os conhecimentos adquiridos por meio da montagem de um protótipo de um rastreador solar, que visa garantir que a célula fotovoltaica conectada em seu eixo seja submetida a maior intensidade de irradiação solar possível. Ao decorrer deste capítulo será mostrado detalhadamente a construção desse rastreador bem como a programação que o faz funcionar e os dados obtidos com as análises da produção de energia serão apresentados no capítulo seguinte.

3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

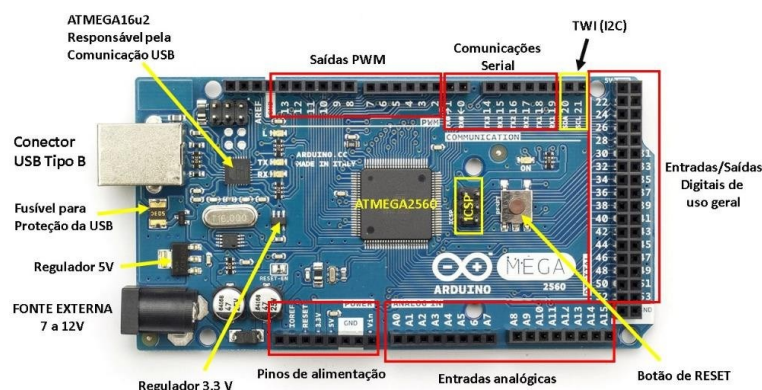
Para realização da montagem do protótipo foram utilizados os seguintes materiais:

- 2 células fotovoltaicas de silício policristalino (12V x 125mA);
- 2 micros servos 9g;
- 2 sensores de tensão DC 0 - 25V;
- 4 fotoresistor (LDR) 5mm;
- 4 resistores de 10k Ω ;
- 2 resistores de 1k Ω ;
- 4 conectores JST;
- 1 barra de terminais conectores;
- 1 protoboard;
- 1 arduino Mega 2560;
- Jumpers variados;
- 1 haste metálica (30cm);
- Papelão duplo.

3.1.1. Arduino Mega 2560

O arduino mega (apresentado na figura 22) é uma das versões mais avançadas da família arduino, ele utiliza o microcontrolador ATmega2560, que possui uma arquitetura AVR de 8 bits e oferece maior capacidade de memória bem com uma maior quantidade de entradas e saídas. Esse microcontrolador possui 54 portas de entrada/saídas digitais, das quais 16 são entradas analógicas, 15 são saídas PWM e as outras são para entrada/saídas de uso geral. Esse processador possui 256 KB de memória flash para armazenamento de código, garantindo a execução de programas mais complexos. O mesmo também possui 8 KB de memória SRAM para armazenamento temporário de dados durante a execução do programa.

Figura 22: Arduino Mega 2560



Fonte: Embarcados, 2014.

3.1.2. Micro servo

O micro servo 9g (figura 23) é um pequeno motor servo amplamente utilizado em projetos eletrônicos, especialmente na área de robótica e modelagem. Possuindo uma massa de aproximadamente 9 gramas e oferece um torque de cerca de 0,156 Nm, além possuir uma rotação limitada de 180°, tornando-o adequado para muitas aplicações de controle de posição.

Figura 23: Micro servo 9g

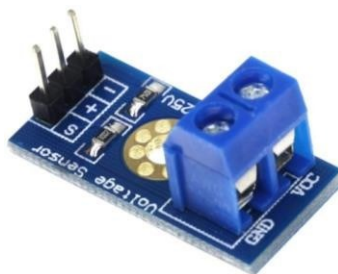


Fonte: Usinainfo, [s.d.].

3.1.3. Sensor de tensão DC 0 – 25V

O Sensor de Tensão DC 0-25V (figura 24) desempenha a função de realizar medições de voltagem contínua (VDC) dentro da faixa de 0V a 25V. Seu princípio operacional fundamenta-se em divisores de tensão. No módulo, é possível conectar uma voltagem DC até cinco vezes superior ao VCC da porta analógica. Em relação ao Arduino, é viável conectar até 25V ($5V * 5$), enquanto para uma entrada de 3,3V, suporta-se até 16,5V ($3.3V * 5$).

Figura 24: Sensor de tensão DC 0 – 25V



Fonte: Master Walker, [s.d.].

3.1.4. LDR

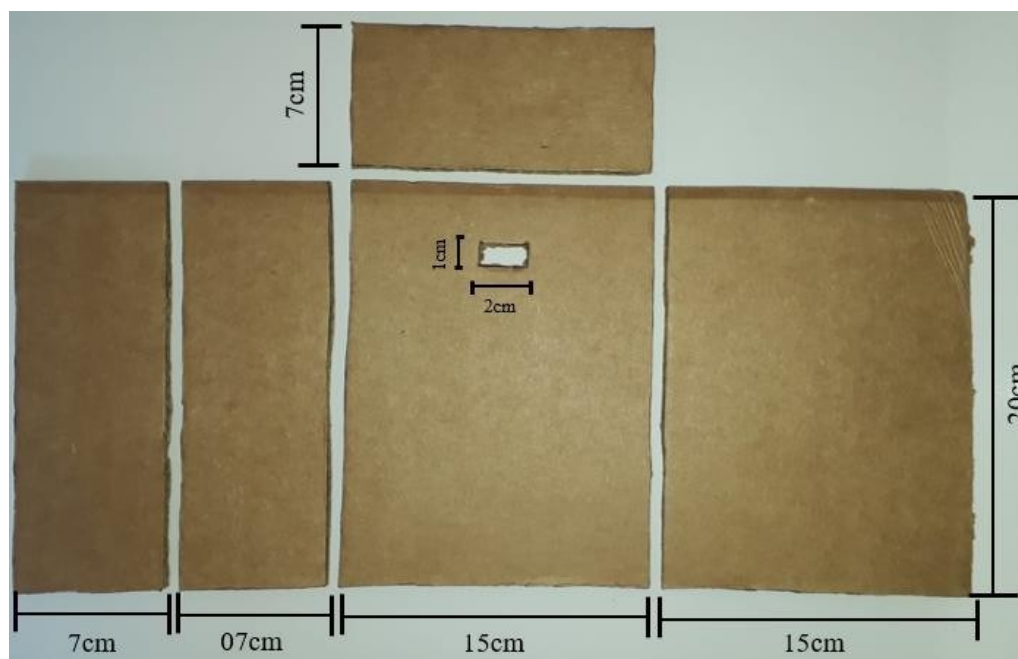
LDR (figura 25) significa *Light Dependent Resistor* ou em sua tradução resistor dependente de luz, também conhecido como fotoresistor, é um componente eletrônico que consiste em um material semicondutor capaz de modificar sua resistência elétrica em resposta à exposição à luz. A resistência do LDR diminui à medida que a intensidade de luz incidente aumenta.

Figura 25: LDR

Fonte: FVM Learning, 2023.

3.2. MONTAGEM DO RASTREADOR SOLAR

Para dar início a montagem do protótipo foi necessário cortar alguns retângulos de tamanhos variados do papelão duplo, como mostra a figura 26. Esse material foi utilizado por ser resistente (diferente dos de mais tipos de papelão) e por não aquecer de forma elevada ao ser exposto ao sol, garantindo assim que as células fotovoltaicas e os de mais componentes não sejam danificados com a temperatura.

Figura 26: Recortes do papelão duplo

Fonte: Autoria própria, 2024.

Os recortes foram colados para formar uma caixa retangular (figura 27) que serve para proteger a placa do arduino Mega2560 bem como a protoboard e os de mais componentes contra a incidência solar. A caixa também serve de base para os servos motores, pois o micro servo

que rotaciona no eixo horizontal foi posicionado no furo retangular 2cm x 1cm, e este serve de apoio para o servo motor que faz com que a célula fotovoltaica movimente-se no eixo vertical.

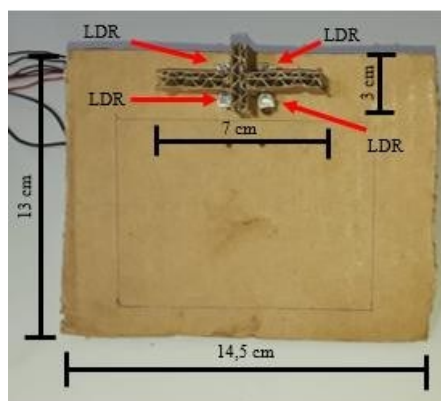
Figura 27: Caixa/base para os servos motores



Fonte: Autoria própria, 2024.

Em seguida foi utilizada mais um retângulo de papelão para servir de base para a célula fotovoltaica que rotaciona bem como os LDR's. Cada um dos quatro fotoresistores foram inseridos nas entradas dos conectores JST para que fios dos conectores transmitam o sinal do LDR para o arduino. Os resistores dependentes de luz foram separados por uma cruz para que quando uma região seja iluminada a outra fique sombreada, fazendo com que os servos movimentem-se buscando alcançar uma posição em que todos os fotoresistores recebam a incidência de luz. A montagem citada acima está representada na figura 28.

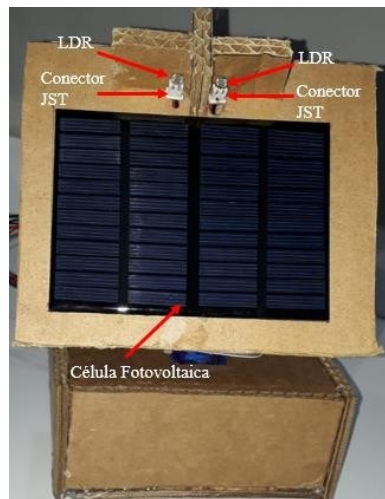
Figura 28: Base para a célula fotovoltaica e LDR's



Fonte: Autoria própria, 2024.

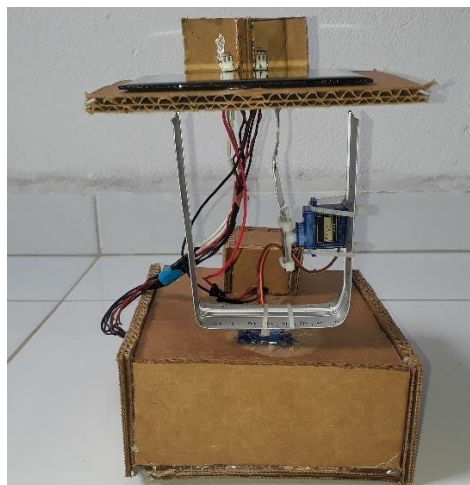
Após isso a haste metálica foi dobrada de maneira que sua curvatura forma-se um U, em seguida ela foi colada acima do eixo de rotação do micro servo que rotaciona horizontalmente, em seguida o micro servo que rotaciona na vertical foi colado em uma das laterais da haste de metal, de forma que sua hélice de rotação alinhava-se com o centro do micro servo horizontal. Em seguida a base de apoio da célula fotovoltaica foi colada a uma lâmina de metal que serviu como “braço”, este por sua vez foi colado ao eixo de rotação do servo vertical garantindo assim a movimentação para cima e para baixo da célula. O esquema citado anteriormente está representado nas figuras 29, 30, 31, 32, 33, 34 e 35.

Figura 29: Vista frontal do protótipo com a célula inclinada 45°



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 30: Vista frontal com a célula posicionada em 90°



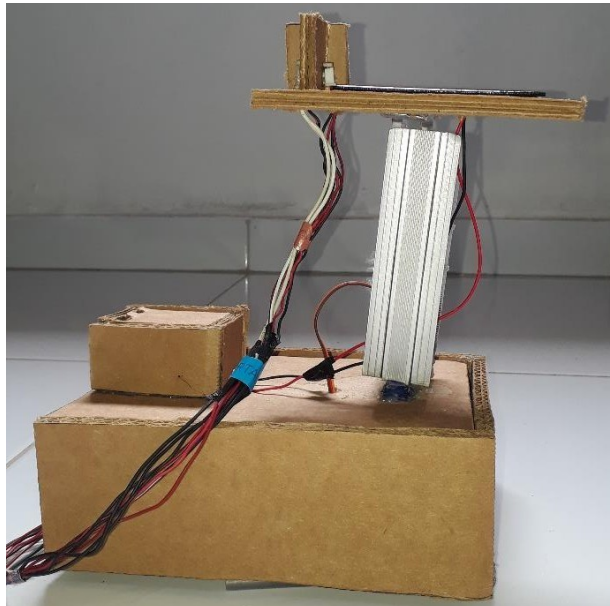
Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 31: Vista superior



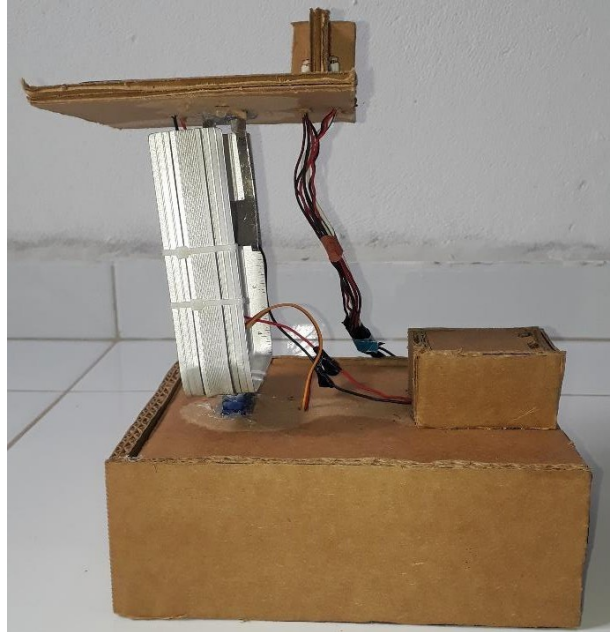
Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 32: Vista lateral esquerda



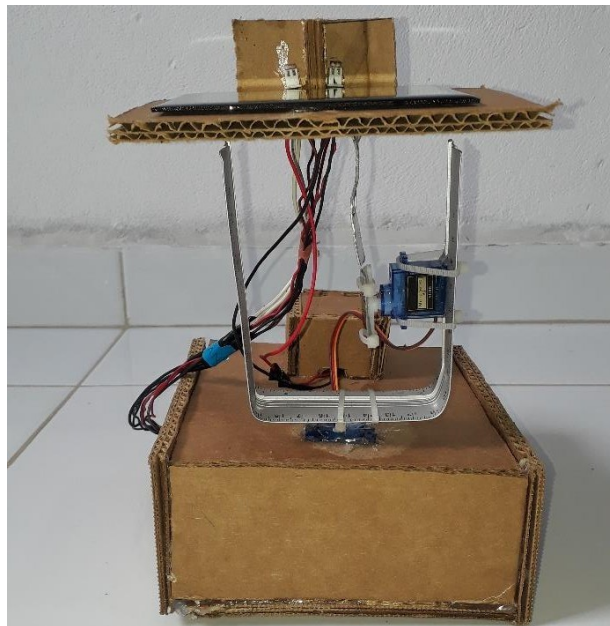
Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 33: Vista lateral direita



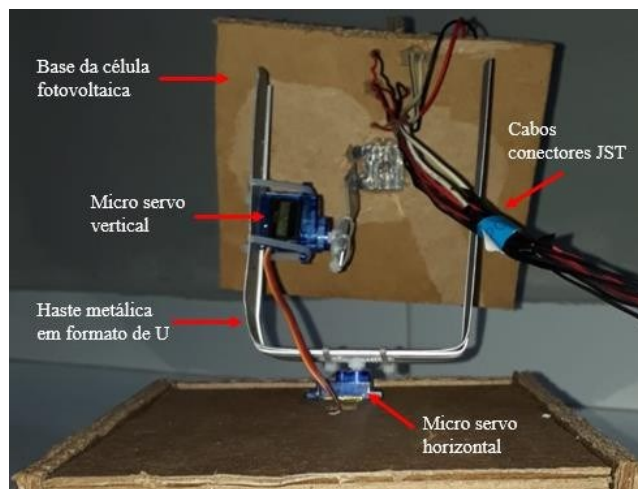
Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 34: Vista frontal



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 35: Vista posterior do protótipo com a célula inclinada em 45°



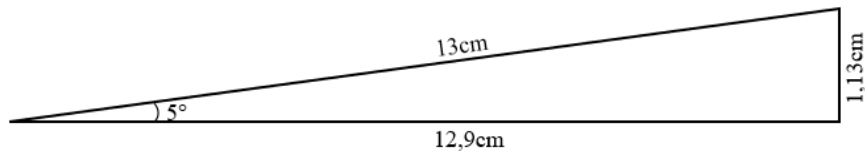
Fonte: Autoria própria, 2024.

Após concluir o suporte para a célula fotovoltaica que acompanha o movimento do sol, foi montado então a base para célula fixa. Contudo, para fazer a instalação de uma base para um módulo ou painel fotovoltaico que permaneça em uma posição fixa, é necessário seguir a teoria apresentada no item 2.3 para que seja garantido melhor desempenho da célula. O primeiro passo a ser analisado é a angulação em que o módulo deve ser instalado com relação ao solo, como mostrado anteriormente o melhor ângulo para se instalar um painel solar é o ângulo referente a latitude da região, neste caso, a análise realizada na cidade de Caraúbas – RN que possui como coordenadas geográficas: latitude = 05° 47' 33" sul, longitude= 37° 33' 24" oeste, implicou em uma inclinação de 5° para a célula fotovoltaica.

É válido lembrar que como mencionado no item 2.3 não é adequado fazer instalações de painéis solares com ângulos inferiores a 10° pois essa inclinação dificulta a limpeza natural do painel, porém, para essa análise é possível utilizar o ângulo referente a latitude da cidade pois o protótipo não pode ser exposto a sujeira (poeira) por muito tempo, tendo em vista um curto tempo de duração das análises, além do mais como trata-se de uma célula pequena a manutenção manual não é vista como um problema.

Tendo sido identificada a inclinação que a célula fotovoltaica deve ter, partiu-se então para a montagem da base que dá suporte para ela, que também consistiu em utilizar alguns retângulos feitos do mesmo material utilizado para construir a base do rastreador. A célula foi posicionada em um retângulo 13cm x 15cm, mas para garantir a sua inclinação de 5° é necessário montar um triângulo – retângulo como mostra a figura 36.

Figura 36: Triângulo de medidas para base da célula fixa



Fonte: Autoria própria, 2024.

Para identificar o valor do cateto oposto (CO) que garante a angulação de 5° para a célula foi utilizado a relação trigonométrica apresentada na equação (4)

$$\sin \beta = \frac{CO}{H} \quad (4)$$

No qual:

CO = cateto oposto;

H = hipotenusa;

β = ângulo de inclinação.

Isolando o CO temos que:

$$CO = \sin \beta \cdot H$$

$$CO = \sin(5) \cdot 13$$

$$CO \cong 1,13cm$$

Para encontrar o valor do cateto adjacente (CA) é possível utilizar a relação trigonométrica oposta ao seno, ou seja, o cosseno apresentado na equação 5.

$$\cos \beta = \frac{CA}{H} \quad (5)$$

Em que:

CA = cateto adjacente;

H = hipotenusa;

β = ângulo de inclinação.

Isolando o CA temos que:

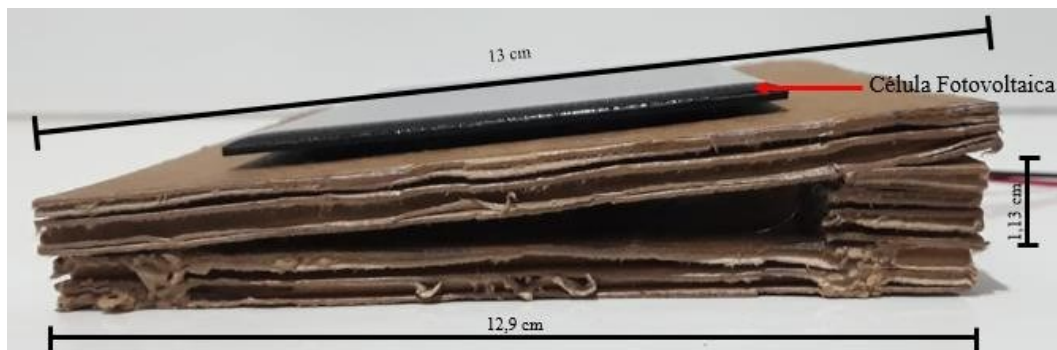
$$CA = \cos \beta \cdot H$$

$$CA = \cos(5) \cdot 13$$

$$CA \cong 12,95cm$$

Após terem sido identificadas todas as medidas, foram realizados então os cortes no papelão duplo e o resultado desse processo está exibido na figura 37.

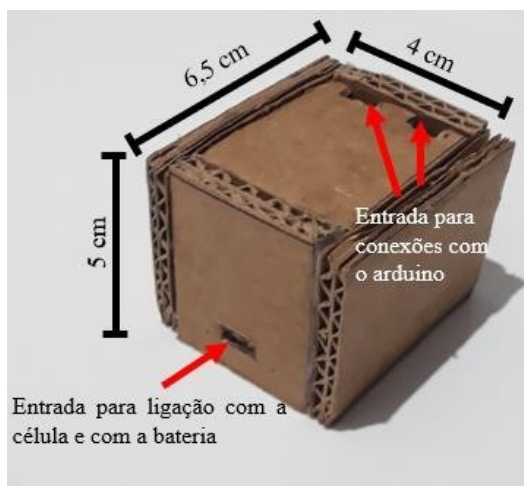
Figura 37: Base da célula fixa



Fonte: Autoria própria, 2024.

Para finalizar a montagem da estrutura foram montadas duas caixas como a que está apresentada na figura 38. Estas foram montadas com o intuito de guardar e proteger os sensores de corrente e de tensão durante o período de exposição ao sol. Ambas possuem três furos, um que serve para entrada dos cabos que ligam os sensores as células e a bateria, e outros dois servem para passagem dos conectores que ligam os sensores a placa do arduino.

Figura 38: Caixa armazenadora de sensores

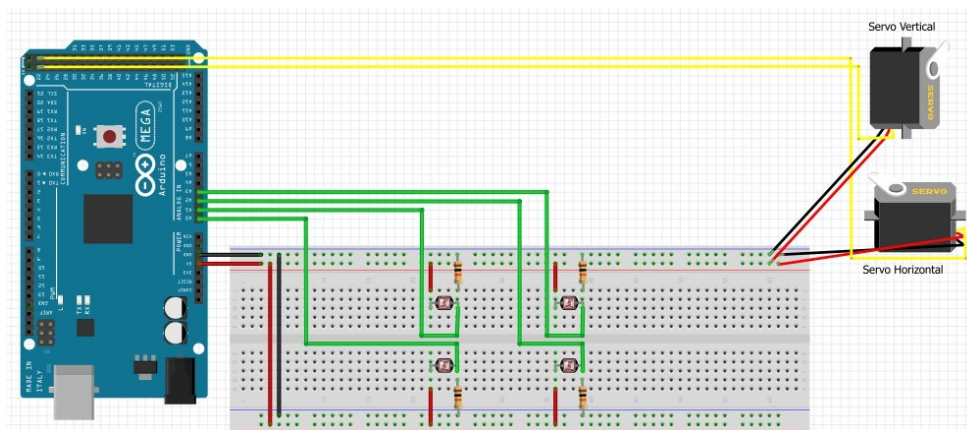


Fonte: Autoria própria, 2024.

Com toda a parte estrutural montada, realizou-se então a montagem do circuito entre os componentes eletrônicos e a placa do arduino. A parte inicial do circuito consiste em fazer os

micros servos girarem de acordo com o sinal de luz enviado pelos LDR's para o arduino, para tanto foi montado o esquema similar ao que está apresentado na figura 39.

Figura 39: Montagem inicial do circuito



Fonte: Autoria própria, 2024.

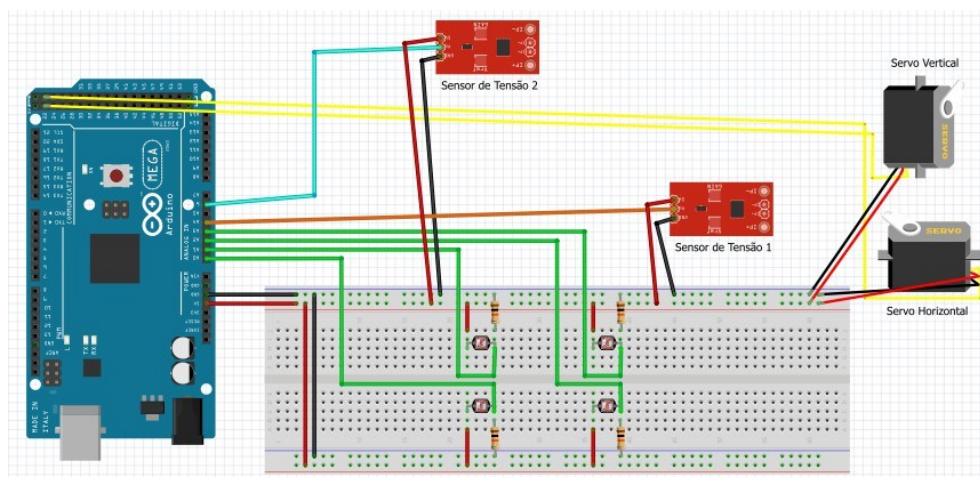
Como é possível observar, cada LDR do circuito está com um de seus terminais ligado ao polo positivo da protoboard que está ligado ao Vcc do arduino, enquanto o outro terminal está em série com um resistor de $10k\Omega$ e ambos ligados ao polo negativo da protoboard que está ligado ao GND do arduino, além disso o terminal do fotoresistor que possui ligação com o aterramento também está conectando a entrada analógica do microcontrolador, é nessa entrada em que o arduino recebe a informação a respeito da incidência de luz que o LDR fornece. O LDR inferior esquerdo está ligado a porta analógica A0, o superior esquerdo a entrada A1, o inferior direito a porta A2 e o LDR superior direito está conectado a entrada A3.

Com os fotoresistores devidamente ligados, vem então a conexão com os micros servos que servem como saída para as informações de entrada obtidas pelo arduino através dos LDR's. A conexão dos servos motores é bem simples, apenas liga-se o Vcc e o GND na protoboard e o fio destinado ao sinal digital é ligado em uma das várias saídas digitais do arduino, neste caso o micro servo que faz com que a célula fotovoltaica rotacione no eixo vertical está ligado a saída digital 22, já o servo motor que faz a rotação de modo horizontal está ligado ao pino digital 23.

Tendo sido realizadas as conexões dos micros servos, chegou a vez dos sensores de tensão DC. Assim como os servos motores, a ligação desses sensores é bastante simples, ao ligar o Vcc dos sensores ao polo positivo da protoboard e o polo negativo ao GND, resta apenas o pino de sinal digital, esses sensores assim como os LDR's funcionam como entrada de dados para o arduino, pois eles calculam a tensão fornecida pelas células fotovoltaicas e enviam os

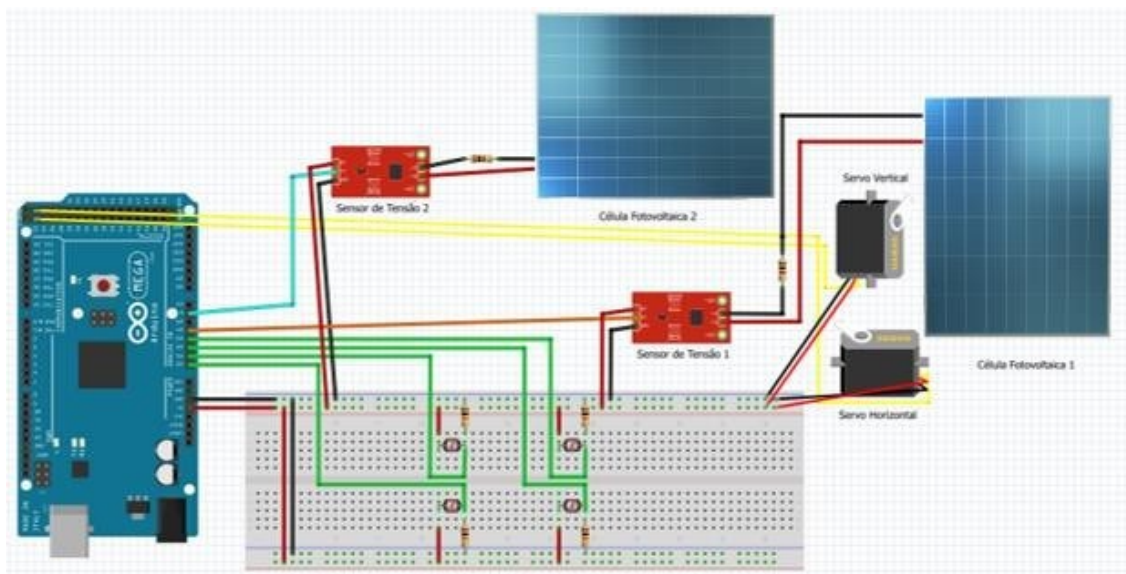
valores obtidos para o microcontrolador, por esse motivo ambos os sensores devem ser ligados as entradas analógicas do arduino. Nesse esquema o sensor de tensão DC (1) (responsável por medir a tensão da célula fotovoltaica que rotaciona) foi conectado a entrada analógica A4, como mostra a figura 40. Enquanto o sensor de tensão DC (2) (que mede a tensão da célula fotovoltaica fixa) teve seu pino de sinal conectado a entrada A6 do arduino.

Figura 40: Implementações dos sensores de tensão e corrente



Fonte: Autoria própria, 2024.

Em seguida foram realizadas as lições das células fotovoltaicas com os sensores e com as cargas (resistores de $1k\Omega$). Nesse circuito os sensores de tensão devem ser ligados em série com a célula e com e consequentemente com a carga, de forma que o polo positivo da célula fotovoltaica fique ligado ao borne do Vcc do sensor de tensão DC. Enquanto o polo negativo da célula é ligado ao resistor que por sua vez está ligado ao borne do GND do sensor de tensão DC. A figura 41 mostra os passos anteriores citados, bem como todo o circuito montado.

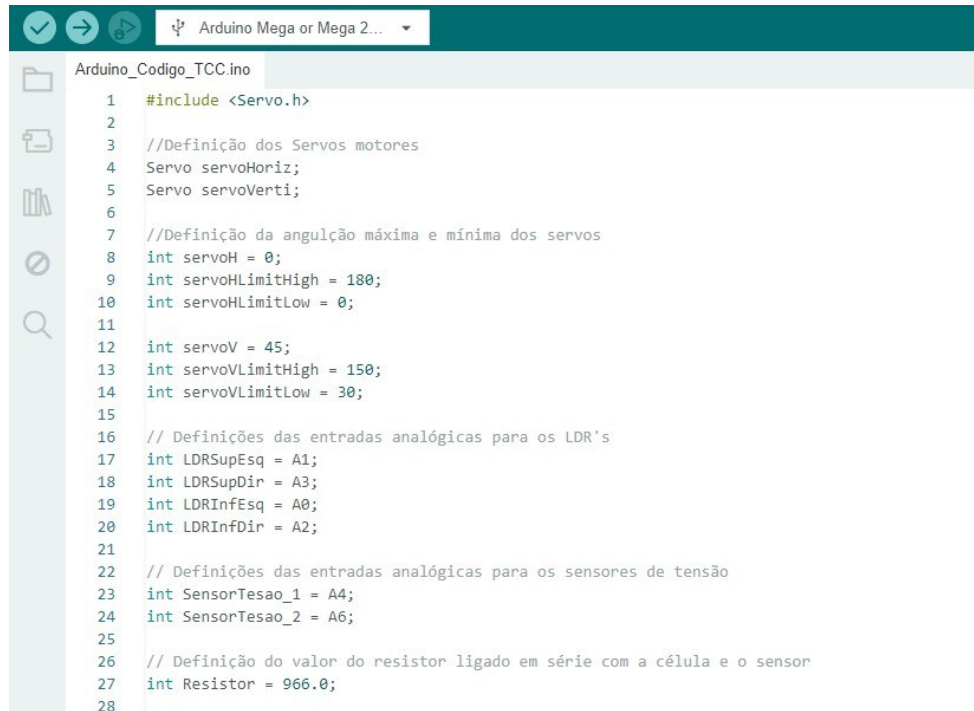
Figura 41: Circuito finalizado

Fonte: Autoria própria, 2024.

3.3. LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO DO RASTREADOR

Após finalizar todo o esquema físico do protótipo é chegada a hora da montagem do código no IDE do arduino, ou seja, a linguagem de programação que faz com que os servos motores movam-se a medida que a incidência de luz mude acima dos LDR's e também os cálculos necessários para que os sensores identifiquem os valores de tensão e correntes das células fotovoltaicas. A figura 42 mostra o início do código em quem são inseridos a biblioteca `< Servo.h >` para que seja utilizado todas as funcionalidades do micro servo, em seguida foram nomeados os servos motores bem como seus limites de rotação. Após isso foram definidas as entradas analógicas para cada LDR bem como para cada sensor de tensão, salientando que as entradas e saídas utilizadas são as mesmas mostradas figura 41.

Figura 42: Parte inicial do código (I)



```

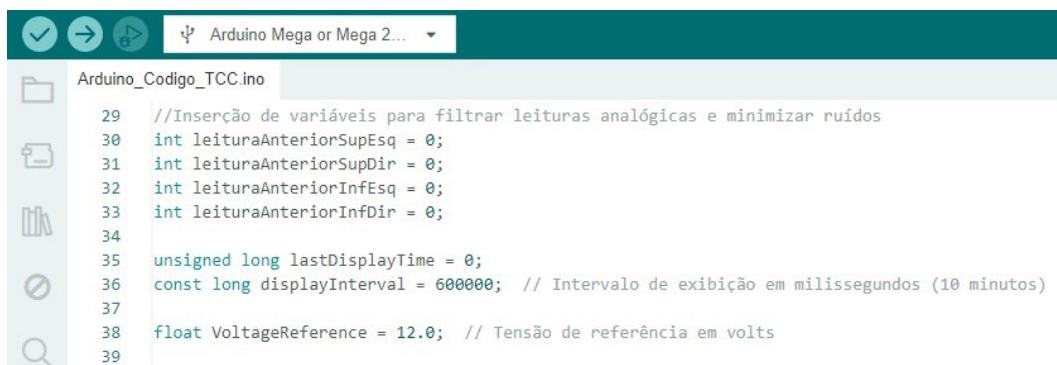
1  #include <Servo.h>
2
3  //Definição dos Servos motores
4  Servo servoHoriz;
5  Servo servoVerti;
6
7  //Definição da angulação máxima e mínima dos servos
8  int servoH = 0;
9  int servoHLimitHigh = 180;
10 int servoHLimitLow = 0;
11
12 int servoV = 45;
13 int servoVLimitHigh = 150;
14 int servoVLimitLow = 30;
15
16 // Definições das entradas analógicas para os LDR's
17 int LDRSupEsq = A1;
18 int LDRSupDir = A3;
19 int LDRInfEsq = A0;
20 int LDRInfDir = A2;
21
22 // Definições das entradas analógicas para os sensores de tensão
23 int SensorTesao_1 = A4;
24 int SensorTesao_2 = A6;
25
26 // Definição do valor do resistor ligado em série com a célula e o sensor
27 int Resistor = 966.0;
28

```

Fonte: Autoria própria, 2024.

Ainda nas definições de valores foram utilizadas variáveis do tipo *leituraAnterior* utilizadas para filtrar as leituras analógicas e minimizar ruídos. Foram inseridas constantes como *lastDisplayTime* e *displayInterval* para controlar o intervalo de exibição dos resultados no monitor serial. Finalizando a parte inicial criou-se uma constante que corresponde a tensão de referência que deve ser aplicada ao sensor, nesse caso corresponde a 12V, sendo essa a tensão máxima fornecidas por cada célula, essa constante se faz necessária para calcular os valores das tensões. Esses passos citados podem ser observados na figura 43.

Figura 43: Parte inicial do código (II)



```

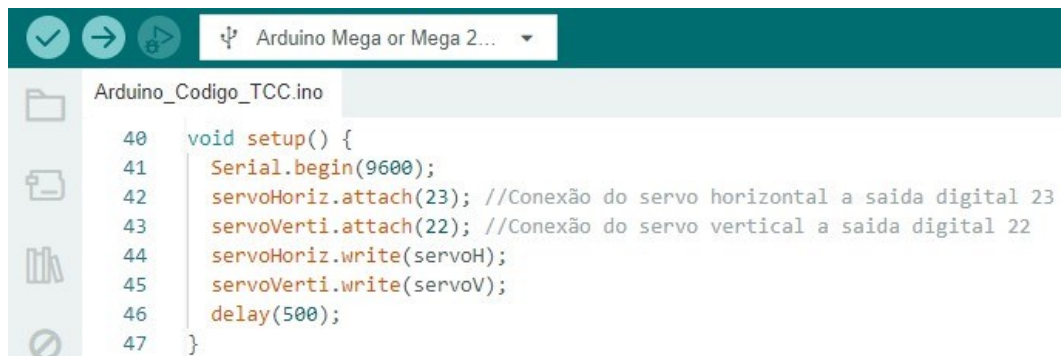
29 //Inserção de variáveis para filtrar leituras analógicas e minimizar ruídos
30 int leituraAnteriorSupEsq = 0;
31 int leituraAnteriorSupDir = 0;
32 int leituraAnteriorInfEsq = 0;
33 int leituraAnteriorInfDir = 0;
34
35 unsigned long lastDisplayTime = 0;
36 const long displayInterval = 600000; // Intervalo de exibição em milissegundos (10 minutos)
37
38 float VoltageReference = 12.0; // Tensão de referência em volts
39

```

Fonte: Autoria própria, 2024.

Dando continuidade chega-se então ao *void setup()* (figura 44), nesta parte foram definidas as conexões para os micro servos com o arduino, o comando *attach* estabelece essa conexão entre o servo motor e o pino do arduino. Nessa parte foi inserida também a função “*Serial.bergin(9600)*”, como explicado no item 2.4.3.2 essa função permite uma comunicação entre o arduino e o computador por meio da porta serial, nesse caso a comunicação foi definida em 9600 bits por segundo. O comando “*write*” assegura a posição inicial dos micros servos que já haviam sido definidas anteriormente, por fim foi definido um *delay* de 500 milissegundos, ou seja, um atraso de 0,5 segundos para que os servos possam posicionar-se antes de dar entrada no *loop()*.

Figura 44: void setup



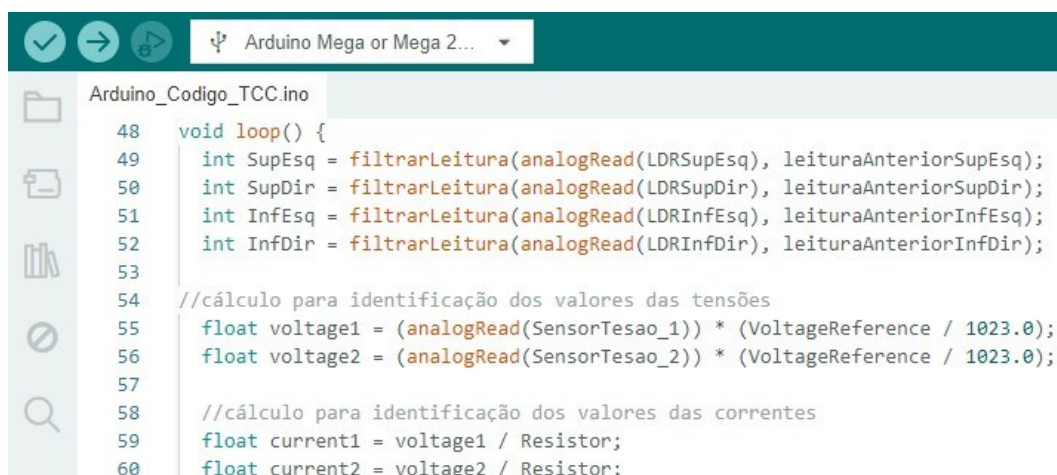
Fonte: Autoria própria, 2024.

Dando entrada no *loop()*, foram implementadas as funções de “filtrar leitura” em cada LDR para garantir uma suavização na leitura dos mesmos para que as respostas enviadas aos servos não sejam tão bruscas. Em seguida foi montado o cálculo que identifica a tensão fornecida pela célula fotovoltaica, o cálculo consiste na leitura do valor enviado para o pino de conexão com o sensor de tensão, em seguida esse valor é multiplicado pela razão entre tensão de referência e o valor máximo que uma porta lógica do arduino pode ler ($1023 = 2^{10} - 1$).

Para finalizar os cálculos foi utilizado a 1ª Lei de Ohm para calcular o valor da corrente fornecida pela célula, pois como há um resistor de 966Ω conectado em série com o módulo fotovoltaico e o sensor, basta fazer a razão entre a tensão e a resistência para encontrar o valor da corrente, como mostra a equação 6. Os passos citados nesse trecho estão exibidos na figura 45.

$$\begin{aligned}
 V &= R \cdot I \\
 I &= \frac{V}{R}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Figura 45: Loop parte I



```

48 void loop() {
49   int SupEsq = filtrarLeitura(analogRead(LDRSupEsq), leituraAnteriorSupEsq);
50   int SupDir = filtrarLeitura(analogRead(LDRSupDir), leituraAnteriorSupDir);
51   int InfEsq = filtrarLeitura(analogRead(LDRInfEsq), leituraAnteriorInfEsq);
52   int InfDir = filtrarLeitura(analogRead(LDRInfDir), leituraAnteriorInfDir);
53
54   //cálculo para identificação dos valores das tensões
55   float voltage1 = (analogRead(SensorTesao_1)) * (VoltageReference / 1023.0);
56   float voltage2 = (analogRead(SensorTesao_2)) * (VoltageReference / 1023.0);
57
58   //cálculo para identificação dos valores das correntes
59   float current1 = voltage1 / Resistor;
60   float current2 = voltage2 / Resistor;

```

Fonte: Autoria própria, 2024.

Ainda dentro do loop foi montado o trecho exibido na figura 46 para visualização dos valores obtidos das tensões e das correntes por meio do monitor serial, a função “*Serial.print*” é a responsável por garantir a exibição desses valores no monitor. Além disso os valores são exibidos com base na constante de intervalo definida no início do código, ou seja, a cada 600000 milissegundos (10min) são apresentados novos valores de tensão e corrente.

Figura 46: Loop parte II



```

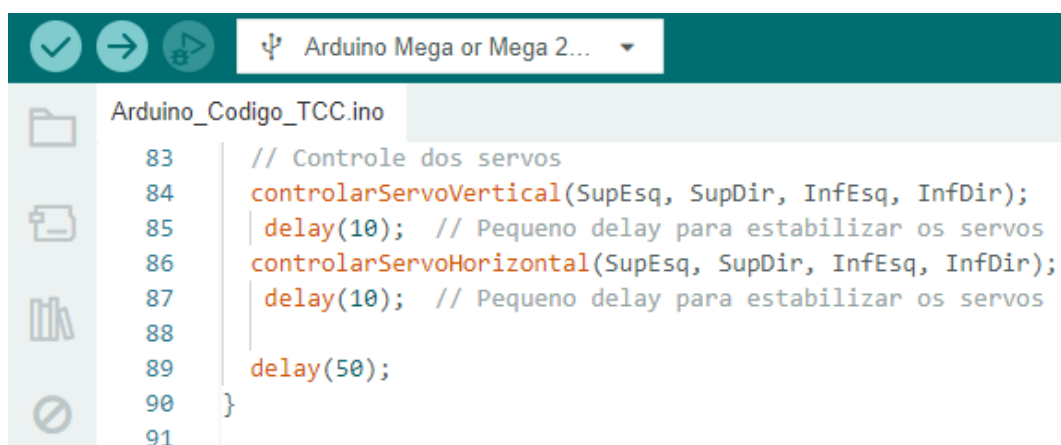
62 // Se passou o intervalo de exibição, mostrar os valores
63 if (millis() - lastDisplayTime >= displayInterval) {
64   Serial.println("Valores de Corrente e Tensão:");
65   Serial.print("Corrente 1: ");
66   Serial.print(current1, 6); // Mostrar 4 casas decimais para maior precisão
67   Serial.println(" A");
68   Serial.print("Corrente 2: ");
69   Serial.print(current2, 6);
70   Serial.println(" A");
71   Serial.print("Tensão 1: ");
72   Serial.print(voltage1, 2); // Mostrar 2 casas decimais para maior precisão
73   Serial.println(" V");
74   Serial.print("Tensão 2: ");
75   Serial.print(voltage2, 2);
76   Serial.println(" V");
77   Serial.println();
78
79   // Atualizar o último tempo de exibição
80   lastDisplayTime = millis();
81 }

```

Fonte: Autoria própria, 2024.

Para finalizar o loop foi adicionado um *delay* de 10 milissegundos para evitar que os micros servos movam-se de maneira brusca mesmo com a leitura filtrada dos LDR's. Esse trecho do código exibido na figura 47 garante movimentos mais suaves e uma melhor estabilidade dos servos motores.

Figura 47: Loop parte III



```
83 // Controle dos servos
84 controlarServoVertical(SupEsq, SupDir, InfEsq, InfDir);
85 delay(10); // Pequeno delay para estabilizar os servos
86 controlarServoHorizontal(SupEsq, SupDir, InfEsq, InfDir);
87 delay(10); // Pequeno delay para estabilizar os servos
88
89 delay(50);
90 }
91
```

Fonte: Autoria própria, 2024.

Fora do *loop* foi criado a lógica de movimentação dos servos como mostra a figura 48. Essa parte da programação consiste em fazer a média entre a leitura dos LDR's e compará-las, após obter o resultado do cálculo, o servo deverá movimentar-se na direção em que a média de luz foi maior, para que a célula seja exposta a maior intensidade de luz. E por fim foi criado uma função de “filtrar leitura”, que por sua vez consiste em um cálculo que garante que as informações enviadas pelos LDR's sejam mais “claras”, ou seja, com o mínimo de ruído ou interferência possível para que as respostas enviadas para os servos sejam precisas, garantindo o posicionamento correto deles.

Figura 48: Lógica de controle dos micros servos

```

92 // Função de controle dos servos
93 void controlarServoVertical(int SupEsq, int SupDir, int InfEsq, int InfDir) {
94     if ((SupEsq + SupDir) / 2 > (InfEsq + InfDir) / 2) {
95         servoV = constrain(servoV + 1, servoVLimitLow, servoVLimitHigh);
96     } else if ((SupEsq + SupDir) / 2 < (InfEsq + InfDir) / 2) {
97         servoV = constrain(servoV - 1, servoVLimitLow, servoVLimitHigh);
98     }
99     servoVerti.write(servoV);
100 }
101
102 void controlarServoHorizontal(int SupEsq, int SupDir, int InfEsq, int InfDir) {
103     if ((SupEsq + InfEsq) / 2 > (SupDir + InfDir) / 2) {
104         servoH = constrain(servoH - 1, servoHLimitLow, servoHLimitHigh);
105     } else if ((SupEsq + InfEsq) / 2 < (SupDir + InfDir) / 2) {
106         servoH = constrain(servoH + 1, servoHLimitLow, servoHLimitHigh);
107     }
108     servoHoriz.write(servoH);
109 }
110
111 int filtrarLeitura(int leituraAtual, int &leituraAnterior) {
112     const float fatorFiltragem = 0.1;
113     int leituraFiltrada = (1.0 - fatorFiltragem) * leituraAnterior + fatorFiltragem * leituraAtual;
114     leituraAnterior = leituraFiltrada;
115     return leituraFiltrada;
116 }

```

Fonte: Autoria própria, 2024.

Ao finalizar a montagem do sistema físico e a escrita do código foram realizados testes nos dias 22 de março de 2024 e 24 de março de 2024, estes consistiram em expor ambas as células fotovoltaicas ao sol durante um período de 4 horas e 10 minutos. A princípio ambas as células foram posicionadas de forma a ficar direcionadas para o norte geográfico, para que estas pudessem adquirir a maior incidência de luz solar, contudo, para a célula que faz a rotação isso não faz diferença, afinal seu posicionamento mudou de forma a ficar posicionada de frente para o sol.

Com o tempo de duração da análise diária, e devido ao fato do arduino ter sido programado para captar a tensão e a corrente fornecida pela célula a cada 10 minutos, obteve-se então um total de 25 valores para cada corrente e cada tensão por dia de análise. Esses valores foram aplicados em gráficos que serão apresentados no próximo capítulo a fim de comparar o desempenho de cada célula fotovoltaica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com as análises da produção de energia elétrica de cada célula em forma de gráficos para facilitar a visualização do desempenho de cada célula ao decorrer da movimentação do sol durante o tempo de teste. Como citado anteriormente, os testes foram realizados nos dias 22 e 24 de março de 2024. Cada dia teve um nível de incidência solar diferente, devido ao período chuvoso na região, contudo não houve chuva durante os horários de análises, mas haviam nuvens que em determinados momentos cobriram o sol impedindo o desenvolvimento máximo das células fotovoltaicas.

4.1. PRIMEIRO DIA DE ANÁLISE

O processo de coleta de dados iniciou-se às 10h05min do dia 22 de março de 2024, mas como o arduino estava programado para exibir valores a cada 10min o primeiro valor de tensão e corrente de cada célula foi mostrado às 10h15min, o próximo valor mostrado 10min após as 10h15min e assim sucessivamente. A tabela 2 apresenta os valores das tensões de cada célula fotovoltaicas obtidas no primeiro dia de análise, ressaltando que a tensão 01 representa a tensão fornecida pela célula que move-se e a tensão 02 é a da célula fixa. Nessa tabela também encontram-se os valores das correntes calculadas por meio da equação (6). Com os valores de tensão medidos foi possível plotar o gráfico 3 que apresenta a curva de tensão para ambas as células

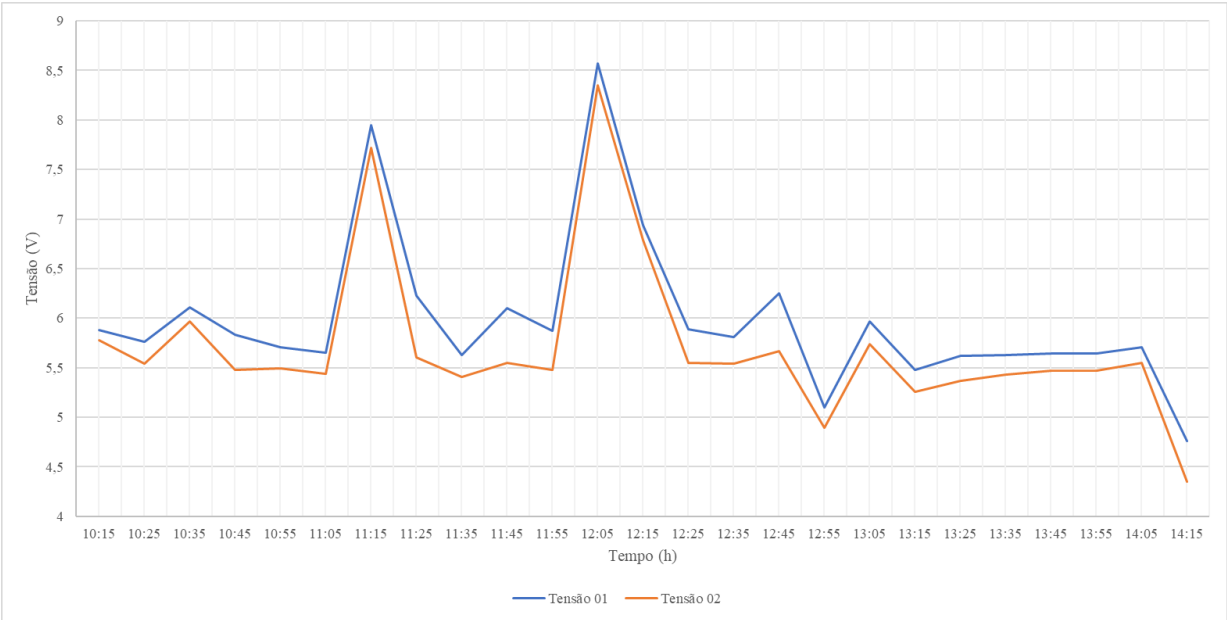
Tabela 2: Tensões e correntes do dia 22 de março de 2024

Tempo (h)	Tensão 01 (V)	Tensão 02 (V)	Corrente 01 (mA)	Corrente 02 (mA)
10:15	5,88	5,78	6,087	5,983
10:25	5,76	5,54	5,963	5,735
10:35	6,11	5,97	6,325	6,180
10:45	5,83	5,48	6,035	5,673
10:55	5,71	5,49	5,911	5,683
11:05	5,65	5,44	5,849	5,631
11:15	7,95	7,72	8,230	7,992
11:25	6,23	5,6	6,449	5,797
11:35	5,63	5,41	5,828	5,600
11:45	6,1	5,55	6,315	5,745
11:55	5,87	5,48	6,077	5,673
12:05	8,57	8,35	8,872	8,644
12:15	6,94	6,79	7,184	7,029
12:25	5,89	5,55	6,097	5,745
12:35	5,81	5,54	6,014	5,735

12:45	6,25	5,67	6,470	5,870
12:55	5,1	4,89	5,280	5,062
13:05	5,97	5,74	6,180	5,942
13:15	5,48	5,26	5,673	5,445
13:25	5,62	5,37	5,818	5,559
13:35	5,63	5,43	5,828	5,621
13:45	5,64	5,47	5,839	5,663
13:55	5,64	5,47	5,839	5,663
14:05	5,71	5,55	5,911	5,745
14:15	4,76	4,35	4,928	4,503

Fonte: autoria própria, 2024.

Gráfico 3: Curva das tensões 01 x 02 do dia 22 de março de 2024



Fonte: autoria própria, 2024.

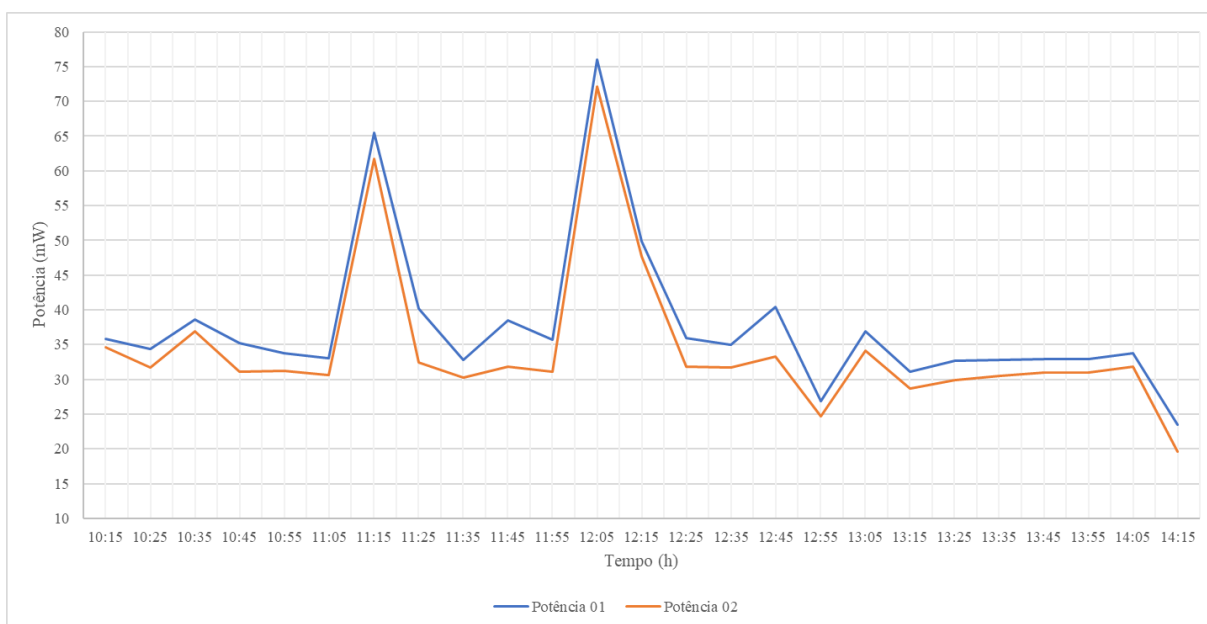
Observando o gráfico é possível perceber que ocorreram variações bruscas no que diz respeito a incidência de luz solar sobre as células gerando grandes mudanças no comportamento da curva de tensão. Contudo, o valor obtido as 12h05min destaca-se dos de mais, pois nesse momento não havia nuvens impedindo que as ondas eletromagnéticas emitidas pelo sol atingissem diretamente as células. Ainda assim, nenhuma das células foi capaz de atingir seu valor nominal de 12V indicada pelo fabricante, tendo como ponto máximo a tensão de 8,57V da célula 01 e 8,35V da célula 02. Os valores nesse caso foram bem próximos devido ao fato de que nesse momento ambas as células encontravam-se alinhadas perpendicularmente com o sol.

Com os valores de tensão e corrente adquiridos, foi possível calcular a potência fornecida por cada célula em cada instante de tempo analisado por meio da equação da equação $P = VI$. Efetuando os cálculos foram encontrados os valores apresentados na tabela 3 e estes foram usados para gerar as curvas do gráfico 4 que refere-se as curvas de potência das células.

Tabela 3: Potências do dia 22 de março de 2024

Tempo (h)	Potência 01 (mW)	Potência 02 (mW)
10:15	35,79130435	34,58426501
10:25	34,34534161	31,77184265
10:35	38,64606625	36,89534161
10:45	35,18519669	31,0873706
10:55	33,75165631	31,20093168
11:05	33,04606625	30,63519669
11:15	65,42701863	61,69606625
11:25	40,17898551	32,46376812
11:35	32,81252588	30,29824017
11:45	38,51966874	31,88664596
11:55	35,66966874	31,0873706
12:05	76,02991718	72,17650104
12:15	49,85879917	47,72681159
12:25	35,913147	31,88664596
12:35	34,9442029	31,77184265
12:45	40,4373706	33,28043478
12:55	26,92546584	24,75372671
13:05	36,89534161	34,10724638
13:15	31,0873706	28,64140787
13:25	32,69606625	29,85186335
13:35	32,81252588	30,52267081
13:45	32,92919255	30,97401656
13:55	32,92919255	30,97401656
14:05	33,75165631	31,88664596
14:15	23,45507246	19,58850932

Fonte: autoria própria, 2024.

Gráfico 4: Curva das potências 01 x 02 do dia 22 de março de 2024

Fonte: autoria própria, 2024.

Como é possível observar as potências obtidas no dia em questão foram bastante similares, pois ela nada mais é do que o produto da tensão e da corrente. Como já citado anteriormente devido o encobrimento do sol pelas nuvens nos momentos em que a célula deveria rotacionar em sua direção, ambas as células não estavam posicionadas perpendicularmente com a irradiação solar, fazendo com que seus valores fornecidos tornassem-se semelhantes. Entre os horários de 10h05min até as 11h05min a irradiação solar era bem baixa, mas às 11h15min parte das nuvens que encobriam a luz do sol dissiparam-se, fazendo com que as células aumentassem sua produção de energia. Logo em seguida a irradiação solar caiu novamente, obtendo valores mais altos somente às 12h05min onde também foi garantindo o ponto máximo de produção de energia elétrica das células, porém como as tensões nem as correntes atingiram seus valores máximos nominais a potência por ser um produto dessas duas grandezas também não atingiu o valor máximo informado pelo fabricante que seria de 1,5W. Logo em seguida o sol foi coberto pelas nuvens novamente, o que ocasionou em uma nova queda nos índices de produção de energia e posteriormente não houve nenhum valor consideravelmente elevado até o fim da análise do primeiro dia.

Por meio da potência pôde-se calcular a energia produzida por ambas as células ao decorrer do tempo, por meio da fórmula $E = P \cdot \Delta t$, realizando a multiplicação de cada potencia pela variação do tempo correspondente a ela, foi possível gerar do gráfico 5 que representa a curva de energia gerada pelas células no referido dia da análise.

Gráfico 5: Energia das células 01 e 02 do dia 22 de março de 2024



Fonte: autoria própria, 2024.

Realizando o somatório dos pontos de energia apresentados, obteve-se então a energia total produzida por cada célula.

$$E_{1T} = \sum E_{01}$$

$$E_{1T} = 1.958,114096 \text{ mW}$$

$$E_{2T} = \sum E_{02}$$

$$E_{2T} = 1.784,314113 \text{ mW}$$

E_{1T} representa a energia total produzida pela célula 01 e E_{2T} representa a energia total produzida pela célula 02 no dia 22 de março de 2024. Com esses valores adquiridos é possível calcular a energia que a célula 01 produziu a mais que a célula 02 através da diferença:

$$E_{1T} - E_{2T} = X$$

$$X = 1.958,114096 - 1.784,314113$$

$$X = 173,799983 \text{ mw}$$

X representa a energia que a célula 01 produziu a mais que a célula 02. Mostrando que mesmo com pequenas varrições de incidência solar, ainda obteve-se resultados positivos no desempenho da célula 01.

4.2. SEGUNDO DIA DE ANÁLISE

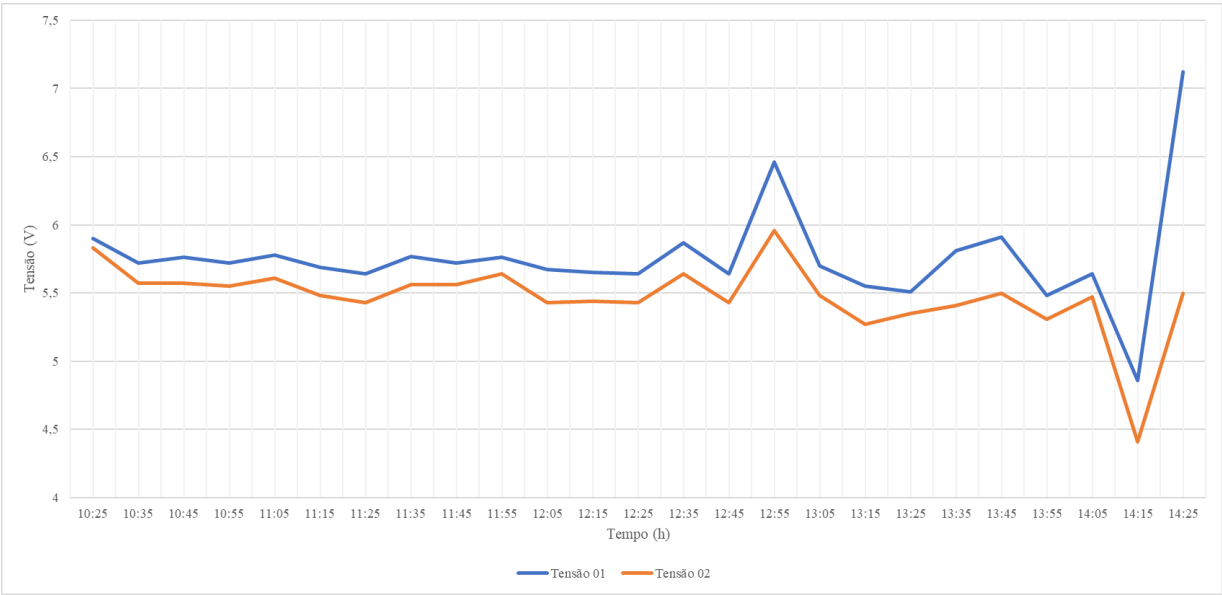
O segundo período de análise foi realizado no dia 24 de março de 2024, tendo início às 10h15min e seu término às 14h25min, a localização das células fotovoltaicas foram as mesmas, ou seja, permaneceram posicionadas na direção do norte geográfico. A princípio o dia havia começado ensolarado, mas com o passar do tempo foram formando nuvens de forma a ficar mais nublado que o dia de análises anterior, havendo melhorias na irradiância solar somente no período da tarde. A tabela 4 e o gráfico 6 apresentam os valores das tensões obtidas no referido dia, estas por sua vez tiveram mudanças mínimas e em alguns momentos até decréscimos entre o período de 10h25min às 12h35min.

Tabela 4: Tensões e correntes do dia 24 de março de 2024

Tempo (h)	Tensão 01 (V)	Tensão 02 (V)	Corrente 01 (mA)	Corrente 02 (mA)
10:25	5,9	5,83	6,108	6,035
10:35	5,72	5,57	5,921	5,766
10:45	5,76	5,57	5,963	5,766
10:55	5,72	5,55	5,921	5,745
11:05	5,78	5,61	5,983	5,807
11:15	5,69	5,48	5,890	5,673
11:25	5,64	5,43	5,839	5,621
11:35	5,77	5,56	5,973	5,756
11:45	5,72	5,56	5,921	5,756
11:55	5,76	5,64	5,963	5,839
12:05	5,67	5,43	5,870	5,621
12:15	5,65	5,44	5,849	5,631
12:25	5,64	5,43	5,839	5,621
12:35	5,87	5,64	6,077	5,839
12:45	5,64	5,43	5,839	5,621
12:55	6,46	5,96	6,687	6,170
13:05	5,7	5,48	5,901	5,673
13:15	5,55	5,27	5,745	5,455
13:25	5,51	5,35	5,704	5,538
13:35	5,81	5,41	6,014	5,600
13:45	5,91	5,5	6,118	5,694
13:55	5,48	5,31	5,673	5,497
14:05	5,64	5,47	5,839	5,663
14:15	4,86	4,41	5,031	4,565
14:25	7,12	5,5	7,371	5,694

Fonte: autoria própria, 2024.

Gráfico 6: Curva das tensões 01 x 02 do dia 24 de março de 2024



Fonte: autoria própria, 2024.

Devido à alta quantidade de nuvens nesse dia, os valores para tensões foram inferiores aos obtidos no primeiro dia, fazendo com que a tensão máxima obtida pela célula 01 fosse de 7,12V e este valor dessa vez não foi obtido nos horários próximos ao meio dia e sim no último momento de análise as 14h25min.

Com os valores das tensões e das correntes obtidos em cada intervalo de tempo, foi montada a tabela 5 com os valores da potência de cada célula e estes foram aplicados no gráfico 7 no qual é possível visualizar a curva da potência produzida pelas células no segundo dia de análise.

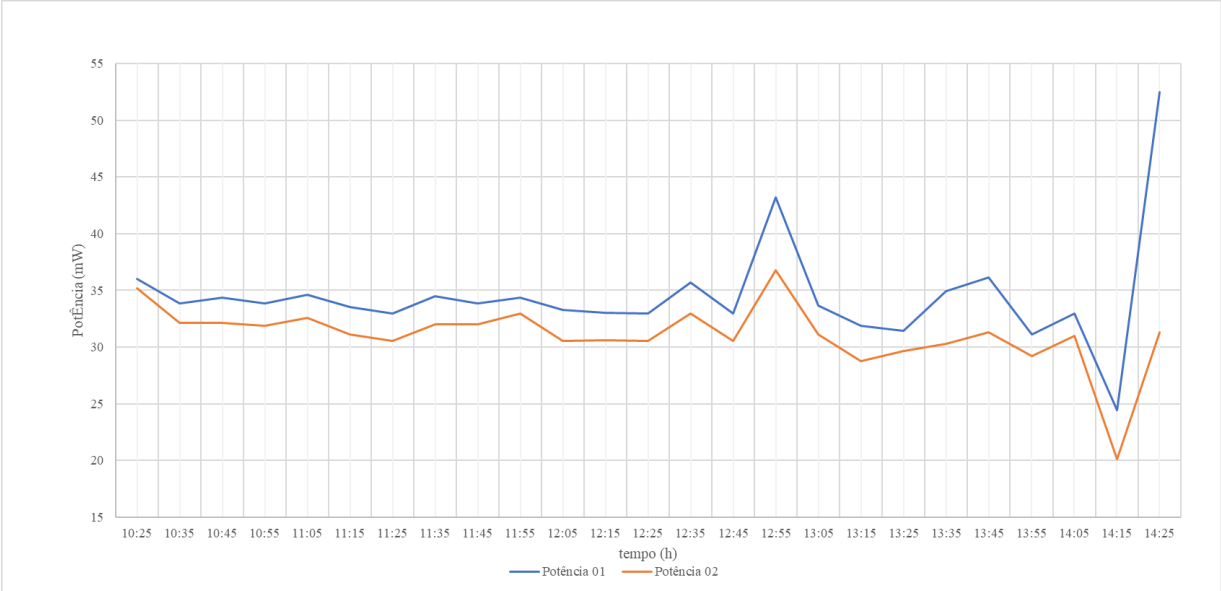
Tabela 5: Potências do dia 24 de março de 2024

Tempo (h)	Potência 01 (mW)	Potência 02 (mW)
10:25	36,035	35,185
10:35	33,870	32,117
10:45	34,345	32,117
10:55	33,870	31,887
11:05	34,584	32,580
11:15	33,516	31,087
11:25	32,929	30,523
11:35	34,465	32,002
11:45	33,870	32,002
11:55	34,345	32,929
12:05	33,280	30,523
12:15	33,046	30,635
12:25	32,929	30,523

12:35	35,670	32,929
12:45	32,929	30,523
12:55	43,200	36,772
13:05	33,634	31,087
13:15	31,887	28,750
13:25	31,429	29,630
13:35	34,944	30,298
13:45	36,157	31,315
13:55	31,087	29,189
14:05	32,929	30,974
14:15	24,451	20,133
14:25	52,479	31,315

Fonte: autoria própria, 2024.

Gráfico 7: Curva das potências 01 x 02 do dia 24 de março de 2024



Fonte: autoria própria, 2024.

Assim como a tensão, as potências das células apresentaram valores que sofreram mudanças pequenas nas primeiras 2h de análises, o que corresponde ao período de 10h25 às 12h25min. Esses pequenos valores são consequência da baixa intensidade de irradiação solar sobre os semicondutores, pois havia uma quantidade de nuvens densas encobrindo o sol. Nos minutos próximos as 13h obteve-se uma elevação na produção de energia pois nesse intervalo de tempo o sol não estava encoberto por uma nuvem tão densa, o que garantiu uma melhor incidência de luz sobre as células.

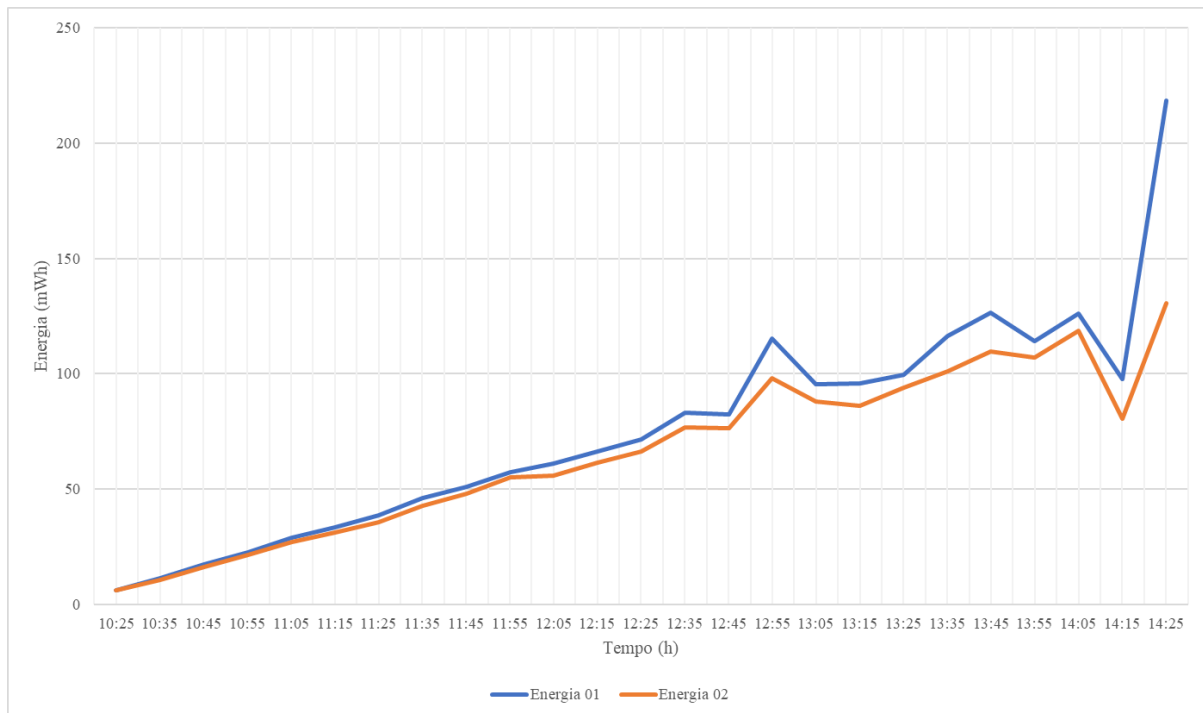
À medida que o sol movia-se em direção ao oeste, menos nuvens haviam para impedir sua irradiação sobre o local, fazendo com que a célula 01 rotacionasse em as direção garantindo uma exposição considerável a luz, enquanto a célula 02 encontrava-se perpendicular a uma

nuvem, e isso resultou na mudança final do gráfico onde houve a maior divergência entre os valores das potências das células.

Mesmo com esse valor de pico atingido pela célula 01 o valor obtido foi inferior ao valor de pico da análise anterior, isso devido a intensidade de luz do sol ser mais forte por volta do meio dia como foi o caso do valor máximo obtido na primeira análise, enquanto na segunda o valor máximo da potência obtida foi quase as 14h30min onde a intensidade da radiação não é tão forte se comparada com o meio dia, mesmo com a célula posicionada frente ao sol.

Novamente com os valores de potencias calculados foi possível identificar a energia produzida, como mostra o gráfico 8. Em seguida também obteve-se o valor da energia total produzida pelas células.

Gráfico 8: Energia das células 01 e 02 do dia 22 de março de 2024



Fonte: autoria própria, 2024.

$$E_{1T} = \sum E_{01}$$

$$E_{1T} = 1.881,199396 \text{ mW}$$

$$E_{2T} = \sum E_{02}$$

$$E_{2T} = 1.643,369548 \text{ mW}$$

Como fito na seção anterior, E_{1T} representa a energia total produzida pela célula 01 e E_{2T} representa a energia total produzida pela célula 02. Com esses valores adquiridos é possível calcular a energia que a célula 01 produziu a mais que a célula 02 através da diferença:

$$E_{1T} - E_{2T} = X$$

$$X = 1.881,199396 - 1.643,369548$$

$$X = 237,829848 \text{ mw}$$

X representa a energia que a célula 01 produziu a mais que a célula 02. Com isso é possível observar que a diferença de incidência solar garantiu uma divergência maior na produção de energia entre as células 01 e 02 em comparação com os resultados obtidos no dia 22 de março de 2024. O que prova que uma a incidência direta da irradiação solar na superfície de uma célula ou módulo fotovoltaico intensifica a produção da energia elétrica advinda desses dispositivos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentado demonstrou a montagem e o funcionamento de um rastreador solar com eixo duplo, controlado e supervisionado pelo arduino. Mesmo com os fatores climáticos que interferiram de forma a diminuir o desempenho das células fotovoltaicas, ainda obteve-se valores aceitáveis que confirmaram o desempenho adequado do rastreador.

A utilização do arduino como microcontrolador para o movimento e coleta de dados das células provou que o sistema é de fácil uso e garante uma análise de dados vastos e resultando em valores práticos e simples de serem compreendidos. A plataforma arduino também garante uma acessibilidade maior para a população por tratar-se um componente considerado barato em comparação aos de mais controladores eletrônicos.

O protótipo desenvolvido comprova a teoria de que uma maior intensidade de irradiação solar sobre a banda de condução de uma célula, módulo ou arranjo fotovoltaico resulta em uma maior produção de energia elétrica advinda desses semicondutores. Dessa forma a instalação de um rastreador solar residencial ou até mesmo em usinas fotovoltaicas garantiria uma otimização no desempenho dos painéis.

Partindo dessas observações, os conhecimentos apresentados nesse trabalho podem ser vistos como base para melhorias na produção de energia elétrica proveniente de células fotovoltaicas bem como a aplicação de seus conceitos em sala de aula ou laboratório visando garantir aos alunos um conhecimento mais aprofundado sobre energia solar, células fotovoltaicas, programação, sistemas de controle analógico/digital e automação, incentivando assim em futuras produções acadêmicas por parte dos mesmos.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Gabriel de Oliveira. **Rastreador solar controlado por arduino**. 2018. 99p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2018.
- Células solares de perovskita vieram para ficar. Inovação Tecnológica, 2013. Disponível em: < <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=celulas-solares-perovskitas&id=010115131023> >. Acesso em 22 de out. de 2023.
- Células solares flexíveis batem dois recordes de eficiência. Inovação Tecnológica, 2011. Disponível em: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=celulas-solares-flexiveis-recordes-eficiencia&id=010115111001>. Acesso em 22 de out. de 2023.
- CRESESB, 2006. **Energia solar Princípios e aplicações**. Rio de Janeiro, 28 p. Brasil. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB). Disponível em: < http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf >. Acesso em: 22 de out. de 2023.
- DOS ANJOS, Daniele Aparecida Pereira. **Obtenção de curva característica de placa solar fazendo uso de arduino**. 2019. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2019.
- FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral. **Energia solar fotovoltaica: Fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica**. Grupo de Energia Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- GASPARIN, Fabiano Perin. **Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos**. 2009. 71 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- GOETZE, Felipe. **Projeto de microgeração fotovoltaica residencial: estudo de caso**. 2017. 82 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energias renováveis: um futuro sustentável**. Revista USP, n. 72, p. 6–15, 2007.
- História do arduino e seus modelos. Arduino aprendizes, 2015. Disponível em: < <https://arduinoaprendizes.wordpress.com/2015/04/22/historiaarduino/> >. Acesso em 23 de out. de 2023.
- Kit gerador de energia solar. NeoSolar, [s.d.]. Disponível em: < <https://www.neosolar.com.br/loja/kit-gerador-energia-solar-hoymiles> >. Acesso em 22 de out. de 2023.
- MARQUES, Jemerson. Fotoresistor (LDR): O que é? Como Funciona? Características e Especificações. **FVM Learning**, 2023. Disponível em: < <https://www.fvml.com.br/2023/01/fotoresistor-LDR-datasheet.html> >. Acesso em 06 de mar. de 2024.
- MCROBERTS, M.; BÁSICO, A. tradução: Rafael zanolli. **Arduino Básico**. Editora Novatec. São Paulo, 2011.

Micro Servo Motor 9g SG90 180° 1.6Kgf.cm de Posição. **USINAINFO eletrônica e robotica**, [s.d.]. Disponível em: < <https://www.usinainfo.com.br/servo-motores/micro-servo-motor-9g-sg90-180-16kgfcm-de-posicao-2299.html> >. Acesso em 06 de mar. de 2024.

O que é o sensor de corrente ACS712 AC/DC. **USINAINFO eletrônica e robotica**, [s.d.]. Disponível em: < <https://www.usinainfo.com.br/blog/projeto-medindo-corrente-com-o-sensor-acs712-e-o-arduino/> >. Acesso em 06 de mar. de 2024.

OLIVEIRA, Euler. Como usar com Arduino – Sensor Medidor de Tensão DC 0-25V. Master Walker eletronic shop, [s.d.]. Disponível em: < <https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-sensor-medidor-de-tensao-dc-0-25v> >. Acesso em 06 de mar. de 2024.

Orientação e posicionamento de módulos fotovoltaicos. Curso solar fotovoltaico, 2021. Disponível em: < <http://www.sel.eesc.usp.br/cursosolar/> >. Acesso em: 24 de out. de 2023.

Passo a passo da fabricação do painel solar. Portal Solar, [s.d.]. Disponível em: < <https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html> >. Acesso em 22 de out. de 2023.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES, Rio de Janeiro, 2014.

SILVEIRA, J. A. d. Experimentos com o arduino: Monte seus próprios projetos com o arduino utilizando as linguagens c e processing. São Paulo. Editora Ensino Profissional, 2011.

SOUZA, Fábio. Arduino Mega 2560. **Embarcados**, 2014. Disponível em: < <https://embarcados.com.br/arduino-mega-2560/#Pinos-de-entradas-e-Saidas-da-placa-Arduino-MEGA-2560> >. Acesso em 06 de mar. de 2024.

SOUZA, Iuri Gustavo Cavalheiro. **Geração de energia elétrica fotovoltaica - análise de viabilidade técnica e econômica**: estudo de caso. 2021. 70 p. Trabalho de conclusão de curso - Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2021.

THOMSEN, Adilson. Qual Arduino Comprar? Conheça os Tipos de Arduino. **Maker Hero**, 2014. Disponível em: < <https://www.makerhero.com/blog/tipos-de-arduino-qual-comprar/> >. Acesso em: 23 de out. de 2023.

VALENTE, M. Â. S. **Caracterização automática de um painel fotovoltaico**. Dissertação de Mestrado — Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011.

ANEXO A – CÓDIGO DE FUNCIONAMENTO DO RASTREADOR SOLAR



```

1  #include <Servo.h>
2
3  //Definição dos Servos motores
4  Servo servoHoriz;
5  Servo servoVerti;
6
7  //Definição da angulação máxima e mínima dos servos
8  int servoH = 0;
9  int servoHLimitHigh = 180;
10 int servoHLimitLow = 0;
11
12 int servoV = 45;
13 int servoVLimitHigh = 150;
14 int servoVLimitLow = 30;
15
16 // Definições das entradas analógicas para os LDR's
17 int LDREsq = A1;
18 int LDRSupDir = A3;
19 int LDRInfEsq = A0;
20 int LDRInfDir = A2;
21
22 // Definições das entradas analógicas para os sensores de tensão
23 int SensorTesao_1 = A4;
24 int SensorTesao_2 = A6;
25
26 // Definição do valor do resistor ligado em série com a célula e o sensor
27 int Resistor = 966.0;
28
29 //Inserção de variáveis para filtrar leituras analógicas e minimizar ruídos
30 int leituraAnteriorSupEsq = 0;
31 int leituraAnteriorSupDir = 0;
32 int leituraAnteriorInfEsq = 0;
33 int leituraAnteriorInfDir = 0;
34
35 unsigned long lastDisplayTime = 0;
36 const long displayInterval = 600000; // Intervalo de exibição em milissegundos (10 minutos)
37
38 float VoltageReference = 12.0; // Tensão de referência em volts
39
40 void setup() {
41   Serial.begin(9600);
42   servoHoriz.attach(23); //Conexão do servo horizontal a saída digital 23
43   servoVerti.attach(22); //Conexão do servo vertical a saída digital 22
44   servoHoriz.write(servoH);
45   servoVerti.write(servoV);
46   delay(500);
47 }
48 void loop() {
49   int SupEsq = filtrarLeitura(analogRead(LDREsq), leituraAnteriorSupEsq);
50   int SupDir = filtrarLeitura(analogRead(LDRSupDir), leituraAnteriorSupDir);
51   int InfEsq = filtrarLeitura(analogRead(LDRInfEsq), leituraAnteriorInfEsq);
52   int InfDir = filtrarLeitura(analogRead(LDRInfDir), leituraAnteriorInfDir);
53
54   //cálculo para identificação dos valores das tensões
55   float voltage1 = (analogRead(SensorTesao_1)) * (VoltageReference / 1023.0);
56   float voltage2 = (analogRead(SensorTesao_2)) * (VoltageReference / 1023.0);

```

```

58 //cálculo para identificação dos valores das correntes
59 float current1 = voltage1 / Resistor;
60 float current2 = voltage2 / Resistor;
61
62 // Se passou o intervalo de exibição, mostrar os valores
63 if (millis() - lastDisplayTime >= displayInterval) {
64     Serial.println("Valores de Corrente e Tensão:");
65     Serial.print("Corrente 1: ");
66     Serial.print(current1, 6); // Mostrar 4 casas decimais para maior precisão
67     Serial.println(" A");
68     Serial.print("Corrente 2: ");
69     Serial.print(current2, 6);
70     Serial.println(" A");
71     Serial.print("Tensão 1: ");
72     Serial.print(voltage1, 2); // Mostrar 2 casas decimais para maior precisão
73     Serial.println(" V");
74     Serial.print("Tensão 2: ");
75     Serial.print(voltage2, 2);
76     Serial.println(" V");
77     Serial.println();
78
79     // Atualizar o último tempo de exibição
80     lastDisplayTime = millis();
81 }
82
83 // Controle dos servos
84 controlarServoVertical(SupEsq, SupDir, InfEsq, InfDir);
85 delay(10); // Pequeno delay para estabilizar os servos
86 controlarServoHorizontal(SupEsq, SupDir, InfEsq, InfDir);
87 delay(10); // Pequeno delay para estabilizar os servos
88
89 delay(50);
90 }
91
92 // Função de controle dos servos
93 void controlarServoVertical(int SupEsq, int SupDir, int InfEsq, int InfDir) {
94     if ((SupEsq + SupDir) / 2 > (InfEsq + InfDir) / 2) {
95         servoV = constrain(servoV + 1, servoVLimitLow, servoVLimitHigh);
96     } else if ((SupEsq + SupDir) / 2 < (InfEsq + InfDir) / 2) {
97         servoV = constrain(servoV - 1, servoVLimitLow, servoVLimitHigh);
98     }
99     servoVerti.write(servoV);
100 }
101
102 void controlarServoHorizontal(int SupEsq, int SupDir, int InfEsq, int InfDir) {
103     if ((SupEsq + InfEsq) / 2 > (SupDir + InfDir) / 2) {
104         servoH = constrain(servoH - 1, servoHLimitLow, servoHLimitHigh);
105     } else if ((SupEsq + InfEsq) / 2 < (SupDir + InfDir) / 2) {
106         servoH = constrain(servoH + 1, servoHLimitLow, servoHLimitHigh);
107     }
108     servoHoriz.write(servoH);
109 }
110
111 int filtrarLeitura(int leituraAtual, int &leituraAnterior) {
112     const float fatorFiltragem = 0.1;
113     int leituraFiltrada = (1.0 - fatorFiltragem) * leituraAnterior + fatorFiltragem * leituraAtual;
114     leituraAnterior = leituraFiltrada;
115     return leituraFiltrada;
116 }

```

Fonte: Autoria própria, 2024.