



UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CERRO LARGO
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

CRISTIANO RAUBER PAULI

**ESTUDO E COMPARAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA PARA SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO
ESPELHOS E RASTREADOR SOLAR**

CERRO LARGO

2021

CRISTIANO RAUBER PAULI

**ESTUDO E COMPARAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA PARA SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO
ESPELHOS E RASTREADOR SOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação da Universidade Federal da Fronteira Sul, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix

CERRO LARGO

2021

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Pauli, Cristiano Rauber

Estudo e comparação do potencial de geração de energia elétrica para sistemas solares fotovoltaicos utilizando espelhos e rastreador solar / Cristiano Rauber Pauli. -- 2019.

70 f.

Orientador: Pós-doutor em Matemática Aplicada Jorge Luis Palacios Felix.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Cerro Largo, RS , 2019.

1. Energias Renováveis. 2. Energia solar fotovoltaica. 3. Rastreador Solar. 4. Espelho solar.
5. Arduino. I. Felix, Jorge Luis Palacios, orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

CRISTIANO RAUBER PAULI

**ESTUDO E COMPARAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA PARA SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO
ESPELHOS E RASTREADOR SOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação da Universidade Federal da Fronteira Sul, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi defendido e aprovado em 15 /10 /2021

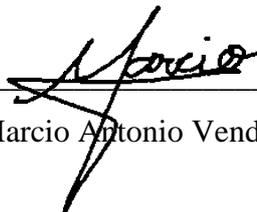
BANCA EXAMINADORA



Prof. Jorge Luis Palacios Felix



Prof. Thiago de Cacio Luchese



Prof. Marcio Antonio Vendruscolo

Dedicatória

Dedico este trabalho a família e amigos, em especial ao meu pequeno Enzo Gabriel.

AGRADECIMENTOS

Durante esta jornada acadêmica conheci vários colegas que se tornaram amigos de fato. Aquele que entrou junto comigo lá no primeiro semestre, Valdemir Fonseca Ramos, que permanecerá sempre na lembrança, por toda ajuda durante o tempo que convivíamos em sala, pelas risadas, e acima de tudo pelo auxílio quando precisei ficar afastado da sala de aula em função do acidente de moto do qual me fez permanecer 4 semestres afastados da universidade. A todos que participaram da minha volta e se solidarizam comigo.

Ao colega e amigo Dione Goertz, por toda parceria durante este tempo de vida acadêmica, as horas de estudo e descontração vividas dentro e fora da universidade.

Ao amigo Marlon Bialas, que conheci mais pro final, mas que sempre levarei na recordação.

Às colegas Thaís e Julia (sem acento hehe) que me concederam o prazer do trabalho conjunto em seus projetos.

Ao professor Jorge Felix, pela oportunidade da participação como voluntário nos referidos projetos das colegas e pela orientação neste TCC.

Aos coordenadores Bruno e Alcione, que sempre atenderam e tentaram solucionar prontamente as necessidades que surgiram durante esta jornada.

E por fim, e não menos importante, à minha família, que possibilitou que tudo isto acontecesse.

RESUMO

A otimização do aproveitamento dos painéis fotovoltaicos é tema pertinente em pesquisas científicas. Uma das formas mais simples para aumentar o aproveitamento da luz solar disponível consiste na instalação dos painéis em ângulos ideais para as mais diversas latitudes em todo o globo terrestre. A presente pesquisa buscou melhorar a eficiência de geração de energia dos painéis solares fotovoltaicos utilizando dois mecanismos. Um deles fez uso de um microcontrolador Arduino para alcançar um eficiente sistema de rastreamento solar, tanto no eixo axial quanto no eixo azimutal. O rastreamento é responsável por acompanhar a posição do Sol durante o decorrer do dia, o que aumenta o aproveitamento da energia disponível. Já o outro contou com espelho fixado a uma estrutura ao lado de um painel fotovoltaico fixo, os espelhos aumentam o tempo de incidência direta da luz solar sobre os painéis. Um terceiro painel encontrou-se ainda diretamente exposto à luz solar, a fim de possibilitar uma comparação entre os mecanismos. Para os resultados obteve-se um ganho de 36% do painel com rastreador em relação ao terceiro, chamado de branco, utilizado somente para fins de comparação. Já para o painel que fez uso do espelho obtivemos uma elevação de apenas 0,6%.

Palavras Chave: Rastreamento solar, Painéis Fotovoltaicos, Otimização de energia solar.

ABSTRACT

The optimization of the use of photovoltaic panels is a relevant topic in scientific research. One of the simplest ways to increase the use of available sunlight is to install the panels at ideal angles for the most diverse latitudes across the globe. This research sought to improve the energy generation efficiency of photovoltaic solar panels using two mechanisms. One of them made use of an Arduino microcontroller to achieve an efficient solar tracking system, both in the axial axis and in the azimuth axis. Tracking is responsible for following the position of the sun in the sky during the course of the day, which increases the use of available energy. Another one had a mirror fixed to a structure next to a fixed photovoltaic panel, the mirrors increase the time of direct sunlight on the panels. A third panel was also directly exposed to sunlight, in order to allow a comparison between the mechanisms. For the results, a gain of 36% was obtained for the panel with a tracker in relation to the third one, called the white one, used only for comparison purposes. As for the panel that made use of the mirror, we obtained an increase of only 0.6%.

Keyword: Solar tracking, Photovoltaic panels, Solar energy optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parte renovável estimada do consumo total final de energia, 2017.....	18
Figura 2 - Projetos em curso ou operação no Brasil.....	19
Figura 3 – A Célula Fotovoltaica.	21
Figura 4 - Componentes de uma curva característica de potência para um PV.	23
Figura 5 - Sistema de geração de Energia Solar por PV <i>off-grid</i>	26
Figura 6 -Sistema de geração de Energia Solar por PV <i>on-grid</i>	27
Figura 7. Influência da temperatura na curva i-V (para irradiação de $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^2$, espectro AM=1,5).	28
Figura 8. Esquema dos fatores que limitam a eficiência de conversão de uma célula solar. ...	29
Figura 9 - Tipos de radiação solar.	30
Figura 10 - Área aparente de absorção solar em função do ângulo de incidência.	30
Figura 11 - Módulo com estrutura de rastreamento de dois eixos.....	32
Figura 12 - Estrutura com espelhos.	33
Figura 13 - Fluxograma do trabalho desenvolvido.....	34
Figura 14 - Rastreador Solar Arduino Solis.	35
Figura 15 - Tipos de agrupamento de sensores LDR em um seguidor de dois eixos.....	35
Figura 16 - Esquema do Arduino Uno R3.....	36
Figura 17 - Micro servo motor SG90.	37
Figura 18 - Trecho do código responsável pela leitura das resistências dos LDR's.	38
Figura 19 - Trecho do código responsável pelo movimento do servo vertical.....	38
Figura 20 - Fluxograma simplificado de funcionamento do rastreador.	39
Figura 21 - Esquema de ligação do rastreador.	39

Figura 22 - Representação dos tipos de reflexão.....	40
Figura 23 - Leis da reflexão.....	40
Figura 24 - Representação dos esquemas de instalação estudados.	41
Figura 25 - Representação dos ângulos e área sombreada para o primeiro arranjo.	42
Figura 26 – Representação do ângulo da distância zenital.....	43
Figura 27 – Ângulo entre o painel e o espelho.....	43
Figura 28 - Arranjo da estrutura utilizada nas medições.....	44
Figura 29. Circuito para curva de potência.....	45
Figura 30. Equipamentos utilizados para a construção da curva característica.....	45
Figura 31. Caminho preferencial da corrente.....	47
Figura 32 - Dispositivo para medição de tensão e corrente.....	47
Figura 33 - Curva de potência para o PV usado no branco.....	50
Figura 34 - Curva de potência para o PV usado no espelho.....	50
Figura 35 - Curva de potência para o PV usado no rastreador.....	51
Figura 36 - Gráfico de potência versus hora para o dia 12/04.....	53
Figura 37- Gráfico para as potências do dia 04/10.....	53
Figura 38 – Gráfico para as potências do dia 05/10.....	54

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

UFFS Universidade Federal da Fronteira Sul

PV Painel Fotovoltaico

STC Standard Test Conditions

MPP Ponto de máxima potência

Ddp Diferença de potencial

SMD Surface Mounted Device

MDF Medium Density Fiberboard

CRESEB Centro de Referência para Energia Solar e Eólica

Lista de símbolos

A	Área (m^2)
C1	Chave 1 do dispositivo de medição
C2	Chave 2 do dispositivo de medição
FF	Fator de forma
G	Irradiância solar incidente (W/m^2)
i	Corrente (A)
i-v	Tensão versus corrente
I_{SC}	Corrente de curto-circuito
I_{MP}	Corrente de máxima potência
M_{PCL}	Média das leituras para placa com lente de Fresnel
M_{PSL}	Média das leituras para placa sem lente de Fresnel
P	Potência (W)
P_{mp}	Potência de pico
P-V	Tensão versus potência
P_{PCL}	Potência da placa com lente de Fresnel
P_{PSL}	Potência da placa sem lente de Fresnel
V	Tensão (V)
V_{MP}	Tensão de máxima potência
V_{OC}	Tensão de circuito aberto
η	Eficiência (%)
Ω	Resistência elétrica (Ohms)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO GERAL	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	A ENERGIA SOLAR fotovoltaica NO MUNDO	17
2.2	A ENERGIA SOLAR fotovoltaica NO BRASIL	18
2.3	PRÓS E CONTRAS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	20
2.4	A CÉLULA FOTOVOLTAICA	20
2.4.1.	Efeito fotoelétrico	20
2.4.2.	Células solares de Silício cristalino	22
2.4.2.1.	Silício monocristalino (m-Si)	22
2.4.2.2.	Silício multicristalino (p-Si)	23
2.4.3.	Curva característica	23
2.5	SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS	25
2.5.1.	Sistemas <i>off-grid</i>	25
2.5.2.	Sistemas <i>on-grid</i>	26
2.6	EFICIÊNCIA DOS PAINÉIS	27
2.7	FATORES EXTERNOS	28
2.8	TIPOS DE RADIAÇÃO	29
2.9	AUMENTANDO A EFICIÊNCIA DOS PAINÉIS SOLARES	30
2.9.1.	Uso de rastreadores solares	31

2.9.2.	Rastreadores de dois eixos	31
2.9.3.	Uso de espelhos	32
3	METODOLOGIA	34
3.1	RASTREADOR BI-AXIAL	34
3.1.1.	Unidade de sensoriamento por <i>LDR</i>	35
3.1.2.	Placa Uno R3	36
3.1.3.	Servomotores	36
3.1.4.	Código de programação	37
3.1.5.	Esquema da ligação elétrica	39
3.2	ESPELHOS	39
3.2.1.	Reflexão da luz	40
3.2.2.	Escolha da orientação dos espelhos	41
3.2.2.1.	Inclinação Solar	42
3.3	ARRANJO E POSICIONAMENTO DOS PV'S	44
3.4	CONSTRUÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA	44
3.5	DADOS PARA AS POTÊNCIAS DOS PV'S.	46
3.6	DISPOSITIVO PARA REALIZAÇÃO DAS LEITURAS	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	CURVA CARACTERÍSTICA	49
4.2	EFICIÊNCIA DOS PV'S	51
4.3	POTÊNCIA DOS PV'S	52
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56

	14
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
ANEXO A – PROGRAMAÇÃO DO RASTREADOR SOLAR/ARDUINO	62
ANEXO B – GRÁFICOS PARA A RADIAÇÃO DOS DIAS DE MEDIÇÃO.	65
ANEXO C – TABELAS COM AS LEITURAS DOS DIAS DE MEDIÇÃO	66
ANEXO D – TABELAS DOS VALORES LIDOS PARA AS CURVAS CARACTERÍSTICAS.	69

1 INTRODUÇÃO

Com a crise de energia na década de 70, percebeu-se a dependência por combustíveis fósseis, estimulando-se a necessidade da busca por fontes alternativas. A partir de então, estudos foram direcionados para o aproveitamento de outras fontes de energia, como, por exemplo, a energia solar, a qual vem apresentando-se como uma fonte alternativa de energia viável técnica e economicamente. (PEREIRA *et all*, 2008)

Nos últimos anos, pode ser observado um crescente interesse na conversão de energia solar em eletricidade feita por meio dos painéis fotovoltaicos. Apesar de ser uma das formas mais caras de obtenção de energia elétrica, a sua utilização pode ser economicamente vantajosa com o passar dos anos. Na atualidade, fatores como o aumento da demanda energética, a possibilidade de redução da oferta de combustíveis convencionais e a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente evidenciaram a relevância dessa informação, impulsionando a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico para a utilização de fontes alternativas de energia renováveis e que produzam pouco impacto ao meio ambiente. (MARTINS; PEREIRA, 2011)

O Brasil é um dos países que possui um expressivo potencial para a geração de eletricidade a partir da fonte solar, e esse potencial pode proporcionar diversos benefícios, tanto do ponto de vista elétrico, como ambiental e socioeconômico, viabilizando o desenvolvimento de regiões remotas, a redução da conta de energia elétrica e a diminuição da dependência do petróleo e seus derivados para geração de eletricidade. Mas apesar dos inúmeros benefícios atrelados ao sistema fotovoltaico, estudos relacionados ao aprimoramento de sua eficiência energética são de suma importância, para o melhor aproveitamento e expansão do uso deste sistema de geração de energia, principalmente no Brasil. (MARTINS *et al*, 2004)

Segundo o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB) um dos aproveitamentos da energia solar é obtido através do efeito fotovoltaico que consiste na conversão direta da radiação solar em eletricidade. A geração de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos acontece através de células fotovoltaicas compostas por materiais semicondutores, que na presença de calor sofrem um aumento de condutividade possibilitando a saída de elétrons do sistema. A superfície destes painéis recebe diferentes intensidades de radiação conforme o ângulo que está instalado, a hora do dia e a época do ano, fato que influencia diretamente no processo de conversão da energia. (SWART, 2011).

1.1 OBJETIVO GERAL

No presente estudo desenvolveu-se uma comparação entre três sistemas diferentes de geração de energia elétrica fotovoltaica. A comparação entre os três possibilita uma boa análise no que se refere as maneiras mais eficientes de aproveitamento da energia fotovoltaica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como parte do desenvolvimento deste trabalho buscou-se:

- A divulgação de alguns recursos associados a otimização da eficiência para painéis solares fotovoltaicos;
- A construção de uma estrutura para alojamento dos painéis que facilitasse o transporte, o alcance dos ângulos e ligações elétricas necessárias;
- A verificação do correto funcionamento do rastreador solar;
- A redução do tempo necessário para a aquisição dos valores de tensão e corrente, visto que esta ocorreu de forma manual.
- A investigação das eficiências de cada PV afim de validar a comparação do aumento de geração.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para auxílio na melhor compreensão dos principais mecanismos presentes em um sistema de geração de energia fotovoltaica, bem como para melhorar o desenvolvimento da pesquisa e interpretação dos resultados obtidos buscou-se na literatura disponível o conhecimento capaz de possibilitar tal trabalho.

2.1 A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO MUNDO

A energia solar é caracterizada como a energia que o Sol emite em forma de ondas eletromagnéticas para o espaço. Todos os planetas do Sistema Solar recebem estas ondas que são fonte para vários processos físicos e químicos que ocorrem em suas superfícies. No nosso planeta, os raios solares são responsáveis por desencadear, por exemplo, a evaporação da água, o movimento das massas de ar e o desenvolvimento da vida. Desta forma, a energia produzida pelo Sol pode ser considerada como a responsável por várias outras fontes de energia utilizadas pelo planeta ou pelo próprio homem. (PINHO; GALDINO, 2014)

Além dos vários impactos causados ao meio ambiente pelas fontes de combustíveis fósseis, estes estão se tornando cada vez mais escassos e, conseqüentemente, mais caros. Com isso as fontes de energia renováveis e limpas são alternativas que estão em alta, especialmente a solar, por se tratar da mais abundante fonte de energia natural. (SILVEIRA *et al*, 2013).

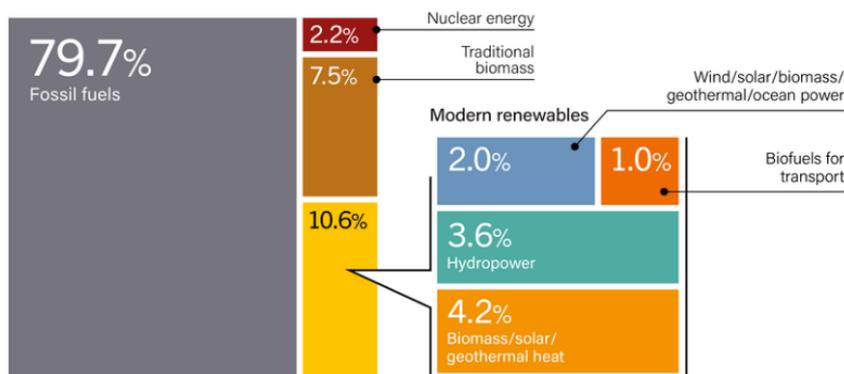
De acordo com a *Renewable Energy Policy Network*, o ano de 2018 teve um mercado relativamente estável para tecnologias de energia renovável, uma vez que a capacidade total de energia renovável cresceu em relação ao ano de 2017 e, com isso, o número de países que integram altas participações em energia renovável continuou a aumentar. O fornecimento de energias renováveis para empresas mais que dobrou, como pode-se observar na Figura 1, que apresenta a parte renovável estimada do consumo total final de energia, referente ao ano de 2017.

A energia renovável se torna cada vez mais competitiva, em termos de custo, em comparação com as usinas convencionais de combustível fóssil. Além disso, em alguns locais, era mais econômico construir novas usinas fotovoltaicas do que continuar a operar as usinas existentes de combustíveis fósseis. (REN21, 2019)

Em 2018, a demanda global de energia aumentou cerca de 2,3%, o maior aumento em uma década. Isso ocorreu devido ao forte crescimento econômico global (3,7%) e à maior demanda de aquecimento e refrigeração em algumas regiões. China, Estados Unidos e Índia, em conjunto, representam quase 70% do aumento total da demanda. Devido ao aumento do

consumo de combustíveis fósseis, as emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas à energia cresceram aproximadamente 1,7% durante o ano. (REN21, 2019)

Figura 1 - Parte renovável estimada do consumo total final de energia, 2017.



Fonte: REN21, 2019.

Quanto à geração de energia elétrica a partir dos raios solares, pode-se classificá-la de duas formas: fotovoltaica e heliotérmica. A heliotérmica faz utilização de espelhos e lentes para concentrar os raios solares em um ponto específico, aquecendo uma solução que gera vapor e aciona uma turbina. Já a fotovoltaica gera energia elétrica por meio de materiais semicondutores que apresentam o efeito fotovoltaico. (DANTAS e POMPERMAYER, 2018).

2.2 A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Foi no dia 17 de abril de 2012 que a possibilidade da autogeração de energia elétrica se tornou uma realidade. Isso graças a publicação da Resolução Normativa 482 da ANEEL, que definiu as regras do segmento de geração distribuída. Em 2015, a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 687, que acrescentou alguns benefícios aos microgeradores. Entre eles, a possibilidade de geração distribuída conjunta, isto é, a energia gerada pode ser repartida entre várias residências de acordo com seus interesses, desde que elas façam parte da mesma área de concessão. Além disso, a validade dos créditos de energia passou de 36 para 60 meses, a potência máxima de geração por unidade aumentou de 1 MW para 5 MW e o processo de adesão para conectar a geração distribuída à rede de distribuição foi simplificado.

Os termos micro e minigeradores se referem à tamanho da potência na autogeração de energia solar. De acordo com as normas da geração distribuída em vigor, os sistemas fotovoltaicos instalados diferem-se da seguinte maneira:

Microgeração: potência instalada menor ou igual a 75 kW (quilowatts).

Minigeração: potência instalada maior que 75 kW e menor ou igual a 5 MW (megawatts).

Porém, mesmo com o incentivo a esse tipo de geração, a participação da energia FV na matriz brasileira ainda é muito reduzida, totalizando apenas 1,68% da potência total de geração outorgada pela ANEEL, conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Potência outorgada pela ANEEL até 18/08/2020.

Tipo	Potência outorgada (KWh)	% da Pot. Outorgada
Central Geradora Hidrelétrica	809.378,07	0,46
Central Geradora Undi-elétrica	50,00	0
Central Geradora Eólica	15.960.603,86	9,14
Pequena Central Hidrelétrica	5.386.040,49	3,08
Central Geradora Fotovoltaica	2.942.341,25	1,68
Usina Hidrelétrica	102.999.428,00	58,96
Usina Termelétrica	44.617.483,29	25,54
Usina Termonuclear	1.990.000,00	1,14
TOTAL	174.705.324,96	100,00

Fonte: Adaptado de (SIGA, 2020).

O aproveitamento da energia solar para a geração fotovoltaica de energia elétrica é mais utilizado nas regiões Norte e Nordeste, em comunidades isoladas da rede de energia elétrica, como pode ser observado na Figura 2. Os projetos, em curso ou em operação, para o aproveitamento da energia solar, visam principalmente o desenvolvimento regional dessas comunidades (ANEEL, 2020).

Figura 2 - Projetos em curso ou operação no Brasil.



Fonte: Adaptado de (SIGA, 2020)

2.3 PRÓS E CONTRAS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Segundo o Portal Solar, a energia solar possui diversas vantagens, tais como: ser uma fonte de energia renovável, alternativa, limpa, sustentável e gratuita, além de ser silenciosa, possuir uma vida útil de mais de 25 anos e o retorno financeiro em até 10 anos, sua necessidade de manutenção mínima e de baixo custo e ser uma alternativa viável para regiões isoladas da rede elétrica.

As desvantagens são: não funcionar à noite em sistemas sem baterias, alto custo de instalação. Para evitar sobrecargas do gerador e riscos de comprometer a rede, em sistemas *on-grid* as próprias distribuidoras ou problemas técnicos na rede elétrica das mesmas podem causar interrupção da produção de energia solar por conta do sistema anti-ilhamento.

Outra restrição técnica à difusão de projetos de aproveitamento de energia solar é a baixa eficiência dos painéis solares, isso torna necessário o uso de grandes áreas para a geração de energia em quantidade suficiente para que o empreendimento se torne economicamente viável. Porém, se comparada com a energia hidráulica, por exemplo, que requer geralmente grandes áreas inundadas, essa limitação não é tão restritiva (ANEEL, 2020).

2.4 A CÉLULA FOTOVOLTAICA

O efeito fotovoltaico foi descoberto por Alexandre Edmond Becquerel em 1839, do fato de ter observado que ao iluminar uma solução ácida surgia uma diferença de potencial entre os eletrodos imersos nela. Efeito similar foi observado em um dispositivo de estado sólido fabricado com selênio, por W. G. Adams e R. E. Day 37 anos mais tarde. Foi desenvolvido em 1883 por C. E. Fritz, utilizando selênio, um dispositivo que pode ser caracterizado como a primeira célula solar ou fotovoltaica da história. Mais de 110 anos após a descoberta de Becquerel foram fabricados pelo laboratório Bell, nos Estados Unidos, as primeiras células solares fotovoltaicas baseadas nos avanços tecnológicos na área de dispositivos semicondutores. Em sua fabricação foram empregadas lâminas de silício cristalino que atingiram uma eficiência de conversão de energia solar em elétrica relativamente alta para a época, de 6% (PINHO; GALDINO, 2014, pg. 103).

2.4.1. Efeito fotoelétrico

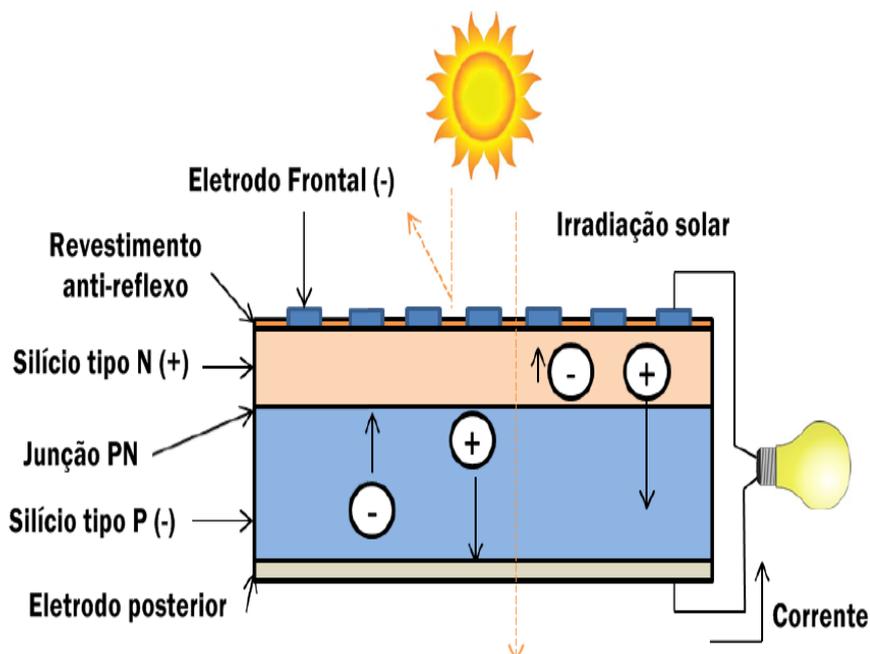
A geração da energia fotovoltaica se dá pela conversão direta da luz solar em eletricidade, produzida nos painéis fotovoltaicos através da diferença de potencial elétrico nas faces opostas de uma junção semicondutora (JARDIM *et all*, 2004).

Este efeito ocorre nos materiais conhecidos como semicondutores, os quais apresentam duas bandas de energia, em uma é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e na outra não é verificada a presença dos mesmos, ou seja, a banda está vazia (banda de condução). O material semicondutor mais usado é o silício, segundo elemento mais abundante na crosta da Terra. Seus átomos se caracterizam por possuir quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina (SAMPAIO, 2015, pg. 42)

Quando os fótons incidem sobre a célula fotovoltaica, através de uma junção P-N (positivo-negativo), a energia de uma fração desses fótons pode excitar elétrons que contribuem para estabelecer uma corrente elétrica, representado na Figura 3. Dentre os materiais mais adequados para a conversão de radiação solar em energia elétrica, destaca-se o silício, principal matéria prima de uma célula solar fotovoltaica (SILVA, 2014).

A célula é o menor elemento do sistema fotovoltaico e sua eficiência de conversão é medida pela proporção de radiação solar incidente sobre a sua superfície que é convertida em energia elétrica (SILVA, 2014).

Figura 3 – A Célula Fotovoltaica.



Fonte: SAMPAIO, 2015.

Um conjunto de células forma um módulo fotovoltaico. Os módulos podem ser ligados em série, formando uma *string*, e um conjunto de *strings* ligadas em paralelo formam um arranjo. Tais ligações entre células, módulos e *strings* podem ser conectadas em série e/ou paralelo para se obter o nível de tensão e corrente requerido por cada sistema (PINHO; GALDINO, 2014).

2.4.2. Células solares de Silício cristalino

Cerca de 95% das células solares usadas no mundo são de Silício, é o segundo elemento químico mais abundante na Terra. O Silício não é encontrado como um elemento químico isolado na natureza, existe associado a outros elementos, como o oxigênio, formando areia de sílica. Nas células solares, o material utilizado deve ser da maior pureza possível, fato que demanda sucessivas etapas na produção química. Os fabricantes de células solares têm obtido, a sua maior parte, o material purificado do desperdício da indústria eletrônica de semicondutores. (GUIA TÉCNICO, 2014).

Como o cristal de Silício puro não possui elétrons livres e, portanto, não é um bom condutor elétrico acrescentam-se porcentagens de outros elementos. Este processo denomina-se dopagem. Esta dopagem, se feita com Fósforo, gera um material com elétrons livres ou materiais com portadores de carga negativa (silício tipo N). Se for acrescentado Boro ao invés de Fósforo, obtém-se um material com características inversas, ou seja, falta de elétrons ou material com cargas positivas livres (Silício tipo P) (RAMOS, 2006).

As células fotovoltaicas podem ser fabricadas com alguns materiais distintos. Cada material caracteriza uma tecnologia que possui eficiência diferenciada. O silício monocristalino (m-Si) e silício multicristalino (p-Si), são considerados uma tecnologia consolidada e confiável, e possuem a melhor eficiência comercialmente disponível (PINHO & GALDINO, 2014).

As células de silício cristalino processadas e expostas à luz geram uma diferença de potencial elétrico. Segundo Biochossi *et al* (2016), ao ser exposta à luz, a placa solar irá produzir eletricidade em corrente contínua para ser usada diretamente em equipamentos elétricos ou armazenada em baterias para uso posterior.

2.4.2.1. Silício monocristalino (m-Si)

Os monocristais são obtidos em lingotes pelo método Czochralski, que consiste na fusão completa do silício e depois no empuxe dos lingotes a partir de sementes de orientação cristalográfica, de acordo com o material dopante. Com isso aumenta-se a condutividade do cristal, propiciando melhor rendimento na conversão em relação aos outros tipos de células solares. Com esse processo, a célula fotovoltaica tem aspecto de material monocolor que o torna mais efetivo na conversão de energia (RAMOS, 2006).

No processo de produção existe perda de material da ordem de 50%, o que acarreta um encarecimento ao produto final. Porém vale ressaltar que tal processo aumenta a

condutividade do cristal, chegando ao rendimento na conversão, de 15% a 18% (RAMOS, 2006; BÜHLER, 2011).

2.4.2.2. Silício multicristalino (p-Si)

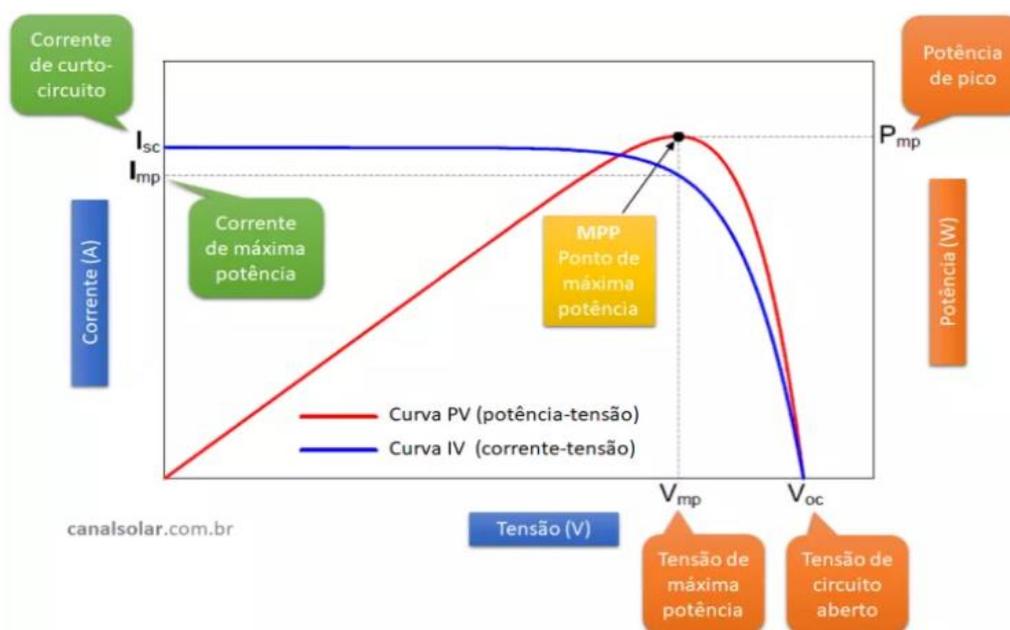
O uso da técnica de produção denominada Ribbon para este tipo de cristal, que consiste em depositar o silício fundido diretamente em camadas sobre um substrato, diminui a perda de material, o que implica em diminuição dos custos de fabricação, ocasionando um produto final mais barato (BÜHLER, 2011).

O material de execução do silício multicristalino é o mesmo em relação ao monocristalino, mas o processo de fabricação diferencia-se quando fundido e solidificado direcionalmente resultando em um bloco com grande quantidade de cristais onde se concentram os defeitos que tornam este material menos eficiente do que o m-Si, em termos de conversão fotovoltaica. Células de p-Si tem eficiência entre 11% a 15% (GUIA TÉCNICO, 2014; GHENSEV, 2006).

2.4.3. Curva característica

A curva característica i-V de um PV relaciona corrente e tensão. Para construção desta curva são necessárias algumas medidas relacionadas à capacidade de geração de energia do mesmo. Conforme pode ser observado na Figura 4

Figura 4 - Componentes de uma curva característica de potência para um PV.



Fonte: Villalva, 2019.

Corrente de curto circuito (I_{SC}) é a medida da corrente que o painel gera sem ter ligado a ele nenhuma carga, ou seja, a corrente máxima que o painel pode gerar. Ela é chamada de corrente de curto circuito pois para determinação da mesma é necessário ligar os polos positivo e negativo do painel a um amperímetro, o amperímetro tem resistência interna quase nula, o que caracteriza um curto circuito.

Tensão de circuito aberto (V_{OC}) é a tensão que o painel gera sem ter carga ligada a ele, ou seja, a máxima tensão que o painel pode gerar. Seu nome se deve ao fato de que para obtê-la se liga os terminais positivo e negativo do painel, geralmente, a um voltímetro. O voltímetro possui resistência interna muito alta, fato que faz com que não haja movimento de elétrons no circuito, caracterizando um circuito aberto.

Corrente de máxima potência (I_{MP}) é a corrente que o painel fornece quando opera no seu ponto de máxima potência.

Tensão de máxima potência (V_{MP}) é a tensão que o painel apresenta em seus terminais quando opera no ponto de máxima potência.

Potência de máxima potência ou potência de pico (P_{mp}) é a máxima potência que o painel pode gerar.

Ponto de máxima potência (MPP): É o ponto de máxima potência, encontra-se no joelho da curva I-V e no pico da curva P-V.

As características corrente-tensão (i-V) de um gerador PV variam com as condições ambientais, dependendo principalmente da insolação e temperatura. Os valores de I_{SC} , V_{OC} , I_{MP} , V_{MP} e P_{mp} geralmente são fornecidos pelo fabricante para uma irradiância de $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ e uma temperatura de 25 graus Celsius, baseados nos valores STC (*Standard Test Conditions*).

Uma das maneiras mais simples, dentre as existentes, para realização da curva de potência i-V consiste na adição de uma carga resistiva variável em série ao circuito composto pelo PV, um amperímetro e um voltímetro. Para o cálculo da potência utilizou-se a Equação 1.

$$P = V * i \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

V = Tensão (V);

i = Corrente (A);

P = Potência (W);

2.5 SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados como sistemas isolados ou autônomos (*off-grid*), híbridos ou conectados à rede (*on-grid*). Nesta seção, os sistemas *off-grid* e *on-grid* serão estudados.

2.5.1. Sistemas *off-grid*

Os sistemas solares fotovoltaicos *off-grid* ou sistemas fotovoltaicos isolados costumam ser instalados em regiões onde não se tem disponibilidade de fornecimento de energia elétrica através das concessionárias ou quando se deseja mantê-lo isolado de outros sistemas energéticos (SILVA, 2014, pg. 28).

Para este sistema, o fornecimento da energia ocorre diretamente aos aparelhos elétricos. Considerando que a energia deve chegar sempre de forma permanente aos aparelhos, isto gera um problema, pois existem variações causadas por sombreamentos, por exemplo.

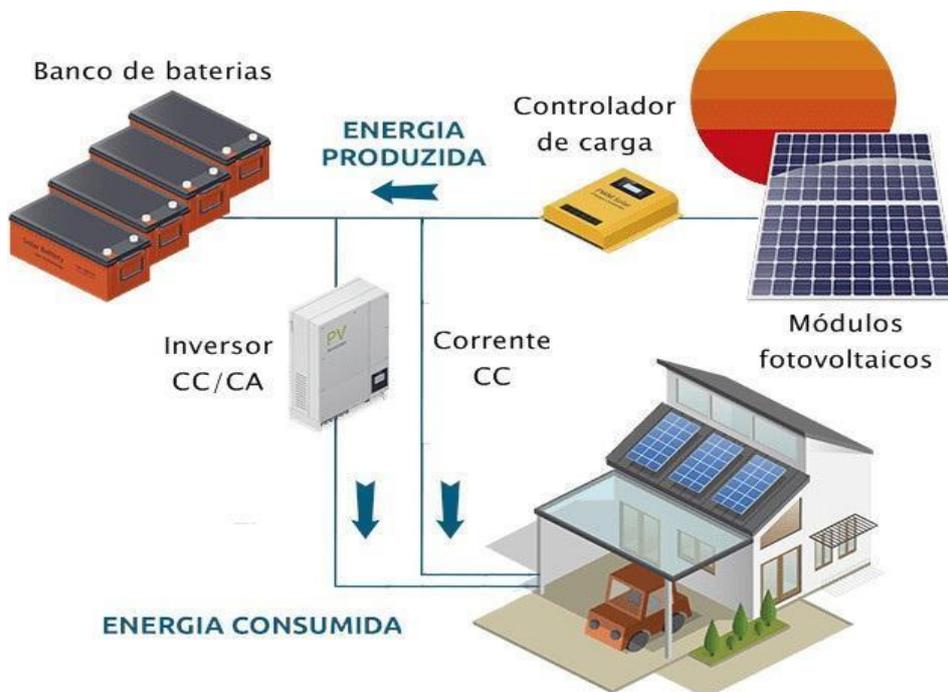
No sistema fotovoltaico isolado o uso de acumuladores ou dispositivos de armazenamento de energia é necessário para atender a demanda das cargas durante à noite ou em dias com pouca incidência solar, como dias chuvosos ou nublados em que não há geração de energia ou a geração é insuficiente. Assim, parte da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos durante o dia é armazenada pelas baterias para que seja suprida a demanda. Existem diversos tipos de acumuladores eletroquímicos disponíveis no mercado, sendo a bateria de Chumbo-ácido (Pb-ácido) é a tecnologia mais empregada. Baterias com tecnologias mais modernas, tais como Níquel-cádmio (NiCd), Níquel-hidreto metálico (NiMH) e de íons de Lítio (Li-ion), embora apresentem maiores vantagens, acabam por serem menos utilizadas em função do seu preço mais elevado. (PINHO; GALDINO, 2014, pg. 164).

Estes sistemas requerem o uso de alguns componentes que não são necessários nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede, mostrados na Figura 5. Nos sistemas isolados se faz necessário o uso de controladores de carga, baterias ou outro tipo de acumuladores e seus respectivos acessórios que tornam a sua aplicação um tanto mais cara que os sistemas conectados à rede. Estes sistemas basicamente são compostos pelos seguintes componentes:

- Módulos fotovoltaicos;
- Controladores de carga;
- Banco de baterias; e
- Inversores.

A existência ou não do inversor nestes sistemas está associada ao tipo de alimentação que a carga necessita. Caso a carga seja alimentada em corrente contínua não se faz necessária a utilização de um inversor para transformar a corrente contínua dos bancos de baterias para corrente alternada (MORAIS, 2009).

Figura 5 - Sistema de geração de Energia Solar por PV *off-grid*.



Fonte: Adaptado de Kerosol.

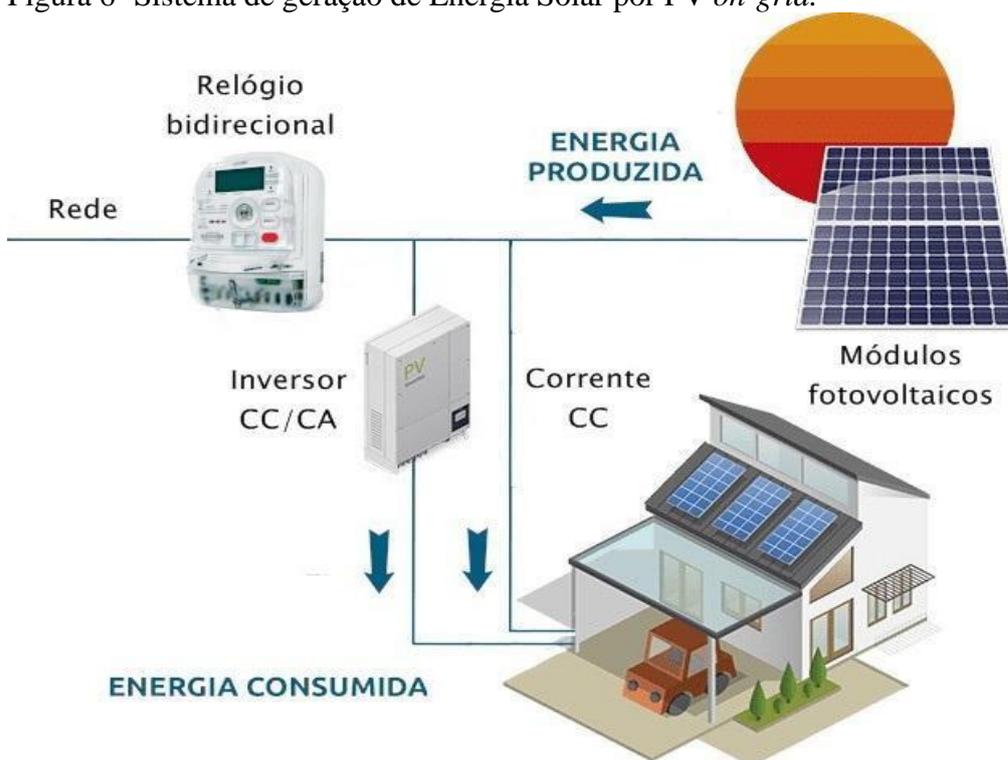
2.5.2. Sistemas *on-grid*

Toda energia produzida por este tipo de sistema pode ou não ser fornecida à carga instalada. Aquela energia que for produzida nos horários de incidência solar e que não for utilizada na própria instalação poderá ser injetada na rede da concessionária local de energia. Esta injeção de energia produzida pelo sistema fotovoltaico na rede pode ser vendida ou acumulada em forma de créditos conforme a legislação do país (SILVA, 2014).

Estes sistemas requerem o uso de alguns componentes e dispositivos elétricos, Figura 6, porém são mais simples que os sistemas fotovoltaicos isolados. São basicamente compostos pelos seguintes componentes:

- Relógios bidirecionais;
- Módulos fotovoltaicos; e
- Inversores.

Figura 6 - Sistema de geração de Energia Solar por PV *on-grid*.



Fonte: Adaptado de Kerosol.

Para a conexão à rede, os componentes elétricos, equipamentos e as instalações deverão atender aos requisitos mínimos exigidos pela concessionária local. Para a contabilização de energia utilizada e exportada entre a geração distribuída e a concessionária local, se faz necessária a utilização de um medidor de energia bidirecional ou dois medidores individuais registrando a geração e o consumo da instalação (SILVA, 2014, pg. 32).

2.6 EFICIÊNCIA DOS PAINÉIS

Para a determinação da eficiência dos painéis é utilizada a Equação 2.

$$\eta = \frac{(I_{sc} V_{oc} FF) 100\%}{AG} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

I_{sc} = Corrente de curto circuito (A);

V_{oc} = Tensão de circuito aberto (V);

FF = Fator de forma;

A = Área da placa fotovoltaica (m^2);

G = Irradiância solar incidente (W/m^2);

Enquanto para o cálculo do fator de forma é utilizada a Equação 3. Os valores de tensão máxima de pico e corrente máxima de pico são retirados do gráfico tensão x corrente.

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

V_{mp} = Tensão máxima de pico (V);

I_{mp} = Corrente máxima de pico (A);

V_{oc} = Tensão de circuito aberto (V);

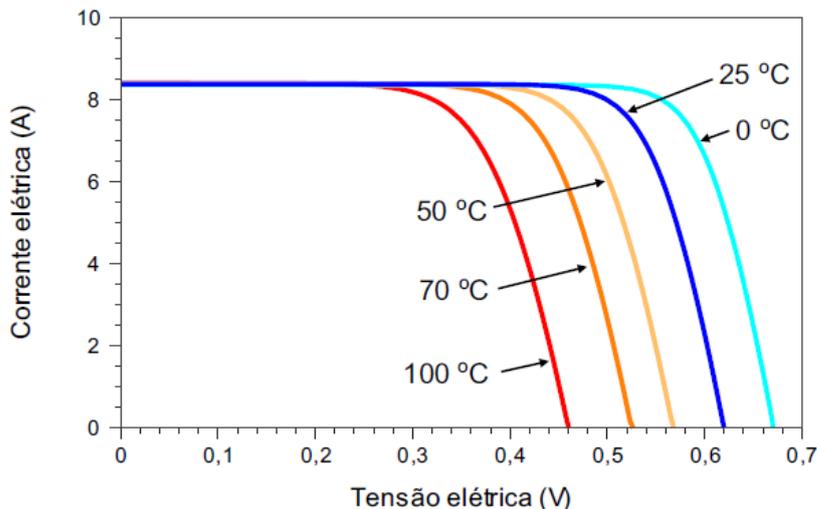
I_{sc} = Corrente de curto circuito (A);

2.7 FATORES EXTERNOS

Existem ainda fatores externos que podem influenciar na geração de energia fotovoltaica, conseqüentemente, também podem alterar as características elétricas dos módulos. Entre eles estão:

- 1) A irradiância solar e a temperatura das células fotovoltaicas (PINHO & GALDINO, 2014);
- 2) A reflexão na superfície frontal e a sombra proporcionada pela área da malha metálica na face frontal (MOEHLECKE; ZANESCO, 2005 *apud* CANTOR, 2017);
- 3) O espectro solar (BETTS, 2004).

Figura 7. Influência da temperatura na curva i-V (para irradiação de $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^2$, espectro AM=1,5).



Fonte: PINHO & GALDINO (2014)

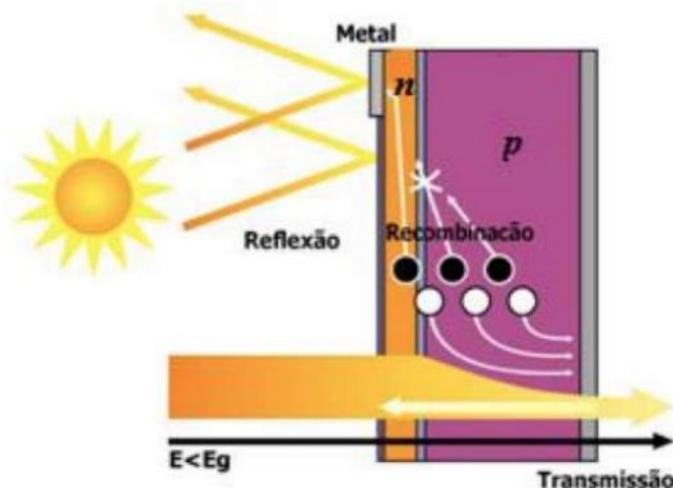
Em ambiente real o aumento da temperatura é consequência do aumento da irradiância. Um aumento da temperatura ambiente provoca aumento da temperatura das células presentes no módulo fotovoltaico reduzindo sua eficiência. Isto se deve ao fato de que a tensão da célula reduz significativamente com o aumento da temperatura, em contraponto sua corrente sofre uma elevação muito pequena, praticamente desprezível. A Figura 7 mostra

as curvas características para diferentes temperaturas das células fotovoltaicas para irradiância de $1.000 \text{ W}\cdot\text{m}^2$.

Os autores Moehlecke & Zanesco (2005) *apud* Cantor (2017) citam a reflexão na superfície frontal e a sombra proporcionada pela área da malha metálica na face frontal como fatores intrínsecos que podem limitar a eficiência de conversão de uma célula fotovoltaica. Na Figura 8 estão representados tais fatores.

O impacto da variação espectral influencia principalmente na fotocorrente, pois altera o recurso de irradiância experimentado pelo dispositivo. Alguma variação de tensão também pode surgir devido à dependência da corrente e ainda a temperatura das células também pode mudar dependendo da absorção, afetando parâmetros com dependência térmica (BETTS, 2004).

Figura 8. Esquema dos fatores que limitam a eficiência de conversão de uma célula solar.



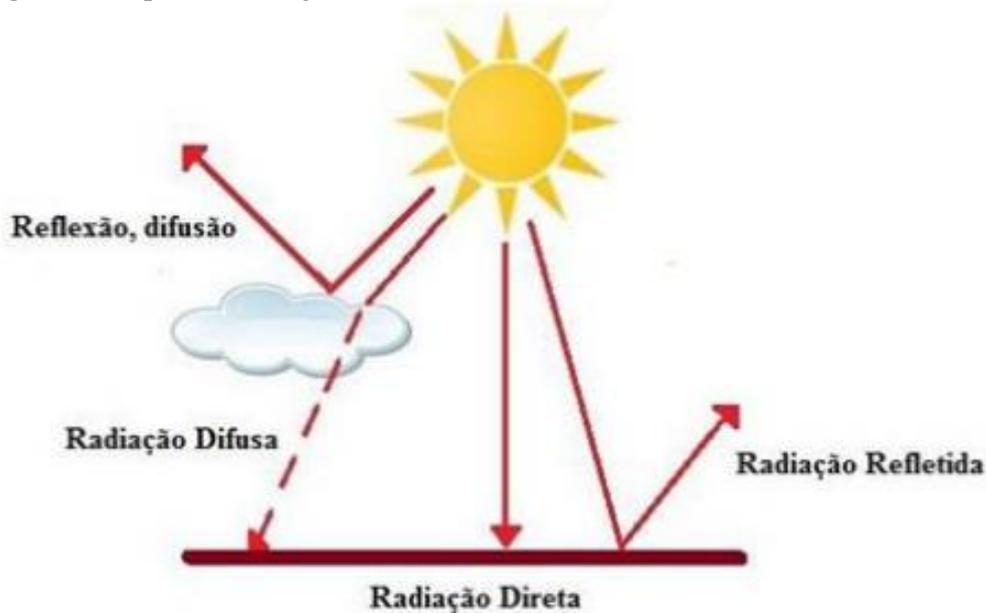
Fonte: Moehlecke & Zanesco (2005) *apud* Cantor (2017).

2.8 TIPOS DE RADIAÇÃO

Brinkworth (1981) ressalta que a energia recebida pela terra é apenas uma fração de toda a energia irradiada pelo sol, mas que seria suficiente para suprir a demanda de energia de todo o mundo. Porém, nem toda essa energia chega à superfície da Terra devido a uma série de reações ocorridas na atmosfera, como: a absorção pelo ozônio, reflexão, dispersão por componentes atmosféricos, entre outras.

Segundo Pinho & Galdino (2014) as componentes da radiação são descritas como irradiação extraterrestre, irradiação direta, irradiação difusa, albedo e irradiação global, que é a soma de todas as anteriores. Essas componentes podem ser observadas na Figura 9.

Figura 9 - Tipos de radiação solar.



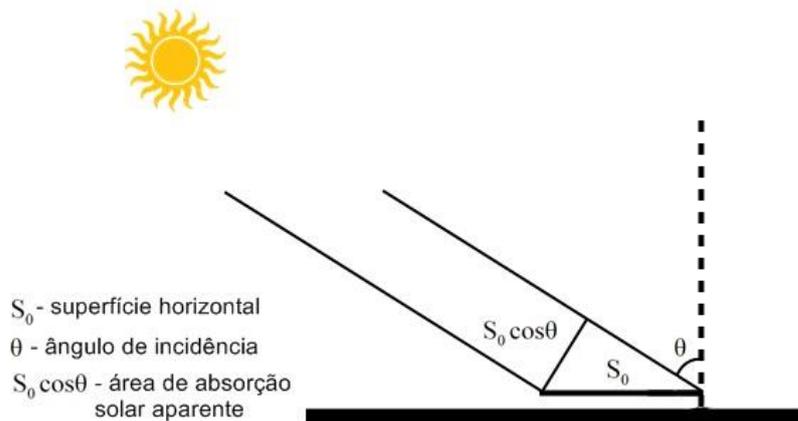
Fonte: FOCUSOLAR, 2015.

Irradiância extraterrestre é a irradiância solar que atinge o topo da camada atmosférica da Terra. Irradiação direta é a irradiação solar que incide diretamente sobre a superfície, sem sofrer qualquer influência. Irradiação difusa é a irradiação solar que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre. Irradiação refletida ou albedo é a refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos, etc.).

2.9 AUMENTANDO A EFICIÊNCIA DOS PAINÉIS SOLARES

Usualmente os painéis solares fotovoltaicos são posicionados num determinado ângulo em relação ao plano vertical e, durante o dia, a área de absorção varia em função do cosseno do ângulo de incidência da radiação solar, conforme esquematizado na Figura 10 (MOUSAZADEH *et al.*, 2009).

Figura 10 - Área aparente de absorção solar em função do ângulo de incidência.



Fonte: Adaptado de Carvalho, 2011.

O ângulo de incidência para absorção ótima ocorre quando a função $S_0 \cdot \cos \theta$ é máxima, ou seja, quando $\cos \theta = 1$ e, portanto, para $\theta = 0$. Então, para uma maior geração de potência o Sol precisa estar em um ângulo de 90° em relação ao PV, ou vice versa.

2.9.1. Uso de rastreadores solares

Segundo Carvalho (2011), comparando sistemas fixos com sistemas que dispõem de algum mecanismo de rastreamento solar, observa-se incremento teórico de 57% da energia absorvida pelos aparatos que possuem sistema de rastreamento. Esse resultado pode ser aplicado para satélites naturais e artificiais, porém esse valor pode variar para mais ou para menos, de acordo com a nebulosidade local, reflexões diversas, índice de radiação, precisão do rastreamento, etc.

Os sistemas de rastreamento dividem-se basicamente em dois tipos: rastreadores passivos e rastreadores ativos. Os rastreadores passivos dispensam o uso de motores, seu movimento ocorre em função da expansão/contração e eventual mudança de fase de um gás (usualmente freon). De acordo com o movimento do sol, a diferença de massa de reservatórios de gás, instalados nas extremidades do painel solar, induz um torque que tende a manter a área de absorção praticamente perpendicular aos raios incidentes. Já os rastreadores ativos são baseados em dois princípios fundamentais que regem sua movimentação: rastreamento microprocessado e por sensoriamento eletro-óptico. A movimentação pode ser em uma ou duas dimensões. O sensoriamento eletro-óptico é baseado em informações instantâneas de luminosidade, possui pelo menos um par de sensores fotossensíveis. Por meio da diferença de sinal entre os sensores, o aparato faz uso da unidade motora, sob gerenciamento do microcontrolador, até que haja completo ajuste e, conseqüentemente, maximização da radiação incidente. (CARVALHO, 2011)

2.9.2. Rastreadores de dois eixos

Tratam-se de sistemas ativos de rastreamento solar (Figura 11). São necessários motores para o alinhamento ótimo do painel. Cada motor é responsável pelo movimento em um eixo. São amplamente utilizados sensores LDR que fazem a leitura analógica da quantidade de luz incidente sobre eles e, através de códigos de programação, essa informação é convertida por uma placa de circuito lógico e aplicada para o melhor posicionamento do painel solar.

Na montagem de um protótipo elaborado por Gagliano *et al.* (2006) foram utilizados doze sensores LDR onde nove deles eram responsáveis pela rotação do sistema e somente três

pela inclinação. A conclusão foi de que estes sensores, além do baixo custo, permitem precisão no processo de rastreamento.

Figura 11 - Módulo com estrutura de rastreamento de dois eixos.



Fonte: PIOTROWSKI, 2018.

Utilizando os mesmos sensores, Bakos (2006) desenvolveu um rastreador solar biaxial para uso com coletores solares. O sistema foi testado em condições de céu claro e obteve desempenho 46,5% maior que os sistemas fixos inclinados para latitude de 40°N.

Roth et al. (2004) *apud* Carvalho (2011) construíram um seguidor solar biaxial para gerenciar o posicionamento de um pireliômetro. O dispositivo continha dois sensores de radiação que indicavam a intensidade de irradiação e a posição do sol e auxiliavam na percepção do nascer e do pôr do sol.

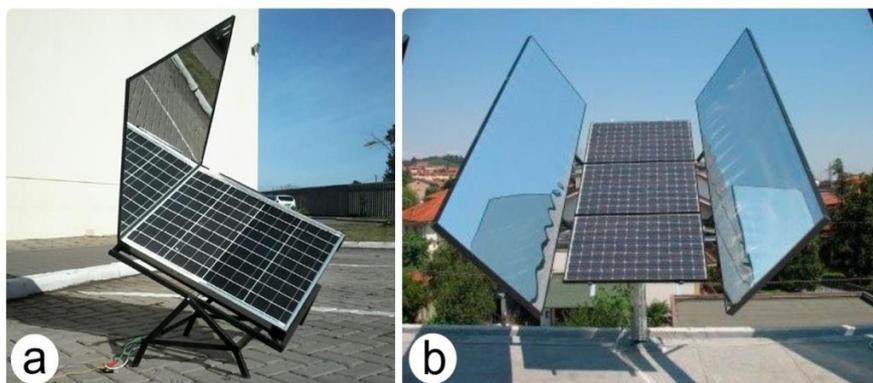
2.9.3. Uso de espelhos

O módulo fotovoltaico com espelhos é direcionado para a melhor captação dos raios solares. Em síntese, usa-se uma estrutura mecânica para elevar a eficiência de geração de cada módulo. Nos estudos realizados para o arrefecimento dos módulos observou-se que ele proporciona um aumento da eficiência em todas as configurações analisadas. (PIOTROWSKI, 2018)

Cornelius *et. al* (2016) desenvolveram um sistema mecânico com espelhos, os quais servem para refletir os raios solares que não são captados pela superfície do módulo solar, no intuito de melhorar a eficiência do painel fotovoltaico. A partir disso, foram analisadas situações que ocorriam sobre o painel solar com o espelho e sem o espelho. Nesses, os resultados foram satisfatórios, pois foi possível comprovar que o sistema mecânico com espelho proporcionou um aumento de 7% na eficiência do painel. Segundo os próprios autores, para melhores resultados, pode-se implantar uma estrutura eletrônica para mover a

placa de acordo com a posição do sol. Os arranjos utilizados pelos autores podem ser observados na Figura 12.

Figura 12 - Estrutura com espelhos.

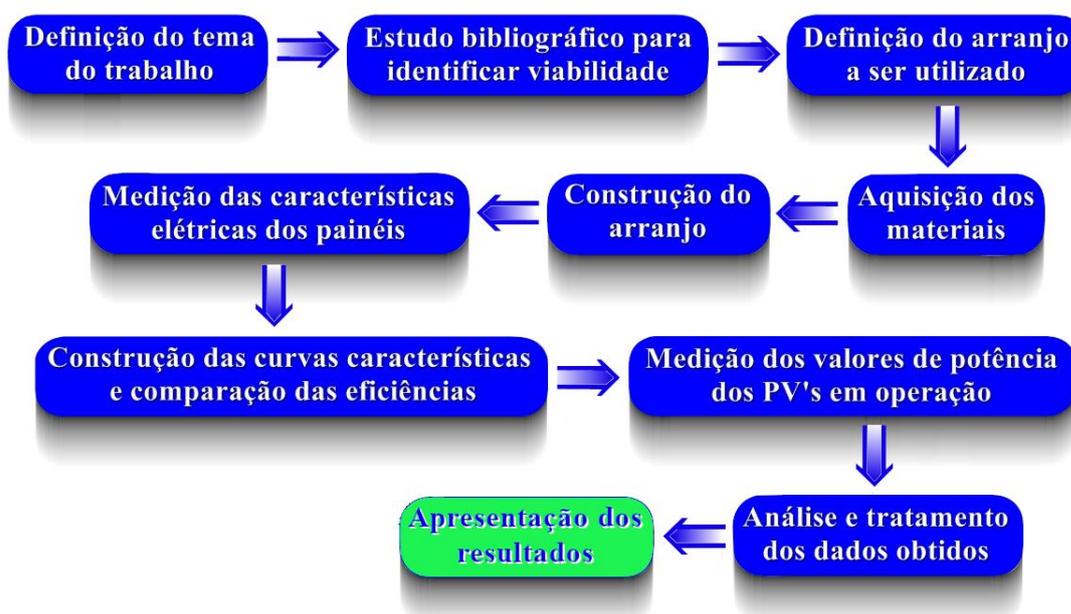


Fonte: a: Cornelius (2016), b: Piotrowsky (2018).

3 METODOLOGIA

A pesquisa em questão foi realizada no Laboratório de Fluidos e Termologia, situado nas dependências da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) Campus Cerro Largo/RS, e na área externa ao mesmo. O fluxograma do trabalho pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma do trabalho desenvolvido.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.1 RASTREADOR BI-AXIAL

O rastreador utilizado (Figura 14) foi adquirido no site da USINAINFO - Eletrônica e robótica, e possui um painel solar instalado em mecanismos que apresentam possibilidade de movimentos horizontais e verticais, além de um conjunto de resistores dependentes de luz que permitem ao conjunto definir a melhor posição, de forma a ter melhor aproveitamento da energia solar. O Rastreador Solar Arduino Solis Completo é comandado pela Placa Uno *SMD* que atua em conjunto com dois micro servo motores SG90. Todas as peças foram fabricadas em *MDF*.

A estrutura, por ser fabricada em *MDF*, não pode ficar exposta a ação do tempo. Este fato não influenciou nos resultados finais pois o objetivo consistiu em fazer a recolha do equipamento após o encerramento das leituras para cada dia de trabalho. Como pode ser observado na Figura 28, se fez necessária a adição de prolongamento do recurso responsável pelo sombreamento dos *LDR's*, afim de que o reposicionamento do PV se tornasse mais frequente.

Figura 14 - Rastreador Solar Arduino Solis.

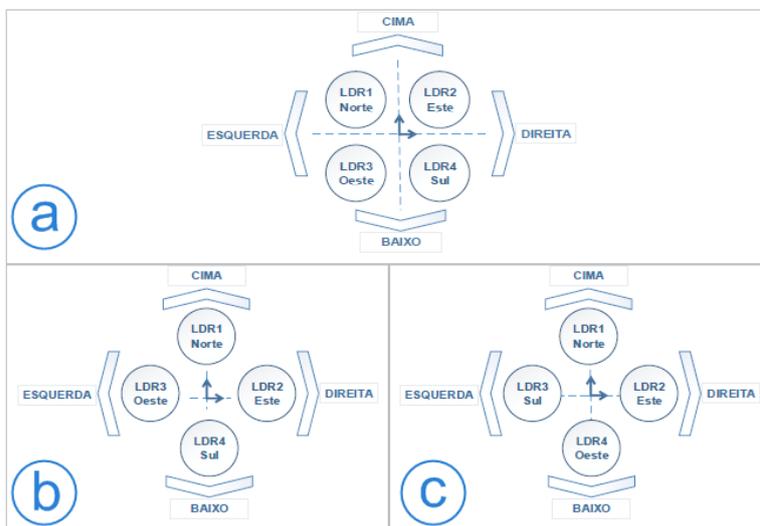


Fonte: Usinainfo, 2021.

3.1.1. Unidade de sensoriamento por *LDR*

A unidade de sensoriamento, responsável por receber as informações de radiação solar por meio de sensores fotossensíveis e repassá-las, analogicamente, para a unidade de processamento é constituída por quatro *LDR*'s.

Figura 15 - Tipos de agrupamento de sensores *LDR* em um seguidor de dois eixos.



Fonte: Adaptada de Martins (2016).

Segundo Martins (2016) os sensores *LDR* são dispositivos que variam a sua resistência de forma inversamente proporcional à intensidade da luz incidente sobre eles, sendo assim, podem ser utilizados para determinar o posicionamento solar. Os seguidores de dois eixos utilizam, geralmente, quatro *LDR*'s. A distribuição dos sensores é opcional e pode assumir várias configurações sendo algumas apresentadas na Figura 15. A configuração utilizada neste trabalho foi a que está representada no item a da Figura 15.

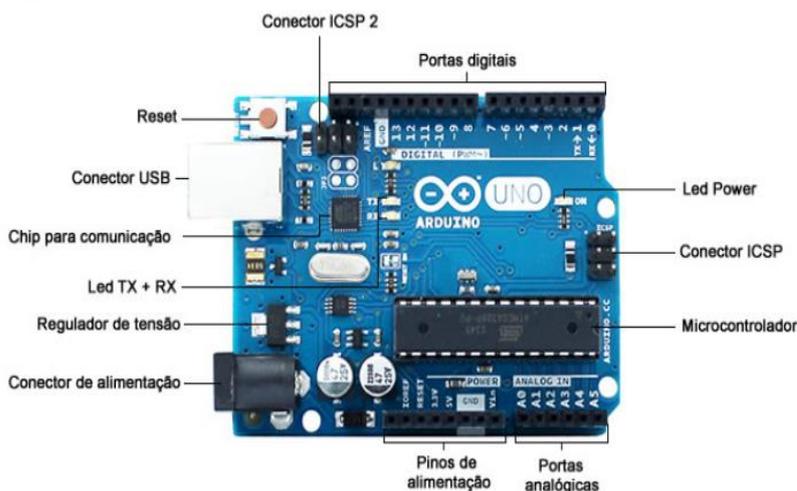
São as sombras geradas pelas abas em determinadas posições do sol que irão proporcionar a diferença de luminosidade necessária entre os sensores *LDR* para o deslocamento da base em *MDF*.

3.1.2. Placa Uno R3

O responsável pela interpretação dos dados fornecidos pela unidade de sensoriamento é o Arduino Uno R3 (Figura 16). Trata-se de uma plataforma *open-source* de computação física, baseada em uma linguagem de programação *C++*. Ele pode ser utilizado para desenvolver objetos interativos e ambientes autônomos, através dele o usuário pode controlar ações e interações do seu projeto. O cérebro por trás do Arduino, atuando de forma a gravar os códigos e executá-los exatamente no momento definido pelo operador anteriormente, via programação, é o microcontrolador ATmega328.

A partir de 2013 o ATmega328 é comumente usado em muitos projetos e sistemas autônomos, onde se precisa de um microcontrolador simples, de baixa potência e baixo custo. Talvez a implementação mais comum deste chip seja no Arduino, nos modelos Arduino Uno e o Arduino Nano.

Figura 16 - Esquema do Arduino Uno R3.



Fonte: Usinainfo, 2021

3.1.3. Servomotores

O Micro Servo Motor SG90 (Figura 17) é um motor muito utilizado em aplicações para robótica, nos sistemas microcontroladores, como, por exemplo, Arduino. Ele é um módulo que apresenta movimentos proporcionais aos comandos indicados, controlando o giro e a posição, diferente da maioria dos motores. Servomotores são dispositivos de malha

fechada, seu funcionamento dá-se por meio do recebimento de um sinal de controle, onde passam a verificar a posição atual, e atuam no sistema indo para a posição desejada.

O Micro Servo SG90 é um motor compacto, pesa apenas 9g e oferece um torque máximo de, aproximadamente, 1,6 kgf·cm.

Figura 17 - Micro servo motor SG90.



Fonte: Usinainfo, 2021.

3.1.4. Código de programação

A unidade de sensoriamento manda as informações ao Arduino que lê os valores das resistências dos *LDR's*, converte em linguagem de máquina, faz os cálculos necessários e posiciona o painel solar no melhor ângulo, tudo isso através de comandos previamente inseridos pelo programador e gravados na placa Arduino. O código é fornecido pelo próprio site revendedor do rastreador e pode ser visto integralmente no Anexo A.

Na posição ideal os quatro sensores devem apresentar valores próximos de resistência. Quando houver uma diferença significativa entre a resistência dos *LDR's* que formam cada par, o eixo correspondente não está perpendicular à direção dos raios solares. Assim, o microcontrolador envia o sinal para os motores fazendo estes se moverem até que o valor entre as resistências, ou seja, a luminosidade dos *LDR's*, estejam próximos.

Podemos observar nas duas últimas linhas do trecho do código apresentado na Figura 18 que é armazenado um valor inteiro (int) para a diferença entre as resistências dos pares de *LDR's* superior e inferior e outro valor inteiro para a diferença entre os pares de *LDR's* da esquerda e da direita.

Figura 18 - Trecho do código responsável pela leitura das resistências dos LDR's.

```
void loop() {
  int LDC = analogRead(LDRDC);    // Leitura Analógica do LDR Direita Cima
  int LEC = analogRead(LDREC);    // Leitura Analógica do LDR Esquerda Cima
  int LDB = analogRead(LDRDB);    // Leitura Analógica do LDR Direita Baixo
  int LEB = analogRead(LDREB);    // Leitura Analógica do LDR Esquerda Baixo

  int tol = 50;

  int ValorSup = (LDC + LEC) / 2;  // Média da leitura dos LDR superior
  int ValorInf = (LDB + LEB) / 2;  // Média da leitura dos LDR inferior
  int ValorDir = (LDC + LDB) / 2;  // Média da leitura dos LDR da direita
  int ValorEsq = (LEC + LEB) / 2;  // Média da leitura dos LDR da esquerda

  int DifSupInf = ValorSup - ValorInf; // Diferença entre LED superior e inferior
  int DifDirEsq = ValorDir - ValorEsq; // Diferença entre LED direita e esquerda
}
```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As variáveis, ou valores, armazenados para as diferenças de resistência entre os pares de *LDR's* são utilizadas para o ajuste da posição do painel solar através do incremento ou decremento da posição angular dos servomotores. A Figura 19 apresenta o trecho que executa os movimentos referentes ao servomotor responsável pelo alinhamento vertical do painel. O alinhamento horizontal se dá da mesma forma, porém leva em consideração as diferenças entre os pares esquerdo e direito de *LDR's*.

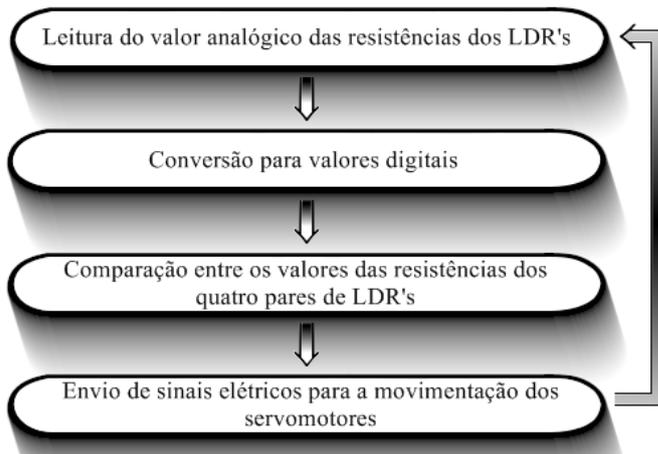
Figura 19 - Trecho do código responsável pelo movimento do servo vertical.

```
// Realiza a leitura e executa os movimentos referente ao Servo Vertical
if (-1 * tol > DifSupInf || DifSupInf > tol) {
  if (ValorSup > ValorInf) {
    ServoVertical = ++ServoVertical;
    if (ServoVertical > LimiteServoVerticalMax) {
      ServoVertical = LimiteServoVerticalMax;
    }
  }
  else if (ValorSup < ValorInf) {
    ServoVertical = --ServoVertical;
    if (ServoVertical < LimiteServoVerticalMin) {
      ServoVertical = LimiteServoVerticalMin;
    } .....
  }
  Vertical.write(ServoVertical);
}
```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Na Figura 20 vemos o fluxograma simplificado com as principais etapas do código que o processador utiliza para tomadas de decisão. Trata-se de um *loop* que repete sempre as mesmas ações de forma repetitiva até que o painel esteja posicionado de maneira satisfatória.

Figura 20 - Fluxograma simplificado de funcionamento do rastreador.

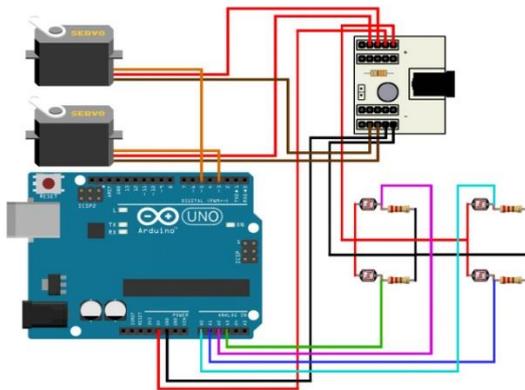


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.1.5. Esquema da ligação elétrica

O esquema de ligação do Seguidor Solar em questão, conta com um Arduino e um Módulo Expansor de Portas para alimentação, responsável por alimentar o Arduino, os Servos e Sensores e pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 - Esquema de ligação do rastreador.



Fonte: Usinainfo., 2021.

A posição do sensor LDR no esquema de ligação acima está distribuída da mesma maneira a qual deve ser instalado no case MDF, superior esquerda e direita e inferior esquerda e direita. Obedecer a este posicionamento é crucial para o bom funcionamento do projeto.

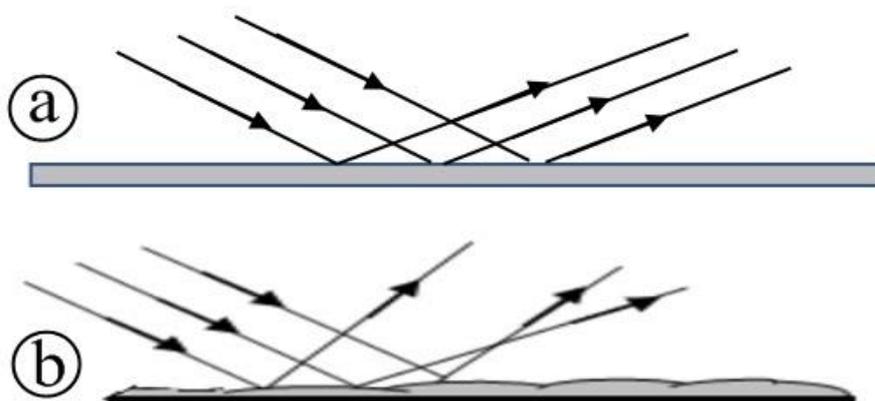
3.2 ESPELHOS

O princípio da reversibilidade dos raios diz que a trajetória dos raios de luz independe do sentido de propagação. Assim, se o sentido for invertido, a trajetória seguida pelos raios de luz será a mesma de antes. Em nosso cotidiano, esse princípio encontra sua aplicação no uso dos espelhos.

3.2.1. Reflexão da luz

Quando a luz incide sobre a superfície de separação entre dois meios diferentes e volta a se propagar nesse mesmo meio de origem da incidência é o que é conhecido por reflexão. Assim, a reflexão é um dos fenômenos mais comuns envolvendo a propagação da luz e pode acontecer de duas formas distintas, a reflexão regular, quando a superfície for muito lisa fazendo com que os raios que incidem paralelamente sejam refletidos paralelamente e a reflexão difusa, quando a superfície for irregular e, neste caso, os raios que incidem de forma paralela são refletidos em todas as direções. A representação destas duas formas pode ser observada na Figura 22. (SANTOS, 2017)

Figura 22 - Representação dos tipos de reflexão.

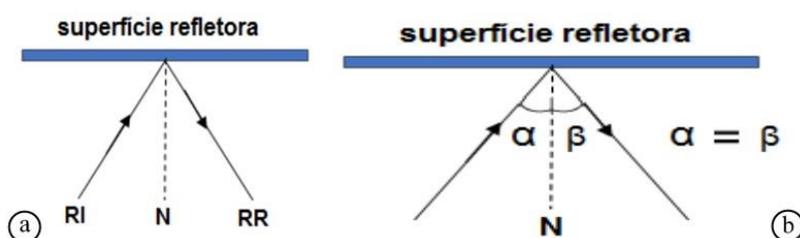


Fonte: Santos, 2017.

Nota: a: Reflexão regular; b: Reflexão difusa.

O fenômeno da reflexão é descrito por duas leis que foram escritas a partir das observações oriundas de inúmeros experimentos.

Figura 23 - Leis da reflexão.



Fonte: Santos, 2017.

A primeira lei fica mais clara quando observamos a Figura 23a. O raio de incidência (RI), a reta normal (N) e o raio refletido (RR) pertencem ao mesmo plano. Pela segunda lei, Figura 23b, o ângulo de incidência (α) é igual ao ângulo de reflexão (β).

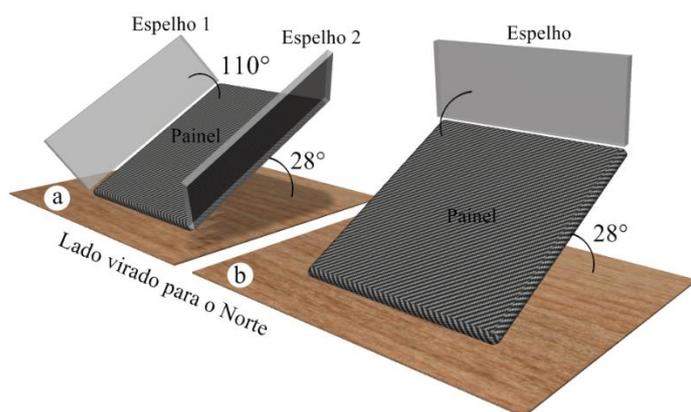
3.2.2. Escolha da orientação dos espelhos

Como a reflexão depende diretamente do ângulo da luz incidente sobre a superfície refletora, no nosso caso os espelhos, procedeu-se uma investigação sobre os melhores ângulos a serem adotados a fim de aumentar o ganho de energia através do uso dos mesmos. A literatura encontrada não fazia menções ao ângulo adotado, então usou-se, inicialmente, o ângulo de 110° com o painel fotovoltaico.

Após a análise de duas possibilidades, através de cálculos utilizando trigonometria e observando as leis que regem a refração foram definidos os ângulos e a posição de instalação dos espelhos. O fato de que o ângulo de incidência é igual ao de reflexão faz com que se possa utilizar os mesmos princípios aplicados ao triângulo retângulo.

A primeira possibilidade estudada foi a da Figura 24a, o ângulo definido para inclinação dos espelhos foi de 110° em relação à normal do painel. Partindo das informações da altura do espelho com 5 cm, inclinação de 110° e da largura do painel de 13 cm, com o auxílio do software *123D DESIGN* da *AUTODESK*, obtivemos os ângulos fornecidos na Figura 25.

Figura 24 - Representação dos esquemas de instalação estudados.

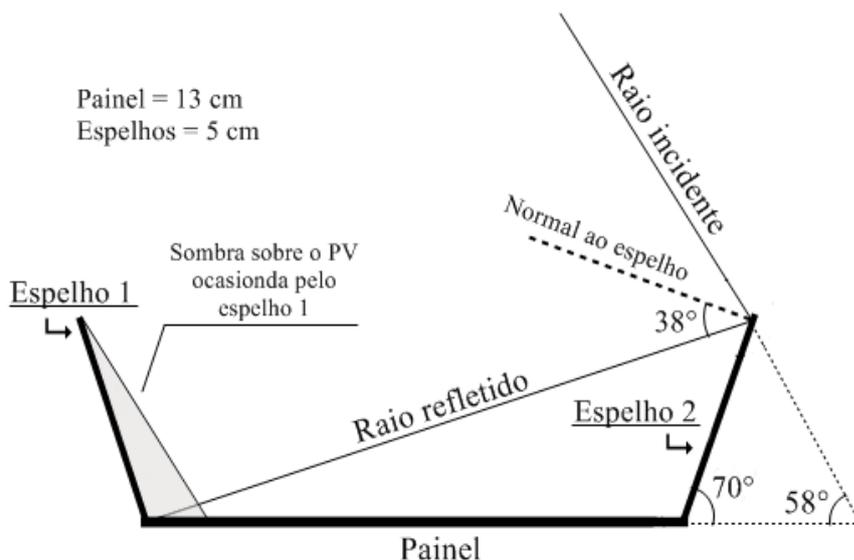


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Chegando à conclusão de que este não seria o arranjo capaz de trazer um bom desempenho ao sistema de geração. O principal responsável pelo fraco desempenho desse arranjo consiste no sombreamento do painel fotovoltaico advindo do espelho que não gera reflexão durante o período em que o Sol incide seus raios sobre sua superfície não reflexiva, na parte da manhã o espelho 1 ocasionaria sombra ao painel e na parte da tarde o espelho 2. Durante algum período do dia esse sombreamento desaparece, porém, podemos ver pela Figura 19 que para uma elevação de 58° , do Sol para com o horizonte, ainda há um pouco de

sombra ocasionada pelo espelho oposto ao que reflete os raios do Sol. Isso fez com que esse arranjo (figura 18a) fosse rejeitado e ocorresse a análise do próximo (Figura 24b).

Figura 25 - Representação dos ângulos e área sombreada para o primeiro arranjo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

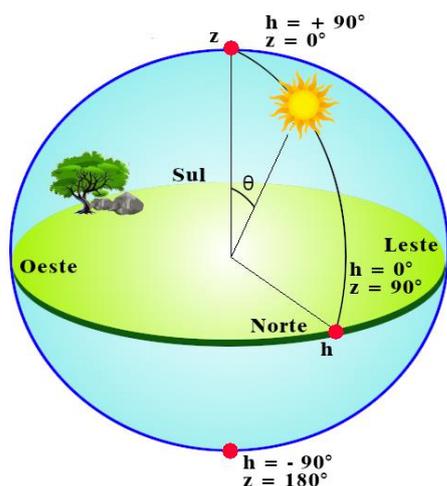
Para o arranjo da Figura 24b podemos notar que não haverá nenhuma área de sombra sobre o painel fotovoltaico ocasionada pelo espelho, levando em consideração o movimento do Sol durante o dia. Porém agora a inclinação do painel tem influência considerável sobre o ângulo de reflexão, levando esse fator em consideração procedeu-se estudo sobre a inclinação solar durante o período dos experimentos.

3.2.2.1. Inclinação Solar

O planeta Terra tem eixo de rotação inclinado em relação à normal ao plano de sua órbita em torno do Sol em um ângulo de $23,45^\circ$, Latitude do Trópico de Capricórnio. O ângulo formado entre o equador terrestre e a linha imaginária que contém o plano de movimento do sol é chamado declinação solar. A declinação do Sol varia entre $+ 23,45^\circ$, quando este é observado do Hemisfério Norte, a $- 23,45^\circ$, quando observado do Hemisfério Sul (SPENCER, 1971).

As coordenadas locais de um ponto celeste são divididas em: azimute e altura, o plano fundamental utilizado é o plano do horizonte. A altura (h) possui um ângulo complementar contado a partir do zênite (Ze) até o astro, este ângulo é chamado de distância zenital (z) e varia de 0° a 180° . Pode-se observar na Figura 26 a definição da altura h e da distância zenital z.

Figura 26 – Representação do ângulo da distância zenital.



Fonte: Adaptado de Boczko (2009).

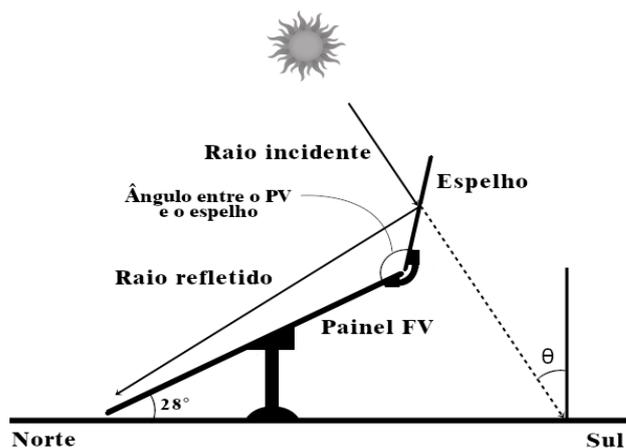
A latitude do local de instalação é -28° , este ângulo, segundo os fabricantes, é o indicado para a inclinação Norte/Sul dos PV's que forem instalados de maneira fixa. Desta maneira este foi o ângulo utilizado para a inclinação Norte do PV. A inclinação do espelho em relação ao PV foi definida à campo, sempre antes de iniciar as leituras, pela observação do posicionamento capaz de possibilitar uma reflexão dos raios solares sobre 100% da área do PV. Esta disposição fica mais clara quando observamos a Figura 27. A Tabela 1 detalha os valores dos ângulos para cada dia de experimento.

Tabela 1 - Ângulos utilizados para os experimentos.

Data	Inclinação da face Norte do PV ($^\circ$)	Ângulo utilizado entre PV e espelho ($^\circ$)
21/04/2021	28	40
04/10/2021	28	30

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 27 – Ângulo entre o painel e o espelho.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.3 ARRANJO E POSICIONAMENTO DOS PV'S

Ao final da etapa de definição dos meios que seriam utilizados no estudo prosseguiu-se com a construção da estrutura para fixação dos PV's, bem como do rastreador. O resultado final pode ser observado na Figura 28. O arranjo foi pensado a fim de facilitar o transporte da estrutura, todos os PV's foram alojados sobre uma mesma base, em *MDF*.

Figura 28 - Arranjo da estrutura utilizada nas medições.



Fonte: Fotografia tirada pelo autor, 2021.

Nota: (1) Painel usado para as medidas do branco; (2) Painel com espelho acoplado; (3) Painel com rastreador.

3.4 CONSTRUÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA

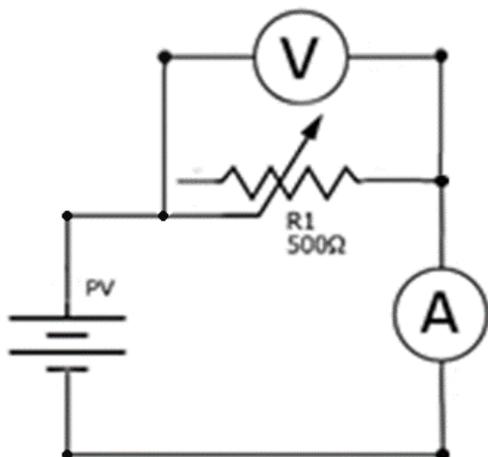
A obtenção da curva característica dos PV's é essencial, já que trata do processo que traz como resultado o valor da potência máxima que o PV pode gerar sob as condições de análise. De posse dos dados retornados pela curva é possível também a determinação da eficiência do PV, primordial para um melhor entendimento dos resultados finais.

Uma das maneiras mais simples, dentre as existentes, para realização da curva de potência *i-V* consiste na adição de uma carga resistiva variável em série ao circuito composto pelo PV, um amperímetro e um voltímetro. O arranjo é mostrado na Figura 29.

Mede-se a corrente e a tensão do PV, enquanto a resistência é variada de um valor próximo à zero até um valor alto (500 ohms, especificamente para este projeto), obtendo-se os valores de corrente de curto-circuito (I_{SC}) até o valor de tensão de circuito aberto (V_{OC}) do PV. Este método com carga resistiva é limitado a arranjos de baixa potência, ou seja, baixa tensão e baixa corrente, podendo ser utilizado neste trabalho visto que se trabalhou com PV's de, segundo o fabricante, 5 Volts e 0,500 Amperes. Vale ressaltar também, que o MPP é

característica fundamental para determinação do melhor aproveitamento para sistemas fotovoltaicos.

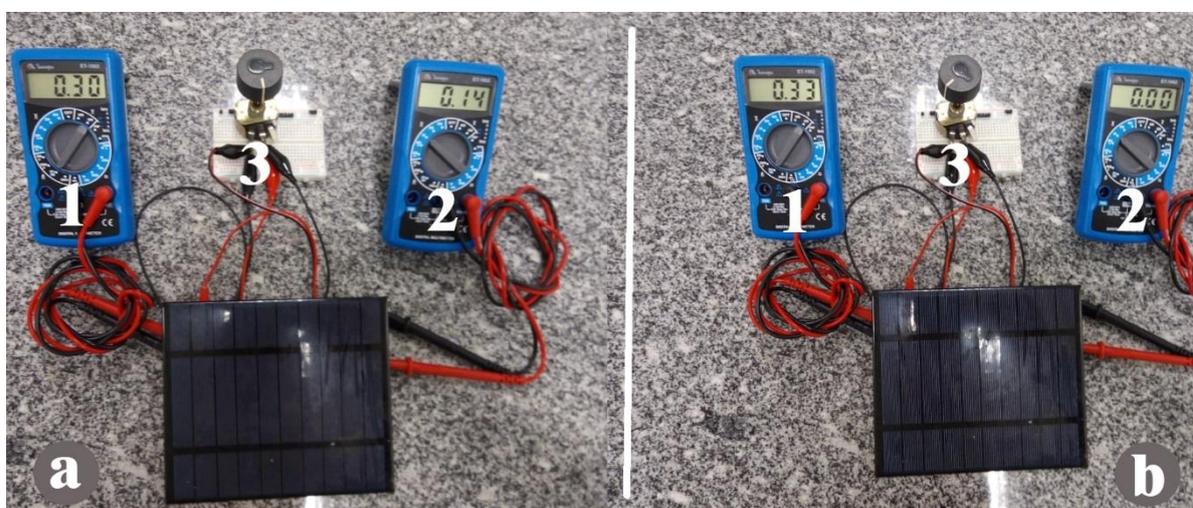
Figura 29. Circuito para curva de potência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 30a, o potenciômetro está ajustado para a resistência máxima (500 Ohms), assim há leitura de tensão e corrente e essa medida caracteriza a Tensão de Circuito Aberto. À medida que se diminui essa resistência, a placa vai entrando em curto, quando não houver mais resistência, ou seja, a resistência do potenciômetro for nula, dizemos que a placa está em curto circuito e denominamos a medida de corrente nesse momento de Corrente de Curto Circuito (Figura 30b). Utilizou-se a metodologia de Pinho & Galdino (2014), que se baseou na montagem do circuito da Figura 29, contendo o painel fotovoltaico, amperímetro, volímetro e um potenciômetro de 500Ω.

Figura 30. Equipamentos utilizados para a construção da curva característica



Fonte: Fotografia tirada pelo autor, 2021.

Nota: (1) Amperímetro, (2) Voltímetro e (3) Potenciômetro 500Ω.

Partindo disso, realizou-se o experimento a campo. Iniciou-se a construção da curva característica com o potenciômetro com carga nula, e variou-se até o máximo de carga possível, anotando os valores referente a tensão e corrente. Com base nisso, e através do programa EXCEL, utilizou-se os valores obtidos para a construção das curvas características para os PV's. Para o cálculo da potência utilizou-se a Equação 1.

3.5 DADOS PARA AS POTÊNCIAS DOS PV'S.

Como etapa final o arranjo foi posicionado em área aberta, ao lado da janela do laboratório. Esta área possibilitou incidência dos raios solares durante o dia inteiro, sem interferência de edificações ou barreiras capazes de produzir sombreamento sobre os painéis utilizados.

Foram utilizados três multímetros digitais da marca Minipa, modelo ET-1002 com erros de 0,8% para a leitura de tensão e 2,0% para a leitura de corrente, segundo o fabricante. Para a obtenção dos valores da corrente e da tensão gerados por cada painel durante o dia, optou-se por utilizar apenas três multímetros e chaves para mudança rápida das leituras entre os painéis a fim de diminuir as possibilidades dos erros instrumentais associados aos multímetros.

Os experimentos iniciaram as 9 horas da manhã, para os dias 12/04/2021 e 05/10/2021 e cessaram às 17 horas da tarde no dia 12 e às 16 horas no dia 05. Das 12 horas e 20 minutos às 17 horas para o dia 04/10/2021. As medidas foram tomadas com dez minutos de diferença uma da outra e anotadas em planilha do EXCEL, para facilitar a geração e apresentação dos resultados obtidos. Na Figura 28 pode-se observar o arranjo em operação.

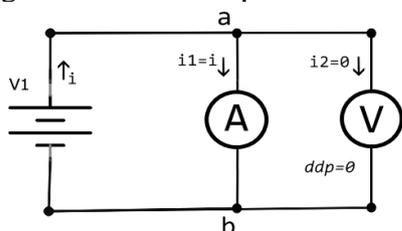
3.6 DISPOSITIVO PARA REALIZAÇÃO DAS LEITURAS

Em relação a obtenção de dados que possibilitasse uma comparação entre as potências geradas pelos conjuntos, procedeu-se inicialmente a análise de possibilidades que permitissem a obtenção das leituras da corrente de curto circuito e da tensão de circuito aberto dos dois protótipos ao mesmo tempo. Entretanto, não é possível obter as leituras de V_{OC} e de I_{SC} no mesmo instante de tempo, sem adição de carga resistiva, visto que o caminho percorrido pelos elétrons em qualquer circuito eletrônico é sempre o que oferece menor resistência.

Na Figura 31, observa-se uma representação esquemática utilizando um voltímetro e um amperímetro, ambos em paralelo com a fonte V1, representando o PV. A corrente i é caracterizada como corrente total que a fonte gera, i_1 e i_2 são as correntes que se subdividem em cada um dos ramos. Tratando o amperímetro e o voltímetro como resistências ôhmicas

que são, teremos o amperímetro com uma resistência muito próxima à zero e o voltímetro com resistência muito elevada. Então os elétrons percorrerão apenas o caminho entre a fonte e o amperímetro, ou seja, i_2 é zero, conseqüentemente não haverá diferença de potencial (ddp) entre os pontos a e b acarretando uma leitura igual a zero para a tensão lida pelo voltímetro. Já quando o amperímetro é posto em série no circuito não haverá movimento de elétrons impossibilitando também as leituras.

Figura 31. Caminho preferencial da corrente.

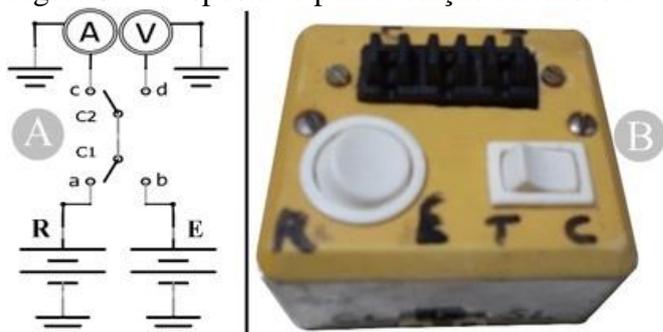


Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante deste fato viu-se a necessidade de elaborar outro arranjo para o circuito de medições. Levantou-se duas possibilidades, uma seria a adição de uma carga resistiva em série com o amperímetro e outra seria a utilização de chaves para alternar entre as leituras de V_{OC} e de I_{SC} . Após uma série de simulações realizadas na plataforma *on-line TinkerCad Circuits* constatou-se que, com a utilização de uma resistência em série as leituras de V_{OC} seriam afetadas.

Optou-se então pela construção do dispositivo para a realização das leituras representado na Figura 32B, utilizou-se duas chaves que possibilitaram trocas rápidas entre o PV associado ao espelho e o PV associado ao rastreador e também entre V_{OC} e I_{SC} , sem uma interferir na outra. A Figura 32A traz a representação esquemática do circuito utilizado. São representados o arranjo com o espelho por E, o arranjo com o rastreador por R, também o amperímetro identificado por A, o voltímetro destacado por V, e as duas chaves, C1 e C2 de três posições, de 220 V e 10 A cada uma.

Figura 32 - Dispositivo para medição de tensão e corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O Quadro 2 traz todas as possibilidades relacionadas ao circuito em questão, as trocas entre os protótipos foram feitas de forma manual, com uma diferença de no máximo quatro segundos entre o início e o fim da leitura, com todas as grandezas elétricas anotadas.

Quadro 2. Posição das chaves e leituras correspondentes.

Chave	C1	C2	Leitura
Posição	A	C	Corrente do PV com rastreador
	A	D	Tensão do PV com rastreador
	B	C	Corrente do PV com espelho
	B	D	Tensão do PV com espelho

Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados experimentais dos ensaios realizados na área externa ao Laboratório de Ondas e Fluidos da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), *campus* Cerro Largo. As análises das experiências concluídas foram feitas relacionando-se o comportamento elétrico do sistema fotovoltaico com rastreador, com espelho e um painel sem nada, instalado somente para fins de comparação. Apresentam-se os resultados acerca da caracterização dos painéis fotovoltaicos utilizados, bem como os dados obtidos a respeito do desempenho dos mesmos.

4.1 CURVA CARACTERÍSTICA

A determinação da curva característica possibilitará maior confiabilidade ao experimento, já que permite uma comparação entre os desempenhos dos painéis utilizados. Todas as curvas foram construídas no dia 04/10/2021, em algum dos intervalos entre as medidas da tensão e corrente, com cada um dos painéis em ângulo o mais próximo possível de 90° em relação aos raios solares incidentes.

O esquema foi montado conforme representado na Figura 29, ligando-se o amperímetro em série com o circuito, o voltímetro em paralelo, o potenciômetro e o painel fotovoltaico em série. Para o valor de I_{SC} o valor da resistência do potenciômetro deveria ser o mais próximo de zero possível, conseguiu-se a resistência mínima de 0,5 Ohms medida com o multímetro na escala de resistência. Nesse momento, quando a corrente de curto circuito for máxima, não haverá diferença de potencial entre os polos positivo e negativo do painel, por isso observa-se leitura de 0 no voltímetro (Figura 30b).

Após tomar nota deste valor de I_{SC} variou-se o valor da resistência girando o botão do potenciômetro. A cada alteração de valor anotava-se o resultado. Com o botão no final do curso obteve-se o valor da V_{OC} (Figura 30a). Excluindo os valores duplicados, ou muito próximos, obteve-se a curva característica de cada um dos três painéis utilizados.

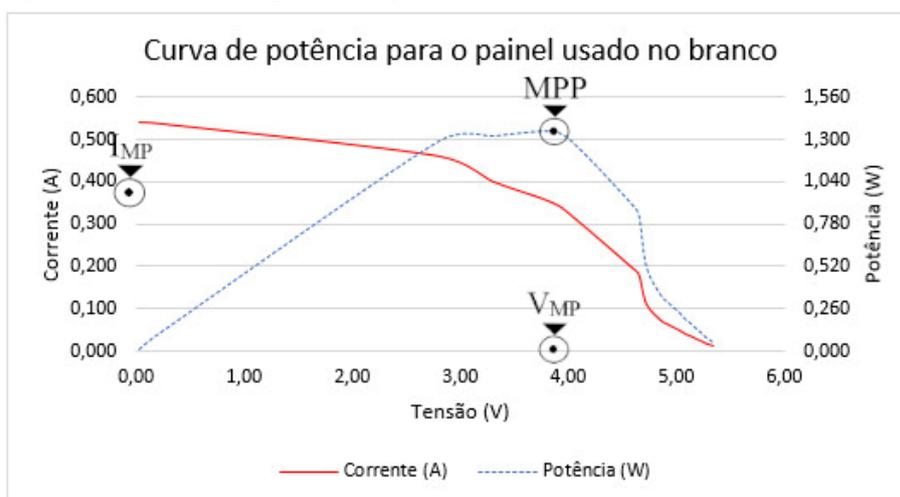
Nas Figuras 33, 34 e 35 pode-se observar as curvas características geradas para cada um dos PV's. Estão representados também os pontos de máxima potência (MPP), tensão de circuito aberto (V_{MP}) e corrente de curto circuito (I_{MP}). Os MPP assumiram valores de 1,35 W, 1,42 W e 1,25 W para os PV's do branco, espelho e rastreador, respectivamente.

Para cada valor de irradiação solar existe apenas um “ponto de máxima potência” ou MPP (*Maximum Power Point*). O valor da potência gerada pelos painéis depende principalmente da intensidade da radiação solar incidente na sua superfície e da temperatura

ambiente. Como esses parâmetros mudam constantemente, variações no ponto de máxima potência ocorrerão durante todo o tempo, porém, não foi objetivo deste trabalho controlar este parâmetro. A construção das curvas serviu basicamente para o cálculo do fator de forma e posterior cálculo da eficiência de cada painel.

Fica evidente, através da Figura 33, que caracteriza a curva característica do PV usado no branco, que corresponde a obtenção dos valores de corrente máxima de pico de 0,35A, tensão máxima de pico de 3,85V e o pico máximo de potência de 1,35W.

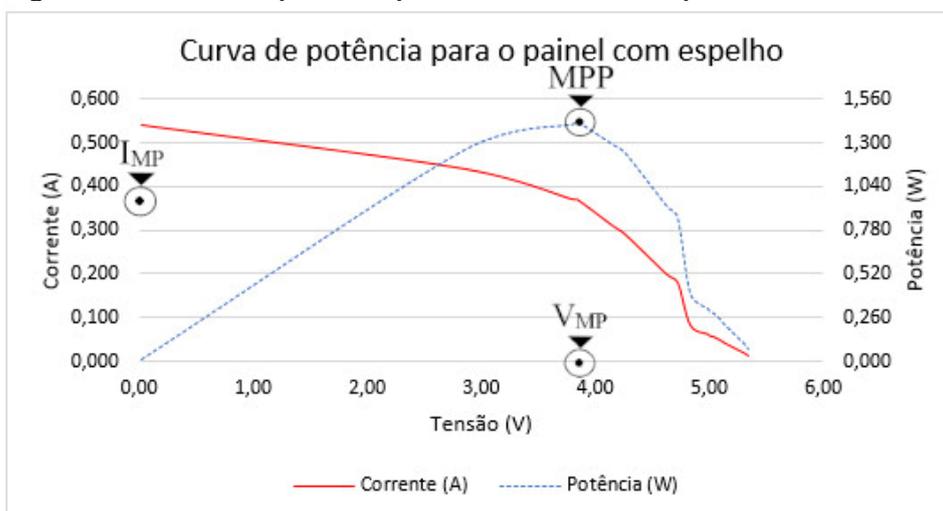
Figura 33 - Curva de potência para o PV usado no branco.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Já em relação a Figura 34, que representa o PV usado com o espelho, foi obtida a corrente máxima de pico de 0,37A, tensão máxima de pico de 3,84V e o pico máximo de potência de 1,42W.

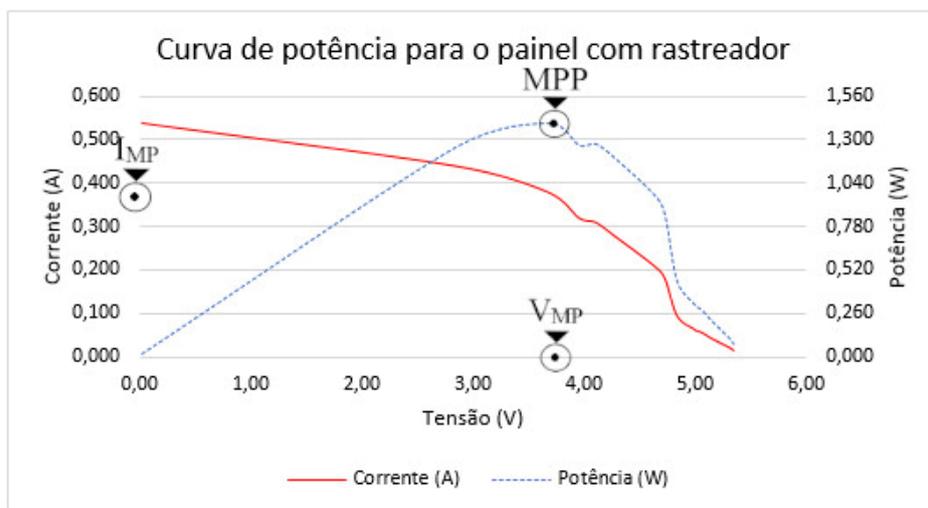
Figura 34 - Curva de potência para o PV usado no espelho.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O PV utilizado no rastreador, Figura 35, apresentou os seguintes valores medidos: corrente máxima de pico de 0,31A, tensão máxima de pico de 4,00V e o pico máximo de potência de 1,25W.

Figura 35 - Curva de potência para o PV usado no rastreador.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Estes resultados foram empregados para o dimensionamento do arranjo para a realização das leituras. O Anexo D traz as tabelas utilizadas para construção das curvas características dos três painéis.

4.2 EFICIÊNCIA DOS PV'S

De posse dos valores obtidos nas curvas características pode-se construir a Tabela 2, que apresenta os valores da eficiência de cada PV calculados. Utilizou-se as equações 2 e 3 na determinação do fator de forma e eficiência.

Tabela 2. Valores usados e resultado obtido para as eficiências.

Grandeza	PAINÉIS		
	Branco	Espelho	Rastreador
I_{sc} (A)	0,540	0,540	0,540
V_{oc} (V)	5,38	5,40	5,42
V_{mp} (V)	3,85	3,84	4,00
I_{mp} (A)	0,350	0,370	0,312
A (m ²)	0,0195	0,0195	0,0195
G (W/m ²)	561	541	535
FF	0,463823489	0,487242798	0,426404264
η	12%	13%	12%

Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

A análise dos resultados apresentados nesta tabela é de fundamental importância para o prosseguimento dos experimentos e utilização dos PV's. As eficiências precisam ser iguais ou muito próximas, caso isso não ocorresse, ter-se-ia a necessidade de troca do PV que apresentasse eficiência muito distinta dos outros. Os valores muito próximos da eficiência dos 3 painéis garantem que os resultados obtidos podem ser comparados.

4.3 POTÊNCIA DOS PV'S

As leituras para obtenção dos resultados experimentais foram realizadas nos dias 12 de abril e 04 e 05 de outubro de 2021. Foram medidos pontos de dez em dez minutos para todos os painéis, num período entre as 9 horas e as 17 horas, para o dia 12 e 9 horas às 16 horas no dia 05. No dia 04 o intervalo das leituras foi das 12 horas e 20 minutos até às 17 horas. As condições para o dia 12 eram de céu nublado, para o dia 04 de céu parcialmente nublado e para o dia 05 de céu aberto, com incidência de nuvens.

O Anexo B apresenta os gráficos com os valores da irradiação solar incidente retirados do *site* da estação meteorológica da UFFS - Campus Cerro Largo, o ID da estação é IRIOGRAN38, situada nas dependências da UFFS. Vale ressaltar, que não foi considerado os respectivos valores de temperatura ambiente durante a coleta dos dados experimentais apresentados e os valores da irradiação são apresentados para simples conferência.

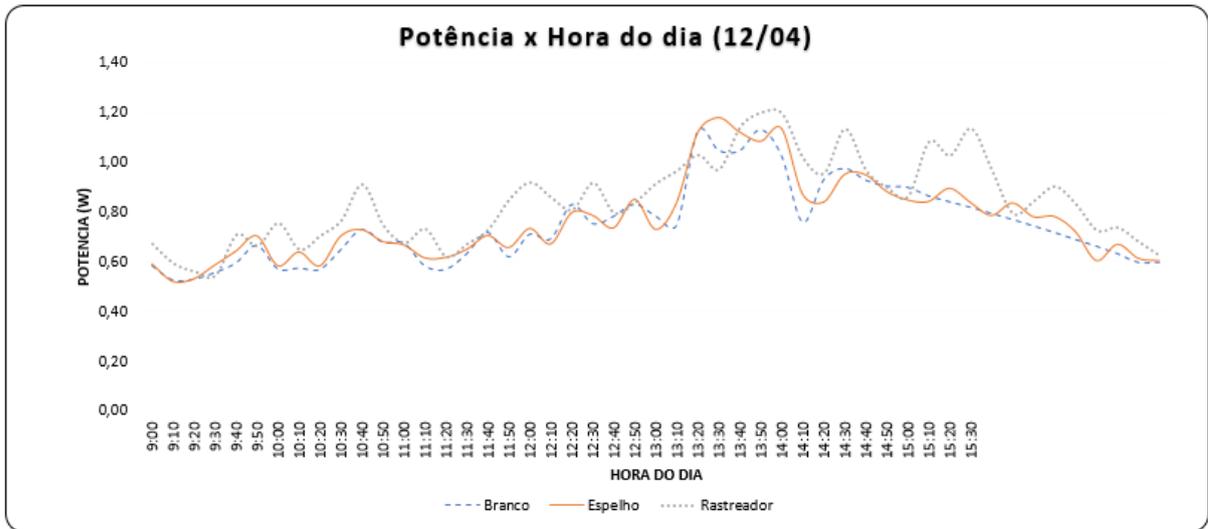
Para o dia 12 de abril as leituras foram iniciadas às 9 horas da manhã. Escolheu-se esse dia devido as condições climáticas não estarem muito favoráveis ao uso do rastreador, visto que o céu estava encoberto por nuvens.

O rastreador não responde muito bem à radiação difusa, fato observado na Figura 36, podendo caracterizar uma perda de rendimento ao invés da otimização desta. O painel com a utilização do espelho também reduz seu pouco ganho em relação ao branco, praticamente igualando-se a ele. Isto ocorre devido ao fato de o painel aumentar a eficiência de sua aplicação apenas quando há a reflexão dos raios solares e também do calor, o que provocam a excitação dos elétrons. Neste dia as médias aritméticas para potência gerada foram de 0,72W para o branco, 0,73W para o painel com espelho e 0,84W para o painel com rastreador.

Para o dia 04 de outubro, as leituras foram efetuadas apenas na parte da tarde com a presença de algumas nuvens. Podemos notar claramente, na Figura 37, que o uso do rastreador traz maiores vantagens após as 15 horas, quando o Sol já apresenta bastante inclinação em relação aos painéis fixos. Nesse momento o painel com rastreador ainda consegue manter um ângulo bastante próximo aos 90° com o Sol. Nas médias aritméticas para

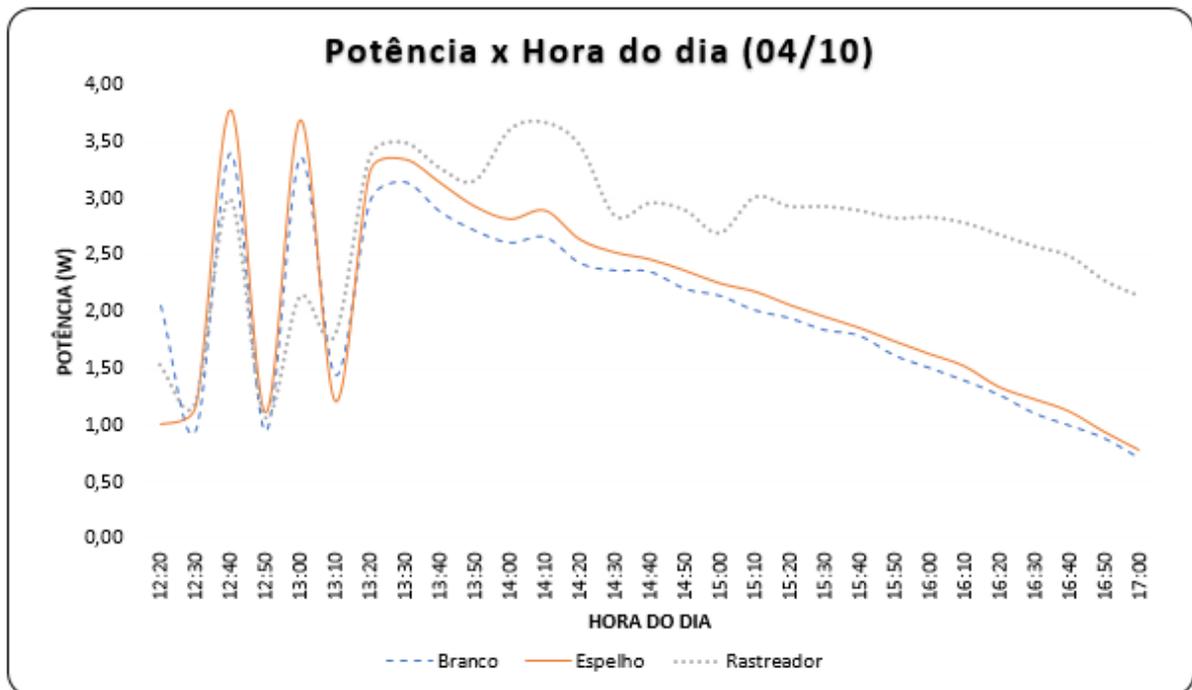
o dia 04 temos 2,02W para o branco, 2,05W para o painel com espelho e 2,85W para o painel com rastreador.

Figura 36 - Gráfico de potência versus hora para o dia 12/04.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 37- Gráfico para as potências do dia 04/10.

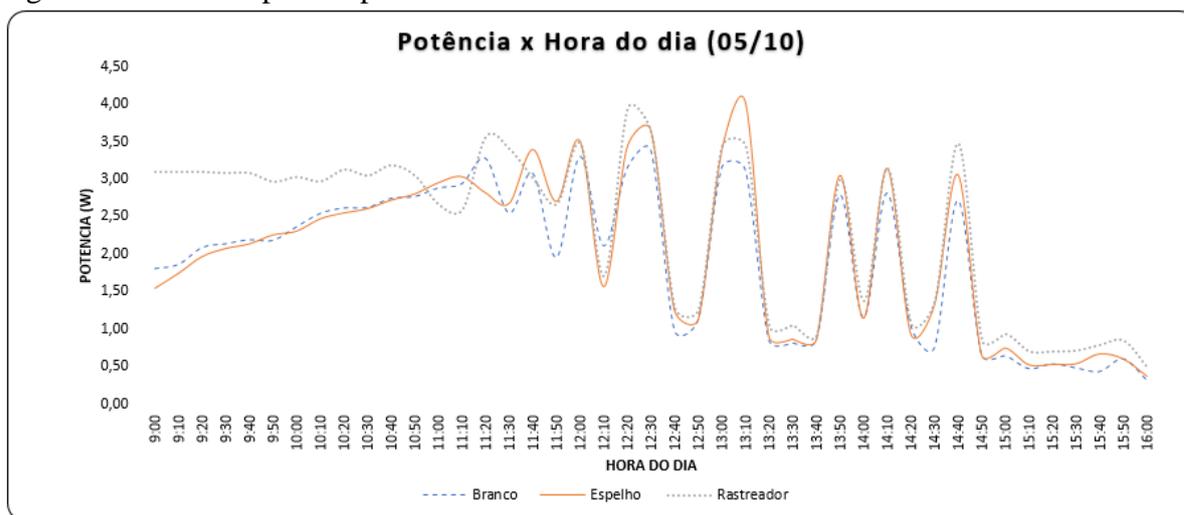


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Já no dia 05 as leituras iniciaram as 9:00 horas da manhã, sob condição de céu limpo. Logo pela manhã, conforme Figura 38, pode-se observar um desempenho bem superior do painel com rastreador, produzindo 3,10W, contra 1,81W do branco e 1,54W do painel com

espelho. Aproveita-se esta oportunidade para falar a respeito também do fato do painel com espelho apresentar um valor de geração menor que o branco, em determinadas leituras. Isso pode ter acontecido devido ao fato de não ser possível a realização das leituras no mesmo instante de tempo, apesar do método utilizado ter reduzido consideravelmente o tempo entre leituras os fatores externos como rajadas de vento, movimento dos gases na atmosfera ou, segundo Betts (2004) da própria alteração do espectro solar podem causar mudanças na geração em instantes.

Figura 38 – Gráfico para as potências do dia 05/10.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Na parte da tarde houve o surgimento de muitas nuvens, causando muitas variações na quantidade de energia gerada. Mesmo o painel com rastreador mantendo uma geração média maior, em relação aos outros dois painéis, reduziu consideravelmente a diferença de geração, fato que pode ser explicado pela redução do ângulo do Sol para com os sistemas fixos, o que causa maior incidência de raios solares sobre estes, aumentando assim sua geração. As médias finais de geração fecharam em 2,97W para o painel com rastreador, 2,13W para o painel com espelho e 2,14W para o branco.

A Tabela 3 apresenta os valores das médias para cada dia de leitura e o Anexo C apresenta todos os dados coletados. Concluímos, através dos dados expostos, que a utilização dos meios para aumento da eficiência da geração de energia fotovoltaica propostos neste trabalho, apesar de ocasionar, em determinadas situações a perda de eficiência de geração, podem servir muito bem aos seus propósitos.

Tabela 3 - Médias para a potência de geração em todos os dias de leitura.

Data	Branco (W)	Painel com espelho (W)	Painel com rastreador (W)
12/04/2021	0,72	0,73	0,84
04/10/2021	2,02	2,05	2,85
15/10/2021	2,14	2,13	2,97
MÉDIA TOTAL	1,63	1,64	2,22

Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta deste trabalho foi a de verificar a potência de energia elétrica gerada por painéis fotovoltaicos quando estes fazem uso de recursos além da simples observância do ângulo recomendado para maior aproveitamento (ângulo da latitude do local de instalação). Utilizou-se uma configuração que abrangia três painéis, o primeiro, chamado branco, com estrutura fixa, com uma inclinação de 28° da face virada para o norte. A função deste foi a de adquirir valores de referência para o possível aumento de geração por parte dos outros dois. Outro painel fez uso de um espelho acoplado a sua extremidade na face virada ao norte. A função do espelho foi a de refletir os raios solares, que incidiam sobre ele, para o painel, aumentando assim a quantidade de energia solar disponível para conversão em energia elétrica. O último painel, o único móvel dos três, fez uso de um rastreador solar de dois eixos, proporcionando constante atualização do ângulo entre os raios solares incidentes e a face do painel fotovoltaico abrangido pelo rastreador.

Ao final pode-se estimar o aumento de cada um dos dois sistemas de geração em relação ao branco. Para o sistema que fez uso do rastreador obteve-se um aumento na ordem de 36%, já para o uso do espelho este valor foi de apenas 0,6%.

Uma das principais dificuldades enfrentadas durante a realização da pesquisa estavam atrelados ao surgimento do vírus SARS-COVID19 que, devido à sua alta taxa de transmissão, ocasionou a suspensão das aulas. Como era um cenário muito incerto, as atividades acadêmicas foram suspensas totalmente durante quase um ano, retornando após na forma de aulas e trabalhos on-line. Foi neste cenário que ocorreu o desenvolvimento deste trabalho.

Relacionado às práticas propriamente ditas, um dos desafios foi adaptar o trabalho para as ferramentas disponíveis. Neste quesito foi desenvolvida uma sistemática baseada em trabalhos já realizados nesta área e disponíveis para consulta. Para construção das curvas características o método utilizado foi o mais simples conhecido até então, fazendo uso de um amperímetro, um voltímetro e uma resistência variável, um potenciômetro de giro, neste caso. Após queimar dois ou três potenciômetros descobriu-se que era necessário um potenciômetro que suportasse a potência gerada pelos painéis estudados, no caso, que suportasse mais de 2,5W.

Durante os testes iniciais, ainda em laboratório, observou-se que qualquer mudança, mesmo que em pequena escala, associada a algum dos parâmetros relacionados à geração de energia elétrica pelos painéis, ocasionava também mudança na potência gerada. Mais tarde, já

a campo, o fator do cobrimento do Sol pelas nuvens evidenciou ainda mais a mudança de potência por fatores externos à leitura. A partir disto passou-se a buscar meios para diminuir o tempo entre as leituras da corrente e tensão dos três arranjos, para reduzir ao máximo a influência de algum fator externo nos dados obtidos. Um dispositivo com chaves, montado especialmente para a extração dos dados de tensão e corrente, mostrou-se o meio mais eficiente para redução destes intervalos.

O arranjo dos dispositivos denominados *LDR's* também influenciou sobre os resultados obtidos. O anteparo utilizado para o bloqueio da luz afim de alterar a resistência do LDR sombreado mostrou-se bastante ineficiente, deixando o painel, por vezes, parado por muito tempo. Um meio de melhorar isto seria a utilização de uma barreira mais fechada, garantindo assim um melhor alinhamento com os raios solares.

O uso de algum aparelho que permitisse a leitura dos parâmetros de geração ao mesmo tempo nos três painéis também traria uma melhor confiabilidade, e até alguma alteração, aos resultados obtidos.

No demais, foi uma experiência enriquecedora, que trouxe como frutos um considerável conhecimento sobre os meios e mecanismos existentes no que tange à obtenção de energia elétrica utilizando este rico recurso chamado Sol.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL, **Energia solar 3.** Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)> Acessado em 18/08/2020.

BAKOS, G. C., **Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement.** Renewable Energy, v.31, p. 2411- 2421, 2006.

BETTS, Thomas R., 2019. **Investigation of Photovoltaic Device Operation Under Varying Spectral Conditions**, p 37-67, 2004. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/2134/7720>>. Acessado em: 10/08/2021

BRINKWORTH, B. J. **Energia Solar para El hombre.** Tradução: Rafael Fontes. Editora H. Blume Ediciones. Espanha, 1981.

BIOCHOSSI, F.; LAMOUNIER, E.; CARDOSO, A. ALBUQUERQUE, F. L. DE. **Utilizando Técnicas de Realidade Virtual Para o Estudo da Conversão de Energia Solar em Energia Elétrica.** 2016. Disponível em: <http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/CLAGTEE2003/Papers/RNCSEP%20B-074.pdf> Acesso: 06/05/2021.

BOCZKO, R.. **Sistema local de coordenadas**, IAG - USP, 2009.

BÜHLER, Alexandre José. **Estudo de técnicas de determinação experimental e pós processamento de curvas características de módulos fotovoltaicos.** 2011. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CANTOR, Guillermo Andres Rodriguez et al. **Influência dos fatores climáticos no desempenho de módulos fotovoltaicos em regiões de clima tropical.** 2017.

CARVALHO, D. R., **Desenvolvimento de um rastreador solar biaxial** – Viçosa, MG, 2011. 42f

CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito), **“Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos”**, 2014.

CORNELIUS, R. G.; MAIA, A. C.; BENDER, V. C.; KAEHLER, J. W. M.. **Otimização de sistemas de geração fotovoltaicos através da reflexão de espelhos**. Anais do 8º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão. Universidade Federal do Pampa, 2016. 2 p.

DANTAS, S. G.; POMPERMAYER, F. M.; Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico, IPEA, pg 7, 9, 2018.

FOCUSOLAR. **Potencial Solar Brasileiro**. Focusolar, 2015. Disponível em: <http://focusolar.com.br/potencial-solar-brasileiro/> Acesso em: 20 setembro de 2021.

GAGLIANO, S.; SAVALLI, N.; TINA, G.; PITRONE, N. **Two-axis sun tracking system: design and simulation**, Eurosun 2006 Glasgow, UK, June 27–30 (2006).

GHENSEV, Almir. **Materiais e processos de fabricação de células fotovoltaicas**. Monografia (Especialização) - Curso de Pós-graduação Lato Sensu em Fontes Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 154 f., 2006.

GUIA TÉCNICO; Energia fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projeto e instalação. Jan 2014. Disponível em: <http://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>. Acesso em: agosto de 2021.

JARDIM, C. da S.; SALAMONI, I.; RÜTHER, R.; KNOB, P.; DINIZ, A. S. C.; **O potencial dos sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica em áreas urbanas: dois estudos de caso**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2004. 12 p.

Kerosol Soluções em energia solar. Disponível em: <https://www.kerosol.com.br/produtos/inversor-solar-fotovoltaico/>. Acessado em 10/09/2020.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, B. E.; Estudo comparativo da confiabilidade de estimativas de irradiação solar para o sudeste brasileiro obtidas a partir de dados de satélite e por interpolação/extrapolação de dados de superfície. Revista Brasileira de Geofísica, São José dos Campos, v. 29, n. 2, 2011.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. P. S. O aproveitamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geostacionário: o projeto SWERA. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.26, n.2, p. 145-159, 2004.

MARTINS, F. O., **Seguidor solar de dois eixos com motores passo-a-passo**, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Energias Renováveis, Faculdade de Ciência e Tecnologia – Universidade Nova – Lisboa, Portugal, 2016.

MOUSAZADEH, H.; KEYHANI, A.; JAVADI, A.; MOBILI, H.; ABRINIA, K.; SHARIFI, A. **A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output**. Renewable and Sustainable Energy Reviews v 13, pg. 1800-1818, 2009.

MORAIS, Josué Lima. **Sistemas Fotovoltaicos, da Teoria à Prática**. Porto: Editora Edição de Autor, 2009.

PEREIRA E.B.; MARTINS F.R.; ABREU S.L.; RUTHER R.; AMARANTE O.; CHAN CS & LIMA E., 2008. Solar and Wind Energy Brazilian Report. INPE, São José dos Campos, 104 pp.

PINHO, J. T.; GALDINO, M.A.. Manual De Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos. CEPTEL-DTE-CRESESB, Rio de Janeiro, 2014.

PIOTROWSKI Leonardo J.; VAZ Émerson F.; FARRET Felix A.. **Otimização da Geração de Energia Elétrica Fotovoltaica pelo Controle da Temperatura**, 2018, 6 pg, UFSM, Santa Maria. Disponível em: < https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/553/2020/07/91657-field_submission_abstract_file2.pdf>. Acessado em: 02/12/2020.

RAMOS, Cristina de Moura. **Procedimentos para Caracterização e Qualificação de Módulos Fotovoltaicos**. 2006. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa Pósgraduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

REN21. **Renewables 2019 global status report – Chapter 1 – Global Overview**. Disponível em < https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter_01/chapter_01/ > Acessado em 15/11/2020.

SAMPAIO, Priscila Gonçalves Vasconcelos. **Prospecção tecnológica de células fotovoltaicas para energia solar**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Pós-Graduação em Engenharia da Produção, Natal, RN, 2015.

SANTOS, José Silva dos. **Óptica geométrica - a construção de conceitos através da experimentação**. Mestrado nacional profissional em ensino de física, Volta Redonda, RJ, 2017.

SIGA, Sistema de Informações de Geração da ANEEL. Disponível em <<https://www.aneel.gov.br/siga>>. Acessado em 12/09/2020.

SILVA, Alex de Lima e. **Protótipo de um sistema fotovoltaico auxiliar com armazenamento de energia elétrica. 2014.** 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Instituto de Tecnologia Para O Desenvolvimento, Curitiba, 2014.

SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E.; LAMAS, W. de Q., The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 20, pg. 133-141, 2013.

SPENCER, J. W.. **Fourier Series Representation of the Position of the Sun**, Vol. 2, 1971, p. 172.

SWART, J. W.. **Conceitos Básicos Para Semicondutores**. UNICAMP. Campinas, 2011.

VILLALVA Marcelo Gradella. **Entendendo as curvas IV e PV dos módulos fotovoltaicos**, 2019.

ANEXO A – PROGRAMAÇÃO DO RASTREADOR SOLAR/ARDUINO

```

#include <Servo.h>      // Inclui a Biblioteca

Servo Horizontal;      // Inicia o Servo da Horizontal
Servo Vertical;        // Inicia o Servo da Vertical

int ServoHorizontal = 90; // Estabelece valor fixo à ServoHorizontal
int ServoVertical = 90;  // Estabelece valor fixo à ServoVertical

int LimiteServoHorizontalMax = 180; // Estabelece os limites de rotação
int LimiteServoHorizontalMin = 65;  // estabelece os limites de rotação

int LimiteServoVerticalMax = 120;   // Estabelece os limites de rotação
int LimiteServoVerticalMin = 15;    // Estabelece os limites de rotação

int LDRDC = A0;      // Inicia LDRDC no pino A0
int LDRDB = A1;      // Inicia LDRDB no pino A1
int LDREC = A2;      // Inicia LDREC no pino A2
int LDREB = A3;      // Inicia LDREB no pino A3

void setup() {
  Horizontal.attach(3); // Inicia servo Horizontal na porta D3
  Vertical.attach(5);   // Inicia servo Vertical na porta D5

  Horizontal.write(180); // Inicia servo Horizontal na posição 180
  Vertical.write(45);    // Inicia servo Horizontal na posição 45

  delay(3000);          // Aguarda 3 segundos

```

```
}

```

```
void loop() {

    int LDC = analogRead(LDRDC); // Leitura Analógica do LDR Direita Cima
    int LEC = analogRead(LDREC); // Leitura Analógica do LDR Esquerda Cima
    int LDB = analogRead(LDRDB); // Leitura Analógica do LDR Direita Baixo
    int LEB = analogRead(LDREB); // Leitura Analógica do LDR Esquerda Baixo
    int tol = 50;

    int ValorSup = (LDC + LEC) / 2; // Média da leitura dos LDR superior
    int ValorInf = (LDB + LEB) / 2; // Média da leitura dos LDR inferior
    int ValorDir = (LDC + LDB) / 2; // Média da leitura dos LDR da direita
    int ValorEsq = (LEC + LEB) / 2; // Média da leitura dos LDR da esquerda
    int DifSupInf = ValorSup - ValorInf; // Diferença entre LED superior e inferior
    int DifDirEsq = ValorDir - ValorEsq; // Diferença entre LED direita e esquerda

    /*-----*/

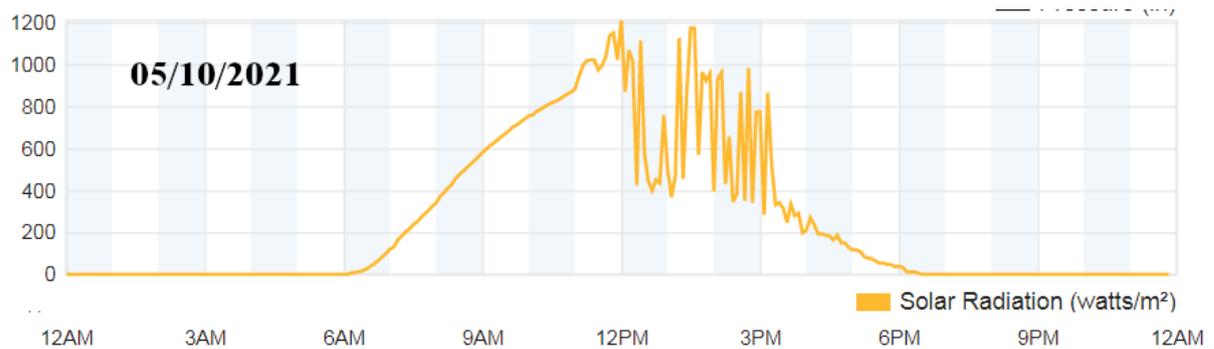
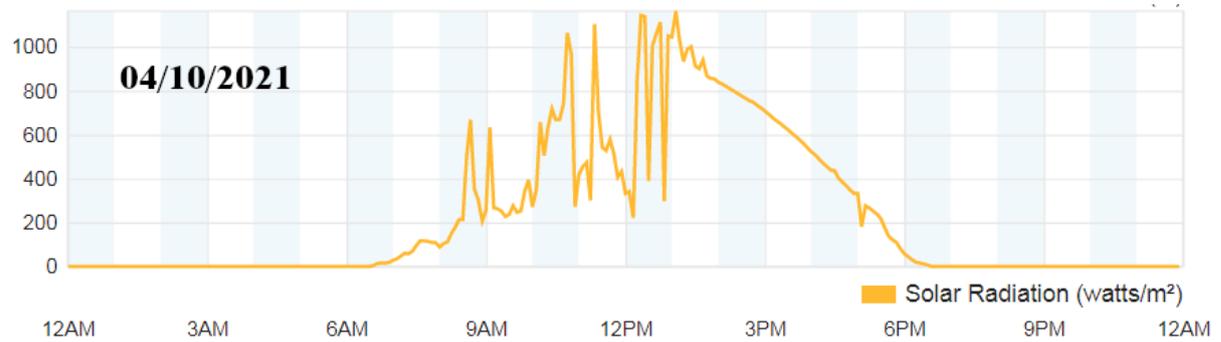
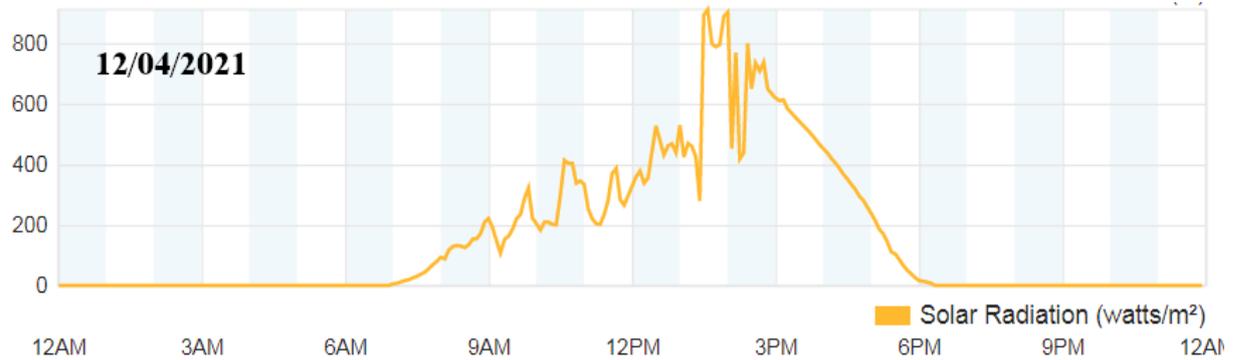
    // Realiza a leitura e executa os movimentos referente ao Servo Vertical
    if (-1 * tol > DifSupInf || DifSupInf > tol) {
        if (ValorSup > ValorInf) {
            ServoVertical = ++ServoVertical;
            if (ServoVertical > LimiteServoVerticalMax) {
                ServoVertical = LimiteServoVerticalMax;
            }
        }
    }
    else if (ValorSup < ValorInf) {
        ServoVertical = --ServoVertical;
        if (ServoVertical < LimiteServoVerticalMin) {

```

```

    ServoVertical = LimiteServoVerticalMin;
} .....
}
Vertical.write(ServoVertical);
}
// Realiza a leitura e executa os movimentos referente ao Servo Horizontal
if (-1 * tol > DifDirEsq || DifDirEsq > tol) {
    if (ValorDir > ValorEsq) {
        ServoHorizontal = --ServoHorizontal;
        if (ServoHorizontal < LimiteServoHorizontalMin) {
            ServoHorizontal = LimiteServoHorizontalMin;
        }
    }
    else if (ValorDir < ValorEsq) {
        ServoHorizontal = ++ServoHorizontal;
        if (ServoHorizontal > LimiteServoHorizontalMax) {
            ServoHorizontal = LimiteServoHorizontalMax;
        }
    }
    else if (ValorDir = ValorEsq) {
    }
    Horizontal.write(ServoHorizontal);
}
delay(100); // Aguarda 0,1 segundo
}

```

ANEXO B – GRÁFICOS PARA A RADIAÇÃO DOS DIAS DE MEDIÇÃO.

Dados retirados do site da Estação Meteorológica do Campus da UFFS - Cerro Largo.

<https://www.wunderground.com/dashboard/pws/IRIOGRAN38#history>

ANEXO C – TABELAS COM AS LEITURAS DOS DIAS DE MEDIÇÃO

		Largura painel (m): 0,13		Comprimento Painel (m):								
Leituras realizadas no dia 04/10/2021												
n	HORA	Irradiação solar (W/m2)	Branco			Espelho			Rastreador			
			Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	
1	12:20	1143	5,42	0,38	2,06	5,56	0,18	1,00	5,50	0,28	1,54	
2	12:30	388	5,32	0,18	0,96	5,51	0,21	1,16	5,43	0,22	1,19	
3	12:40	1062	5,67	0,60	3,40	5,63	0,67	3,77	5,77	0,52	3,00	
4	12:50	297	5,30	0,18	0,95	5,52	0,20	1,10	5,41	0,20	1,08	
5	13:00	1044	5,70	0,59	3,36	5,67	0,65	3,69	5,78	0,37	2,14	
6	13:10	1027	5,56	0,26	1,45	5,23	0,23	1,20	5,61	0,32	1,80	
7	13:20	988	5,53	0,54	2,99	5,49	0,59	3,24	5,62	0,60	3,37	
8	13:30	912	5,62	0,56	3,15	5,56	0,60	3,34	5,73	0,61	3,50	
9	13:40	939	5,55	0,52	2,89	5,49	0,57	3,13	5,64	0,58	3,27	
10	13:50	856	5,55	0,49	2,72	5,51	0,53	2,92	5,64	0,56	3,16	
11	14:00	838	5,56	0,47	2,61	5,51	0,51	2,81	5,64	0,64	3,61	
12	14:10	819	5,55	0,48	2,66	5,55	0,52	2,89	5,65	0,65	3,67	
13	14:20	801	5,53	0,44	2,43	5,48	0,48	2,63	5,60	0,62	3,47	
14	14:30	760	5,51	0,43	2,37	5,47	0,46	2,52	5,59	0,51	2,85	
15	14:40	754	5,62	0,42	2,36	5,58	0,44	2,46	5,70	0,52	2,96	
16	14:50	733	5,52	0,40	2,21	5,48	0,43	2,36	5,58	0,52	2,90	
17	15:00	707	5,65	0,38	2,15	5,61	0,40	2,24	5,74	0,47	2,70	
18	15:10	677	5,61	0,36	2,02	5,57	0,39	2,17	5,69	0,53	3,02	
19	15:20	650	5,57	0,35	1,95	5,55	0,37	2,05	5,64	0,52	2,93	
20	15:30	622	5,59	0,33	1,84	5,57	0,35	1,95	5,64	0,52	2,93	
21	15:40	591	5,61	0,32	1,80	5,61	0,33	1,85	5,68	0,51	2,90	
22	15:50	559	5,59	0,29	1,62	5,59	0,31	1,73	5,66	0,50	2,83	
23	16:00	522	5,60	0,27	1,51	5,59	0,29	1,62	5,68	0,50	2,84	
24	16:10	489	5,60	0,25	1,40	5,61	0,27	1,51	5,69	0,49	2,79	
25	16:20	454	5,54	0,23	1,27	5,54	0,24	1,33	5,59	0,48	2,68	
26	16:30	436	5,56	0,20	1,11	5,56	0,22	1,22	5,61	0,46	2,58	
27	16:40	383	5,58	0,18	1,00	5,58	0,20	1,12	5,67	0,44	2,49	
28	16:50	348	5,58	0,16	0,89	5,51	0,17	0,94	5,56	0,41	2,28	
29	17:00	332	5,53	0,13	0,72	5,54	0,14	0,78	5,64	0,38	2,14	
MÉDIAS					2,02			2,05			2,85	

Largura painel (m): 0,13 Comprimento Painel (m):											
Leituras realizadas no dia 12/04/2021											
n	HORA	Irradiação solar (W/m2)	Branco			Espelho			Rastreador		
			Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
1	9:00	221	5,36	0,11	0,59	5,38	0,11	0,59	5,61	0,12	0,67
2	9:10	148	5,23	0,10	0,53	5,21	0,10	0,52	5,42	0,11	0,60
3	9:20	153	5,31	0,10	0,53	5,32	0,10	0,53	5,64	0,10	0,56
4	9:30	186	5,35	0,10	0,56	5,34	0,11	0,59	5,48	0,10	0,55
5	9:40	234	5,36	0,11	0,60	5,36	0,12	0,64	5,47	0,13	0,71
6	9:50	322	5,38	0,12	0,67	5,42	0,13	0,70	5,55	0,12	0,67
7	10:00	204	5,32	0,11	0,57	5,31	0,11	0,58	5,41	0,14	0,76
8	10:10	209	5,32	0,11	0,58	5,33	0,12	0,64	5,43	0,12	0,65
9	10:20	202	5,31	0,11	0,57	5,31	0,11	0,58	5,44	0,13	0,71
10	10:30	301	5,39	0,12	0,65	5,42	0,13	0,70	5,49	0,14	0,77
11	10:40	403	5,62	0,13	0,73	5,61	0,13	0,73	5,70	0,16	0,91
12	10:50	338	5,68	0,12	0,68	5,68	0,12	0,68	5,75	0,13	0,75
13	11:00	334	5,55	0,12	0,68	5,57	0,12	0,67	5,65	0,12	0,68
14	11:10	220	5,64	0,10	0,59	5,60	0,11	0,62	5,65	0,13	0,73
15	11:20	202	5,32	0,11	0,57	5,62	0,11	0,62	5,66	0,11	0,62
16	11:30	281	5,35	0,12	0,63	5,42	0,12	0,65	5,62	0,12	0,67
17	11:40	387	5,40	0,13	0,72	5,43	0,13	0,71	5,63	0,13	0,73
18	11:50	265	5,36	0,12	0,62	5,48	0,12	0,66	5,68	0,15	0,85
19	12:00	378	5,41	0,13	0,71	5,65	0,13	0,73	5,75	0,16	0,92
20	12:10	355	5,60	0,12	0,69	5,60	0,12	0,67	5,73	0,15	0,86
21	12:20	527	5,42	0,15	0,83	5,70	0,14	0,80	5,79	0,14	0,81
22	12:30	431	5,32	0,14	0,75	5,62	0,14	0,79	5,74	0,16	0,92
23	12:40	468	5,67	0,14	0,78	5,67	0,13	0,74	5,70	0,14	0,80
24	12:50	529	5,30	0,16	0,83	5,32	0,16	0,85	5,61	0,15	0,84
25	13:00	469	5,60	0,14	0,78	5,62	0,13	0,73	5,73	0,16	0,92
26	13:10	424	5,56	0,13	0,75	5,59	0,15	0,84	5,69	0,17	0,97
27	13:20	893	5,53	0,20	1,12	5,60	0,20	1,12	5,72	0,18	1,03
28	13:30	798	5,62	0,19	1,05	5,62	0,21	1,18	5,72	0,17	0,97
29	13:40	796	5,55	0,19	1,05	5,61	0,20	1,12	5,71	0,20	1,14
30	13:50	902	5,70	0,20	1,13	5,71	0,19	1,08	5,71	0,21	1,20
31	14:00	770	5,65	0,18	1,03	5,68	0,20	1,14	5,69	0,21	1,19
32	14:10	438	5,43	0,14	0,76	5,45	0,16	0,87	5,65	0,18	1,02
33	14:20	650	5,40	0,17	0,93	5,60	0,15	0,84	5,63	0,17	0,96
34	14:30	708	5,51	0,18	0,98	5,60	0,17	0,95	5,67	0,20	1,13
35	14:40	649	5,62	0,17	0,93	5,59	0,17	0,95	5,69	0,17	0,97
36	14:50	619	5,52	0,16	0,90	5,52	0,16	0,88	5,62	0,16	0,90
37	15:00	613	5,65	0,16	0,90	5,66	0,15	0,85	5,76	0,15	0,86
38	15:10	570	5,61	0,15	0,87	5,62	0,15	0,84	5,70	0,19	1,08
39	15:20	541	5,57	0,15	0,84	5,60	0,16	0,90	5,71	0,18	1,03
40	15:30	513	5,59	0,15	0,82	5,59	0,15	0,84	5,68	0,20	1,14
41	15:40	483	5,61	0,14	0,80	5,62	0,14	0,79	5,69	0,17	0,97
42	15:50	452	5,59	0,14	0,77	5,58	0,15	0,84	5,68	0,14	0,80
43	16:00	420	5,60	0,13	0,75	5,58	0,14	0,78	5,64	0,15	0,85
44	16:10	387	5,60	0,13	0,72	5,59	0,14	0,78	5,65	0,16	0,90
45	16:20	352	5,54	0,12	0,69	5,55	0,13	0,72	5,55	0,15	0,83
46	16:30	318	5,56	0,12	0,66	5,50	0,11	0,61	5,60	0,13	0,73
47	16:40	281	5,58	0,11	0,63	5,59	0,12	0,67	5,69	0,13	0,74
48	16:50	237	5,58	0,11	0,60	5,58	0,11	0,61	5,68	0,12	0,68
49	17:00	332	5,38	0,11	0,60	5,50	0,11	0,61	5,70	0,11	0,63
MÉDIAS					0,72			0,73			0,84

Largura painel (m): 0,13 Comprimento Painel (m):												
Leituras realizadas no dia 05/10/2021												
n	HORA	Irradiação solar (W/m2)	Branco			Espelho			Rastreador			
			Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	
1	9:00	580	5,84	0,31	1,81	5,32	0,29	1,54	5,84	0,53	3,10	
2	9:10	613	5,83	0,32	1,87	5,62	0,31	1,74	5,84	0,53	3,10	
3	9:20	642	5,81	0,36	2,09	5,78	0,34	1,97	5,84	0,53	3,10	
4	9:30	671	5,79	0,37	2,14	5,76	0,36	2,07	5,81	0,53	3,08	
5	9:40	703	5,78	0,38	2,20	5,77	0,37	2,13	5,81	0,53	3,08	
6	9:50	726	5,76	0,38	2,19	5,78	0,39	2,25	5,81	0,51	2,96	
7	10:00	754	5,78	0,41	2,37	5,76	0,40	2,30	5,82	0,52	3,03	
8	10:10	775	5,79	0,44	2,55	5,74	0,43	2,47	5,82	0,51	2,97	
9	10:20	795	5,70	0,46	2,62	5,66	0,45	2,53	5,79	0,54	3,13	
10	10:30	817	5,59	0,47	2,63	5,54	0,47	2,60	5,64	0,54	3,05	
11	10:40	833	5,73	0,48	2,75	5,66	0,48	2,72	5,79	0,55	3,18	
12	10:50	858	5,66	0,49	2,77	5,60	0,50	2,80	5,53	0,55	3,04	
13	11:00	881	5,78	0,50	2,89	5,67	0,52	2,95	5,78	0,46	2,66	
14	11:10	993	5,56	0,53	2,95	5,51	0,55	3,03	5,63	0,46	2,59	
15	11:20	1020	5,57	0,59	3,29	5,52	0,51	2,82	5,66	0,63	3,57	
16	11:30	972	5,55	0,46	2,55	5,57	0,48	2,67	5,57	0,61	3,40	
17	11:40	1035	5,61	0,55	3,09	5,56	0,61	3,39	5,67	0,53	3,01	
18	11:50	1148	5,59	0,35	1,96	5,51	0,49	2,70	5,67	0,47	2,66	
19	12:00	1209	5,61	0,59	3,31	5,56	0,63	3,50	5,69	0,61	3,47	
20	12:10	1067	5,57	0,38	2,12	5,40	0,29	1,57	5,50	0,31	1,71	
21	12:20	424	5,64	0,56	3,16	5,62	0,61	3,43	5,72	0,69	3,95	
22	12:30	573	5,75	0,59	3,39	5,70	0,64	3,65	5,82	0,62	3,61	
23	12:40	399	5,45	0,18	0,98	5,43	0,23	1,25	5,53	0,23	1,27	
24	12:50	434	5,62	0,20	1,12	5,61	0,20	1,12	5,71	0,22	1,26	
25	13:00	501	5,65	0,56	3,16	5,63	0,60	3,38	5,74	0,60	3,44	
26	13:10	466	5,49	0,57	3,13	5,83	0,69	4,02	5,72	0,60	3,43	
27	13:20	455	5,30	0,16	0,85	5,27	0,17	0,90	5,40	0,19	1,03	
28	13:30	1172	5,42	0,15	0,81	5,40	0,16	0,86	5,50	0,19	1,05	
29	13:40	568	5,66	0,15	0,85	5,70	0,15	0,86	5,69	0,16	0,91	
30	13:50	921	5,59	0,50	2,80	5,54	0,55	3,05	5,65	0,53	2,99	
31	14:00	394	5,24	0,22	1,15	5,20	0,22	1,14	5,48	0,25	1,37	
32	14:10	960	5,64	0,50	2,82	5,61	0,56	3,14	5,71	0,55	3,14	
33	14:20	656	5,22	0,20	1,04	5,20	0,18	0,94	5,32	0,20	1,06	
34	14:30	383	5,36	0,14	0,75	5,48	0,24	1,32	5,48	0,25	1,37	
35	14:40	350	5,67	0,48	2,72	5,66	0,54	3,06	5,60	0,62	3,47	
36	14:50	339	5,47	0,12	0,66	5,46	0,12	0,66	5,59	0,15	0,84	
37	15:00	773	5,36	0,12	0,64	5,35	0,14	0,75	5,47	0,17	0,93	
38	15:10	865	5,24	0,09	0,47	5,25	0,10	0,53	5,37	0,13	0,70	
39	15:20	330	5,34	0,10	0,53	5,30	0,10	0,53	5,36	0,13	0,70	
40	15:30	313	5,34	0,09	0,48	5,38	0,10	0,54	5,45	0,13	0,71	
41	15:40	334	5,41	0,08	0,43	5,58	0,12	0,67	5,60	0,14	0,78	
42	15:50	290	5,47	0,11	0,60	5,47	0,11	0,60	5,60	0,15	0,84	
43	16:00	211	5,28	0,06	0,32	5,32	0,07	0,37	5,34	0,09	0,48	
MÉDIAS					2,14	2,13			2,97			

ANEXO D – TABELAS DOS VALORES LIDOS PARA AS CURVAS CARACTERÍSTICAS.

Painel Branco			Painel com Espelho			Painel com Rastreador		
Data: 04/10/2021			Data: 04/10/2021			Data: 04/10/2021		
Hora: 14:40			Hora: 14:50			Hora: 14:50		
I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	Irradiação (W/m ²)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	Irradiação (W/m ²)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	Irradiação (W/m ²)
0,540	5,38	561	0,540	5,40	541	0,540	5,42	541
Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
0,03	0,540	0,016	0,02	0,540	0,011	0,02	0,540	0,011
0,18	0,538	0,097	2,85	0,440	1,254	2,63	0,431	1,134
2,80	0,460	1,288	3,80	0,370	1,406	3,20	0,371	1,187
3,30	0,400	1,320	3,84	0,370	1,421	4,00	0,312	1,248
3,85	0,350	1,348	4,15	0,310	1,287	4,12	0,300	1,236
4,07	0,310	1,262	4,26	0,290	1,235	4,20	0,278	1,168
4,57	0,200	0,914	4,62	0,200	0,924	4,50	0,220	0,990
4,65	0,180	0,837	4,72	0,180	0,850	4,60	0,201	0,925
4,72	0,110	0,519	4,83	0,083	0,401	4,62	0,190	0,878
4,86	0,070	0,340	4,98	0,063	0,314	5,10	0,100	0,510
4,91	0,063	0,309	5,00	0,059	0,295	5,19	0,060	0,311
4,96	0,056	0,278	5,04	0,056	0,282	5,15	0,056	0,288
5,01	0,050	0,251	5,09	0,049	0,249	5,29	0,051	0,270
5,03	0,047	0,236	5,12	0,044	0,225	5,32	0,041	0,218
5,09	0,038	0,193	5,20	0,033	0,172	5,39	0,030	0,162
5,13	0,034	0,174	5,26	0,025	0,132	5,40	0,025	0,135
5,17	0,029	0,150	5,30	0,020	0,106	5,41	0,020	0,108
5,21	0,024	0,125	5,34	0,013	0,069	5,42	0,013	0,070
5,24	0,021	0,110						
5,26	0,018	0,095						
5,30	0,014	0,074						
5,34	0,011	0,059						
Maior Potência:		1,348	Maior Potência:		1,421	Maior Potência:		1,248