

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE
CAMPUS AVANÇADO DE NATAL
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Jonathan de Oliveira Jales

**ESTUDO DO RENDIMENTO DA TENSÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO
EM RELAÇÃO AO SOMBREAMENTO**

NATAL/RN

2024

Jonathan de Oliveira Jales

**Estudo do Rendimento da Tensão do Módulo Fotovoltaico Em Relação Ao
Sombreamento**

Monografia apresentada ao Departamento de
Ciência e Tecnologia como requisito para a
obtenção do título de bacharel em Ciência e
Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Brismark Góes da
Rocha.

NATAL/RN

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do(a) autor(a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu(a) respectivo(a) autor(a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Catálogo da Publicação na Fonte.
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

J26e Jales, Jonathan de Oliveira
Estudo do Rendimento da Tensão do Módulo Fotovoltaico em Relação ao Sombreamento. / Jonathan de Oliveira Jales. - UERN _ Campus Avançado de Natal, 2024.
54p.

Orientador(a): Prof. Dr. Brismark Góes da Rocha.
Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia).
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

1. Módulos. 2. Placa Fotovoltaica. 3. Sombreamento Parcial. 4. Diodo Bypass. 5. Tensão. I. Rocha, Brismark Góes da. II. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pela Diretoria de Informatização (DINF), sob orientação dos bibliotecários do SIB-UERN, para ser adaptado às necessidades da comunidade acadêmica UERN.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de aproveitar este espaço para expressar minha gratidão a todos que me apoiaram durante minha jornada acadêmica e contribuíram para o sucesso da minha pesquisa. Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família por seu apoio inabalável, incentivo em todos os aspectos da minha vida. Sem a presença e o suporte deles, eu não teria chegado tão longe em minha jornada acadêmica.

Gostaria de agradecer também aos meus amigos Luiz Antônio Palhares e Rildo Tarquinio, que me apoiou ao longo da fase acadêmica, em flexibilizar meus horários de trabalho junto ao Tribunal de Justiça, sem apoio deles não chegaria essa fase do TCC.

À minha namorada Danielle Gregorio de Andrade, gostaria de agradecer por seu apoio incondicional, paciência e incentivo ao longo deste processo, bem como cuidar da nossa filha recém nascida, e assim, me mantivesse motivado e focado em meu objetivo.

Por fim, gostaria de agradecer ao professor Brismark Góes da Rocha, que me guiou durante todo o processo do TCC. Sua orientação, incentivo e suas sugestões críticas foram fundamentais para o desenvolvimento da minha pesquisa. Agradeço por sua paciência, profissionalismo e dedicação em me ajudar a alcançar meus objetivos acadêmicos.

Novamente, agradeço a todos que contribuíram para o sucesso deste trabalho, o qual não seria possível sem o apoio e incentivo de cada um de vocês. Obrigado!

RESUMO

A energia solar fotovoltaica é uma das principais formas de energia renovável e vem ganhando destaque nos últimos anos como uma alternativa limpa e sustentável para a geração de eletricidade. No entanto, para garantir o máximo aproveitamento da energia solar, é necessário otimizar o desempenho dos sistemas fotovoltaicas, que pode ser afetado por vários fatores externos, como a inclinação e orientação dos painéis solares, a temperatura ambiente e a presença de sombreamento, dito isso o presente trabalho busca responder a seguinte questão: como o sombreamento parcial afeta a tensão em uma placa fotovoltaica? Neste trabalho foi realizado uma análise de uma placa fotovoltaica na Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, especificamente no Campus de Natal. Cada ponto do sombreamento da placa foi realizado a medição da tensão, e assim, obtido os dados estatísticos para verificar se os sombreamentos nas células influenciam significativamente na tensão do módulo fotovoltaico. Com base no exposto acima pode concluir que o sombreamento tem grande impacto em um módulo fotovoltaico, porém com uma análise aprofundada é possível mitigar esse problema e tornar possível a utilização da energia solar mesmo sob influência de sombreamento.

Palavras-chave: Módulos, Placa fotovoltaica, sombreamento parcial, diodo *bypass*, tensão.

ABSTRACT

Photovoltaic solar energy is one of the main forms of renewable energy and has been gaining prominence in recent years as a clean and sustainable alternative for electricity generation. However, to ensure the maximum utilization of solar energy, it is necessary to optimize the performance of photovoltaic systems, which can be affected by various external factors such as the tilt and orientation of solar panels, ambient temperature, and shading. With that said, this study seeks to answer the following question: how does partial shading affect the voltage in a photovoltaic panel? In this study, an analysis of a photovoltaic panel was carried out at the State University of Rio Grande do Norte. As shading points were applied to the panel, voltage measurements were taken, and statistical data were analyzed to determine if the shading was significant. Based on the above, it can be concluded that shading has a significant impact on a photovoltaic module; however, with a thorough analysis, it is possible to mitigate this problem and make the use of solar energy possible even under shading influence.

Keywords: Modules, Photovoltaic panel, Partial shading, *Bypass diode*, Voltage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Matriz Elétrica Brasileira 2022.....	11
Figura 2: Datasheet da placa fotovoltaica RSM36-6-150P.....	13
Figura 3: Irradiância solar ao longo do dia.....	13
Figura 4: Foto retirada para módulo com as células codificadas.....	14
Figura 5: Radiação Solar nas Coordenadas da UERN.....	16
Figura 6: Foto retirada do sombreamento na C1.1 a C9.1.....	16
Figura 7: Foto retirada do sombreamento na C1.4 a C9.4.....	17
Figura 8: Foto retirada do sombreamento na C1.4 até C2.4, e C3.4.....	18
Figura 9: Estrutura do Sol.....	19
Figura 10: Média Anual de Radiação Solar no Brasil.....	21
Figura 11: Espectro de cores da radiação visível.....	23
Figura 12: Células de silício monocristalino.....	24
Figura 13: Células de silício policristalino	25
Figura 14: Células de silício amorfo	26
Figura 15: Representação esquemática referente à associação de várias células fotovoltaicas visando o aumento da potência total	28
Figura 16: Corrente elétrica em função de uma diferença de potencial aplicado em uma célula fotovoltaica	29
Figura 17: Esquema de montagem do módulo fotovoltaico.....	29
Figura 18: Vidro Fotovoltaica.....	30
Figura 19: Filme Encapsulante – EVA	31
Figura 20: <i>Backsheet</i> do módulo fotovoltaico	32
Figura 21: Caixa de Junção.....	33
Figura 22: Moldura em Alumínio Anodizado..	34
Figura 23: Corrente fluindo por um módulo com um diodo de <i>bypass</i> acionado.....	37
Figura 24: Esquema de medir tensão de Corrente Contínua.....	38
Figura 25: Medição da tensão na Placa Solar.....	39

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
2. METODOLOGIA	12
2.1 DEFINIÇÃO DE ESTUDO	12
2.2 MEDINDO AS TENSÕES	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1 SOL UMA FONTE DE ENERGIA	19
3.1.1 EFEITO FOTOVOLTAICO	22
3.1.2 RADIAÇÃO SOLAR	22
3.2 TIPOS DE PLACA	24
3.2.1 MÓDULO DE SILÍCIO MONOCRISTALINO	24
3.2.2 MÓDULO DE SILÍCIO POLICRISTALINO	25
3.2.3 MÓDULO DE SILÍCIO AMORFO	26
3.3 MÓDULO FOTOVOLTAICO	27
3.3.1 VIDRO FOTOVOLTAICA	30
3.3.2 FILME ENCAPSULANTE	31
3.3.3 <i>BACKSHEET</i> DA PLACA FOTOVOLTAICA	31
3.3.4 CAIXA DE JUNÇÃO	32
3.3.5 MOLDURA PARA PAINEL SOLAR	33
3.4 SOMBREAMENTO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	34
3.5 DIODO <i>BYPASS</i> EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	36
3.6 MEDIÇÃO DE TENSÃO	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	49

1. INTRODUÇÃO

Aumento de produção em energias renováveis, e a escassez de fontes primárias, tem incentivado inúmeras pesquisas e investimentos a fontes de energia limpa, em especial a energia fotovoltaica que é gerada por meio módulos fotovoltaicos, que convertem diretamente energia solar em energia elétrica (Coutinho, 2016).

A energia solar é uma fonte importante para uma transição de energia não renovável para energia renovável. O Brasil sobressai pela disponibilidade de energia solar, pois apresenta uma radiação média anual que varia de 4,5 a 6,5 kWh/m² diariamente, sendo por sua vez muito superior à energia solar disponível em outros países, tais como os países europeus, que apesar disso, possuem um dos maiores programas de incentivo de uso da energia solar, subsidiando a instalação desta aplicação em seus territórios (Jardim, 2007).

De acordo com dados da ABSOLAR (2023), o Brasil era um dos poucos países com capacidade instalada de energia solar superior a 10 GW. Atualmente, já possui 24 GW e aparece em 14^o lugar no ranking da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2021), sendo o único da América Latina incluído pela agência. No entanto, ainda existe uma alta barreira inicial devido ao elevado custo de implantação.

Uns dos maiores problemas que elevar o custo em um sistemas solares em uma residência é o posicionamento das placas, devido, a angulação para melhor incidência da luz solar, bem como sombreamento nas placas, esses fatores contribuem para a redução na eficiência da placa fotovoltaica, conseqüentemente, aumentando o custo do investimento para compensar a perda na geração de energia elétrica em virtude da área sombreada.

No Brasil as placas fotovoltaicas são principalmente oriundas de fábricas chinesas, assim, possui um alto custo devido à variação cambial crescimento do dólar, fazendo com que o custo no investimento se torne inviável para parte da população brasileira, de acordo com o Portal Solar (2021). A placa de energia solar, é negociada em dólares(U\$) por Watt, 60% do custo da placa fotovoltaica é a célula solar.

O sombreamento em módulos fotovoltaicos pode resultar em desigualdade de corrente entre os módulos, levando ao surgimento de hot spots e potencialmente

causando danos aos módulos. Estratégias de mitigação, como o uso de *bypass* diodes, são essenciais para evitar esses problemas" (Villalva *et al.*, 2009).

De acordo com a norma internacional IEC 61215, os módulos fotovoltaicos devem ser capazes de suportar uma temperatura máxima de operação de 85°C (185°F). Essa especificação é amplamente reconhecida na indústria solar e serve como base para o design e a fabricação de módulos fotovoltaicos.

Segundo Zomer (2010), há uma gama de vantagens em analisar o sombreamento mesmo antes da execução do projeto fotovoltaica: Conhecer o formato da sombra e sua orientação facilitando o local para instalação dos módulos; avaliar a média de sombreamento que uma superfície experimenta em um prazo de 12 meses. Fato que ajuda a análise da não utilização de irradiação pelos módulos.

Quando é feita a instalação de um projeto, o recomendado é não instalar em locais sombreados, o melhor é que o local referente a instalação do sistema, esteja livre de sombreamento, desde as primeiras horas do dia, até o pôr do sol. Pois a falta de análise de sombreamento dos módulos, pode comprometer a geração de energia elétrica (Berto, 2020). Assim sendo, esse trabalho traz a proposta em analisar a influência do sombreamento em módulo fotovoltaico.

A hipótese deste estudo é que o desempenho das placas fotovoltaicas é consideravelmente afetado em condições de sombreamento, resultando em uma redução substancial na eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica.

Justifica este estudo que a geração de energia elétrica por meio de um sistema de geração fotovoltaico pode não gerar a quantidade de energia a qual foi planejada, modo que fatores externos influenciam na produção reduzindo assim o desempenho da potência máxima. Como por exemplo: sujeira e poeira, degradação e vegetação, sombreamento parcial ou descasamento de corrente entre módulos (Zomer, 2010).

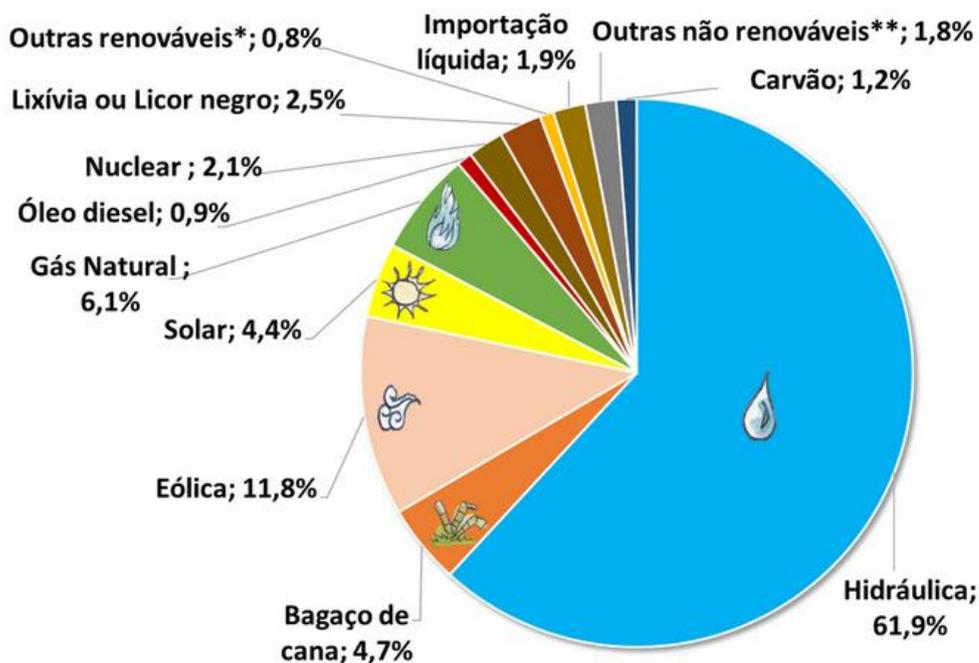
Um módulo fotovoltaico é constituído de um conjunto de células montadas sobre uma estrutura rígida e conectadas por meio de circuitos elétricos. Normalmente as células são conectadas em série para produzir tensões maiores (Villalva *et al.*, 2012).

O sombreamento em módulos fotovoltaicos conectados em série pode resultar em perdas significativas de energia, pois a corrente gerada por cada módulo é limitada

pela corrente do módulo sombreado, reduzindo assim a eficiência do módulo como um todo" (Villalva *et al.*, 2009).

Portanto, essa pesquisa é relevante, pois se sabe da necessidade de expandir o setor de energia de fontes renováveis limpas e eficientes no Brasil, devido a crise hídrica vivida nos últimos anos no nosso país, conseqüentemente o alto custo de energia elétrica que vem das concessionárias, sabendo que a maior geração de energia elétrica no país é produzida pela hidrelétrica, conforme a figura 1, a matriz elétrica brasileira de 2022. Logo, uma instalação adequada poderá diminuir o custo de sistema fotovoltaico, mesmo com problemas com sombreamento nas residências.

Figura 1: Matriz Elétrica Brasileira 2022



Fonte: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>

O objetivo geral deste trabalho é analisar a tensão da placa fotovoltaica quando sombreada.

Para atingir o objetivo geral, alguns objetivos específicos devem ser cumpridos, tais como: Medir a tensão da placa na horizontal, realização de estudos de célula fotovoltaica policristalinas em termo de desempenho em condições de sombreamento.

2. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido por meio da pesquisa experimental, pois, “pode ser definida como, firmar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que podem acarretar mudanças nesse objeto, definir como as variáveis influenciam, e quais seus efeitos no objeto de estudo”. (Gil, 2002, p.41).

Utilizar a pesquisa experimental neste trabalho é importante porque “o planejamento desse tipo de pesquisa [...] é bastante flexível, de modo que possibilite a consideração dos mais variados aspectos relativos ao fato estudado” (GIL, 2002, p.41) e que seu principal objetivo segundo Gil (2002, p.42) é “o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições”. Assim, será utilizado este tipo de pesquisa, pois o intuito do trabalho em questão retrata o sombreamento em módulo fotovoltaico policristalino e seus efeitos.

2.1 DEFINIÇÃO DE ESTUDO

Sendo desenvolvido por métodos de pesquisas através de análise feita em campo com auxílio de um multímetro da marca MXT, de modelo DT830B, e módulo fotovoltaico de 150w em hora pico solar (HPS), do fabricante Risen, de modelo RSM36-6-150P, conforme figura 02, que apresenta Datasheet da placa fotovoltaica apresenta as características de eficiências.

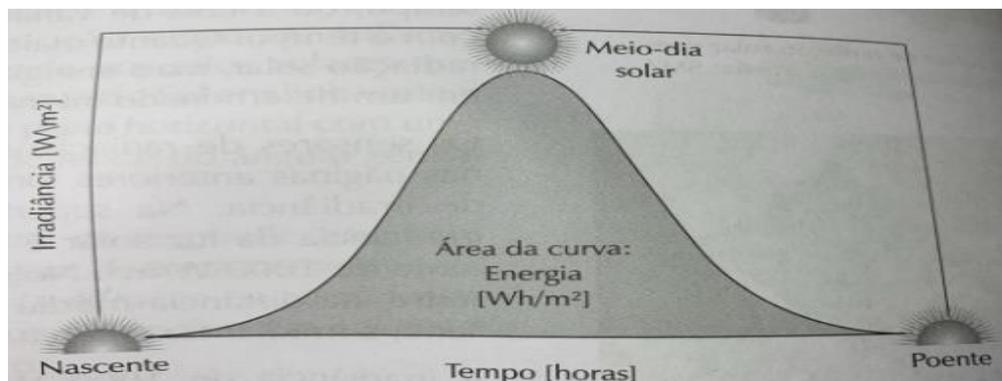
Figura 02: Datasheet da placa fotovoltaica RSM36-6-150P.



Fonte: Autor

O estudo da célula fotovoltaica, são apresentados os resultados obtidos, bem como a análise dos mesmos, buscando alcançar o objetivo principal do trabalho por meio de análise da tensão do módulo fotovoltaico sob influência do sombreamento das células, sendo realizado dia vinte e três de fevereiro de 2024 no horário das 14h20min na Universidade Estado do Rio Grande do Norte, Campus Natal na coordenada 5°45'16" S 35°14'25" O, iniciando análise, considerando o intervalo de pico da radiação solar, conforme figura 03.

Figura 03: Irradiância solar ao longo do dia



Autor: Villalva, Marcelo Gradella (2012).

Os módulos fotovoltaicos foram codificadas, para melhor identificá-las, iniciando em C1.1 até C9.4, conforme a figura 04.

Figura 04: Foto retirada para módulo com as células codificadas.



Fonte: Autor

O sombreamento se deu por meio sobreposição de madeirito com as dimensões 15,6 cm x 15,6 cm, cobrindo toda célula estudada, e assim, o módulo a inclinação de 0°, por apresentar maior incidência da irradiação solar que correspondeu ao mês de fevereiro média de 6,03 kWh/m²/dia, figura 5. No capítulo 2 retrata toda a parte geral a respeito de sistemas fotovoltaicos (célula fotovoltaica, estrutura de funcionamento, sistema fotovoltaico e módulos fotovoltaicos) e a teoria necessária para o desenvolvimento do trabalho. Para melhor compreensão do sombreamento do módulo fotovoltaico foram construídos croquis representando em destaque as células que foram sombreadas.

Nas comparações de diferenças de tensões geradas pelo módulo fotovoltaico nas células sombreadas foram utilizados os testes estatísticos não-paramétricos Wilcoxon e Qui-quadrado por meio do software *Statistica* versão 12, sendo considerado um nível de significância de 5%. A aplicação do teste estatístico não-paramétrico se deu em virtude da quantidade de dados ser pequena (menor que 30),

torna-se não necessário a verificação de normalidade. Para obter o cálculo da variação de tensão (Vt) foi utilizada a Equação 1, a média aritmética a Equação 2 e o desvio padrão a Equação 3. As medições foram em circuito aberto.

$$Vt = \frac{T_{i+1} - T_i}{T_i} \times 100 \quad \text{Equação (01)}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots$$

Onde:

Vt = variação de tensão

T_i = Tensão mensurada no momento i .

T_{i+1} = Tensão mensurada no momento $i+1$.

$$\mu = \frac{\sum x_i}{n} \quad \text{Equação (02)}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots$$

onde:

μ = média aritmética populacional;

$\sum x_i$ = Soma de todos os valores;

n = total de valores

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n}} \quad \text{Equação (03)}$$

onde:

σ = desvio padrão;

$\sum (x_i - \mu)^2$ = Soma do quadrado das diferenças das observações em relação a média aritmética.

Figura 05: Radiação Solar nas Coordenadas da Campus Natal/RN

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Natal
 Município: Natal, RN - BRASIL
 Latitude: 5,801° S
 Longitude: 35,249° O
 Distância do ponto de ref. (5,754444° S; 35,240278° O): 5,3 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	6,02	6,03	6,08	5,56	5,08	4,66	4,77	5,57	5,97	6,11	6,27	5,97	5,67	1,61
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	6° N	5,79	5,90	6,07	5,68	5,29	4,90	5,00	5,75	6,02	6,02	6,05	5,71	5,68	1,17
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	4° N	5,87	5,95	6,08	5,65	5,22	4,82	4,93	5,69	6,01	6,05	6,13	5,80	5,68	1,31
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	16° N	5,32	5,58	5,95	5,78	5,55	5,21	5,28	5,93	5,98	5,75	5,59	5,21	5,69	,78

Fonte: <http://www.cresesb.cepel.br/>

2.2 MEDINDO AS TENSÕES

Com placa na sua inclinação em 0°, as ponteiros do multímetro eram colocado nos terminais placa, sabendo que os terminais da placa esta em paralelo com todo circuito do módulo, ou seja, é a maneira ideal para medir a tensão, assim que, o visor registrava a tensão, os valores eram inserido no banco de dados software Statistica, portanto, começando a medir o sombreamento na posição na C1.1 a C9.1, conforme figura 6 abaixo que ilustra as medições do sentido do sombreamento registrado, ao terminar eram aplicando as equações 1, 2 e 3 para determinar os valores de variação de tensão, média aritmética e desvio padrão.

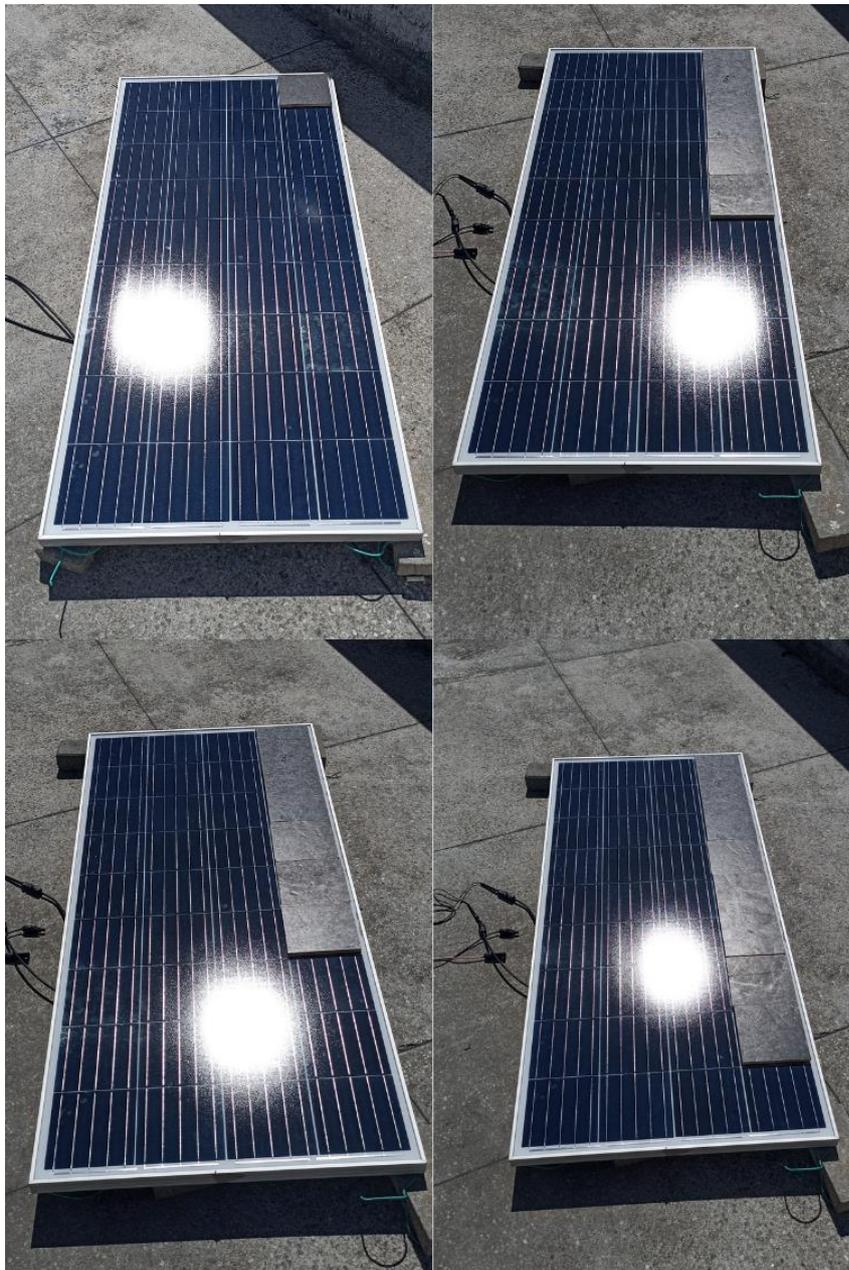
Figura 6: Foto retirada do sombreamento na C1.1 a C9.1



Fonte: Autor.

Na segunda parte do experimento, foi medido os valores de tensão nos sombreamento de C1.4 a C9.4, conforme figura 7 que ilustra as medições do sentido do sombreamento registado, ao terminar foram aplicando as equações 1, 2 e 3 para determinar os valores de variação de tensão, média aritmética e desvio padrão, bem como, com dados na C1.1 a C9.1, foi aplicado o teste Estatístico não-paramétrico de Wilcoxon no software Statistica.

Figura 7: Foto retirada do sombreamento na C1.4 a C9.4



Fonte: Autor

Na terceira parte do experimento, foi medir os valores de tensão nos sombreamento de C1.4 até C2.4, e C3.4 conforme figura 08 que ilustra as medições do sentido do sombreamento registado, ao terminar eram aplicando as equações 1, 2 e 3 para determinar os valores de variação de tensão, média aritmética e desvio padrão, bem como, com dados na C1.1 a C9.1, foi aplicado o teste Estatístico não-paramétrico de Wilcoxon no software Statistica.

Figura 08: Foto retirada do sombreamento na C1.4 até C2.4, e C3.4



Fonte: Autor.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Nessa sessão será feito um refinamento dos teóricos utilizados no presente monografia, que foram realizados por meio de artigos científicos e teste experimental. Realizado na Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

3.1 SOL UMA FONTE DE ENERGIA

O sol é uma enorme esfera de gás, que através de reações termonucleares em seu núcleo produz energia, porém, é a principal fonte de energia para nosso planeta, bem como pelo desenvolvimento da vida terrestre, a radiação solar é considerada como uma fonte inesgotável de energia, e tem um enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e transformação (De souza, L. *et al.*, 2016).

O sol contém cerca de 92% de hidrogênio e 8% de hélio (NASA, 2014), O Sol é composto por várias camadas distintas, cada uma com características e propriedades específicas. As principais partes do Sol incluem, conforme figura 9, abaixo.

Figura 9: Estrutura do Sol



Fonte: <https://www.significados.com.br/sol/>

A energia do Sol é gerada em seu núcleo por reações termonucleares de fusão de hidrogênio em hélio, que liberam uma enorme quantidade de energia. Essa energia é transportada para a superfície do Sol por meio de fótons que se movem através da Zona Radiativa, onde são absorvidos e reemitidos repetidamente pelas partículas carregadas presentes nessa região" (*Young & Freedman, 2014*).

A Zona de Convecção é uma região do Sol onde a transferência de calor ocorre principalmente através do movimento de grandes correntes de plasma. Nesta região, o material solar aquecido na Zona Radiativa se eleva para a superfície, libera energia e depois se resfria, afundando de volta ao interior do Sol para repetir o ciclo. Acima da Zona de Convecção está a fotosfera, a camada mais visível do Sol, onde a luz é emitida. Esta camada é relativamente fina em comparação com o tamanho total do Sol" (*Carroll & Ostlie, 2007*).

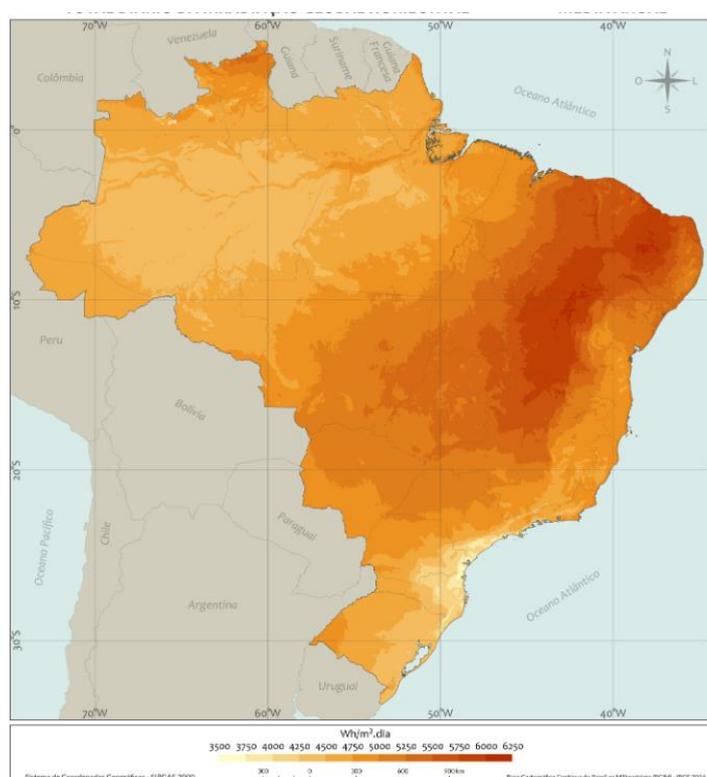
A Cromosfera é uma camada fina e avermelhada que fica logo acima da fotosfera do Sol. Durante um eclipse solar total, ela é visível como uma faixa avermelhada ao redor da borda do Sol. Acima da Cromosfera está a Coroa, a camada mais externa do Sol, composta por plasma rarefeito com temperaturas extremamente altas. A Coroa se estende por milhões de quilômetros no espaço e é visível durante um eclipse total do Sol como um halo brilhante ao redor da Lua" (*Young & Freedman, 2014*).

O Sol é uma fonte de energia poderosa e praticamente inesgotável para o nosso planeta. De acordo com Vichi e Mansor (2009), "a quantidade de radiação solar que atinge o planeta anualmente equivale a 7.500 vezes o consumo de energia primária de sua população. A incidência de radiação varia conforme a posição geográfica, podendo atingir até 170 W/m^2 ".

No Brasil, devido à sua localização geográfica próxima à Linha do Equador, o país possui um grande potencial para a utilização da energia solar, em especial nos estados mais próximos da linha. De acordo com dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (ANEEL, 2021), a média de irradiação solar no Brasil varia de 4,5 a 6,5 kWh/m² por dia, conforme a figura 10, o que demonstra o alto nível de radiação solar disponível ao longo do ano. Esses números demonstram a quantidade significativa de energia solar disponível diariamente em diversas regiões do país.

Essa abundância de luz solar faz com que o uso da energia solar fotovoltaica seja uma opção altamente viável e promissora para o Brasil. A captação e a conversão dessa energia podem ser realizadas por meio de sistemas fotovoltaicos, aproveitando ao máximo o potencial solar do país para geração de eletricidade limpa e renovável.

Figura 10: Radiação Solar incidente no Brasil, média anual.



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (ANEEL, 2021)

Com tanto potencial energético, a energia solar tem se tornado uma alternativa cada vez mais atrativa e viável para suprir as necessidades energéticas do Brasil e de outras regiões do mundo. O processo de captura e conversão da energia solar em energia elétrica é geralmente realizado por meio de células fotovoltaicas, que são feitas de materiais semicondutores, como o silício (Beigelman, 2013).

Essas células fotovoltaicas funcionam através do chamado "efeito fotovoltaico", no qual os fótons presentes na luz solar colidem com os elétrons nos materiais semicondutores, gerando assim corrente elétrica.

3.1.1 EFEITO FOTOVOLTAICO

Conforme o centro de pesquisa de energia elétrica – CEPEL (2007, p. 12), o efeito fotoelétrico “foi verificado pela primeira vez por Edmond Becquerel, [...] onde constatou uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semic quando exposto à luz”.

Conforme o estudo de *Edmond Becquerel* esse efeito fotoelétrico, é o que acontece nos sistemas fotovoltaicos correspondente à conversão direta da luz solar em eletricidade. As células fotovoltaicas, muitas vezes referidas como painéis solares, são o componente-chave nesse processo. Elas são construídas com materiais semicondutores, geralmente à base de silício, que possuem a propriedade de liberar elétrons quando absorvem fótons de luz solar, a eletricidade gerada pode ser utilizada diretamente para alimentar aparelhos elétricos ou ser armazenada em baterias para uso posterior.

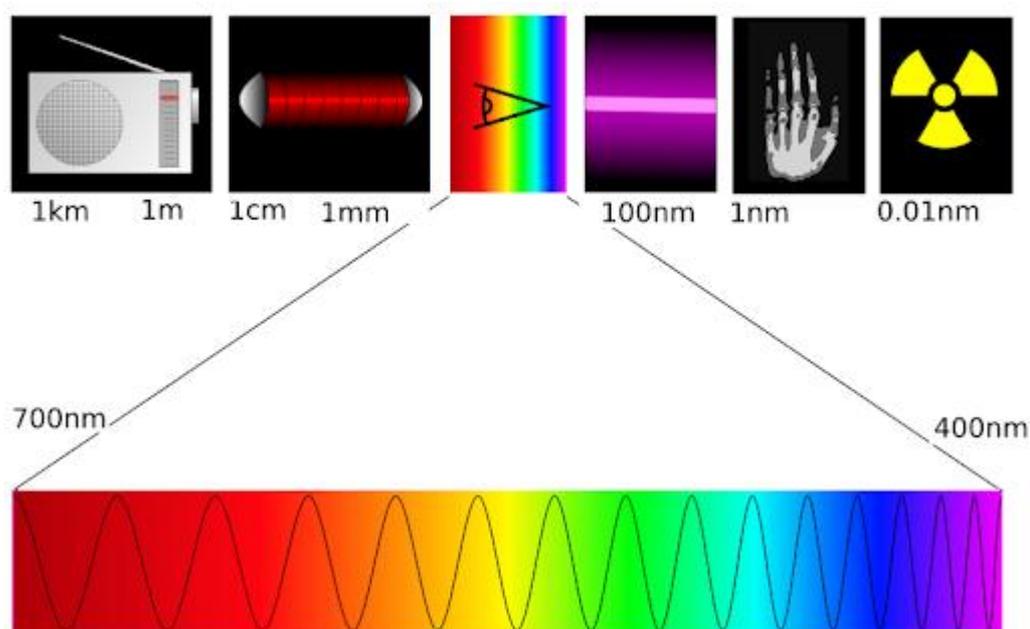
Quando a luz solar incide sobre as células fotovoltaicas, a energia dos fótons é transferida para os elétrons nos átomos do material semicondutor. Isso faz com que os elétrons ganhem energia suficiente para sair da banda de valência (onde estão mais próximos do núcleo) e passem para a banda de condução (onde têm mais liberdade para se mover). Essa transferência de elétrons gera um fluxo de corrente elétrica (*Matsumura et al., 2017*)

De acordo com o Guia do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (ANEEL, 2020), os módulos fotovoltaicos são organizados em painéis solares, que, por sua vez, podem ser conectados em módulos maiores para atender às demandas de energia elétrica de residências, empresas e instalações industriais. A eletricidade gerada pelos painéis solares pode ser usada diretamente para alimentar equipamentos ou ser integrada à rede elétrica, contribuindo para a redução do consumo de energia proveniente de fontes convencionais.

3.1.2 RADIAÇÃO SOLAR

Radiação Solar é a energia liberada pelo Sol em forma de radiação (ondas eletromagnéticas), é uma excelente fonte de energia e a responsável pelo aquecimento do nosso planeta, A radiação solar que chega à Terra é dividida em três partes: a visível, a ultravioleta e a infravermelha (Kalogirou, 2014). A radiação visível é a forma mais simples de radiação eletromagnética que recebe esse nome pois é visível ao ser humano, ela é composta por um espectro das seguintes cores: vermelho, laranja, amarelo, verde, ciano, azul e violeta, conforme a figura 11.

Figura 11: Espectro de cores da radiação visível.



Fonte: <http://www.fisica-interessante.com/fisica-ondas-cores.html>

A radiação UVA corresponde quase a totalidade de radiação ultravioleta que chega à Terra, a radiação UVB também chega porém em menor quantidade, esses dois tipos de radiação são responsáveis pelas queimaduras e vermelhidões na pele humana e favorecem o surgimento de câncer, a radiação UVC não chega a nossa superfície pois é totalmente absorvida pela camada de ozônio (Matsumura et al, 2017).

Temos ainda a radiação infravermelha que da mesma maneira não é visível ao olho humano, porém possui a maior parte da energia solar chegando a quase 50%,

seu comprimento varia entre 780nm e 1 nm, o que significa que possui um comprimento maior do que a luz (*Matsumura et al, 2017*)

3.2 TIPOS DE PLACA

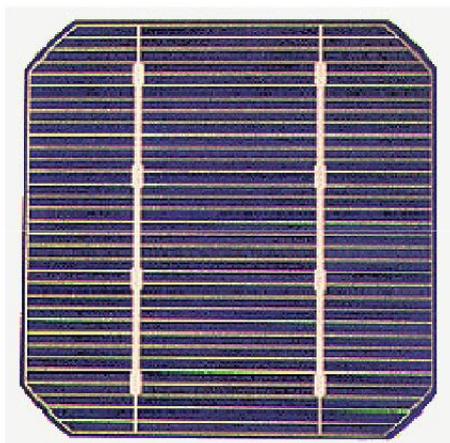
3.2.1 MÓDULO DE SILÍCIO MONOCRISTALINO

Segundo Januzzi, Varella e Gomes (2009) as células fotovoltaicas disponibilizadas comercialmente são elaboradas à base de silício monocristalino, policristalino e amorfo, mas também há células fabricadas com outros materiais, como o disseleneto de cobre-indio (CIS) e telureto de cádmio (CdTe).

O silício é o material mais utilizado na fabricação de células solares, não somente pelo fato de ser o material mais abundante na Terra, mas pela larga experiência alcançada pela indústria de microeletrônica, por seu baixo índice de contaminação e por sua alta durabilidade (*Cecchini, 2003*).

Segundo Tolmasquim (2003) as células de silício monocristalino, conforme a figura 12, são produzidas a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino em fornos especiais. São obtidas por corte de barras em forma de pastilhas finas (300 μm de espessura). Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade é da ordem de 15%.

Figura 12: Células de silício monocristalino



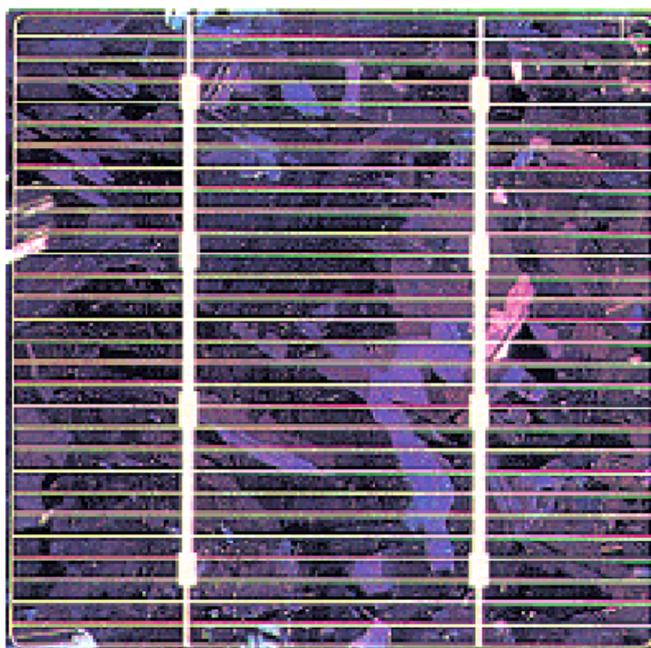
Fonte: CRESESB/CEPEL (1999)

As células fotovoltaicas à base de silício monocristalino têm a desvantagem de apresentarem alto custo de produção, devido às quantidades de materiais utilizados e a energia envolvida na sua fabricação (CRESESB/CEPEL, 2008).

3.2.2 MÓDULO DE SILÍCIO POLICRISTALINO

As células de silício policristalino são produzidas a partir de blocos de silício obtidos por fusão de porções de silício puro em moldes especiais. Uma vez nos moldes, o silício resfria lentamente e solidifica-se. A figura 13 apresenta a estrutura de uma célula fotovoltaica de silício policristalino.

Figura 13: Células de silício policristalino



Fonte: CRESESB/CEPEL (1999).

As células de silício policristalino tem eficiência entre 13% e 15%, inferiores às das células monocristalinas, entretanto seu custo de fabricação é menor do que o das células monocristalinas e isso compensa a redução de eficiência (Villalva, Marcelo Gradella. 2012).

Para a produção das células policristalinas, a quantidade de material utilizado é praticamente a mesma utilizada na produção de células monocristalinas, porém, a

energia necessária para produzi-las é significativamente reduzida (CRESESB/CEPEL, 2008).

3.2.3 MÓDULO DE SILÍCIO AMORFO

No intuito de utilizar menor quantidade de material semicondutor na fabricação de células fotovoltaicas, inúmeros estudos com filmes finos vêm sendo desenvolvidos. O silício amorfo é um dos destaques nessa área, conforme a figura 14.

Figura 14: Células de silício amorfo



Fonte: CRESESB/CEPEL (1999)

A eficiência dos módulos de filmes finos silício amorfo é muito baixa quando comparada com as dos dispositivos cristalinos. A maior desvantagem das células amorfas consiste na sua baixa eficiência (entre 5 e 8%). sua eficiência diminui durante os primeiros 6 a 12 meses de funcionamento. Devido à degradação induzida pela luz, até chegar a um valor estável. Esta foi a primeira tecnologia de filme fino desenvolvida (Villalva, Marcelo Gradella. 2012).

Os principais obstáculos para a adoção dos filmes finos estão relacionados ao nível de confiabilidade quando comparados com células cristalinas. Segundo (CRESESB/CEPEL, 2008) no caso do silício amorfo, estes obstáculos estão

relacionados principalmente com a estabilidade do material. No entanto, este efeito tem sido reduzido adotando-se células de múltiplas camadas.

Um enorme progresso tem sido feito em anos recentes no número de materiais fotovoltaicos e intervenções em termos de eficiência de conversão, eficiências na faixa de 18 a 24 % têm sido alcançadas na tradicional base de silício fabricado com ambos os materiais, mono e policristalino.

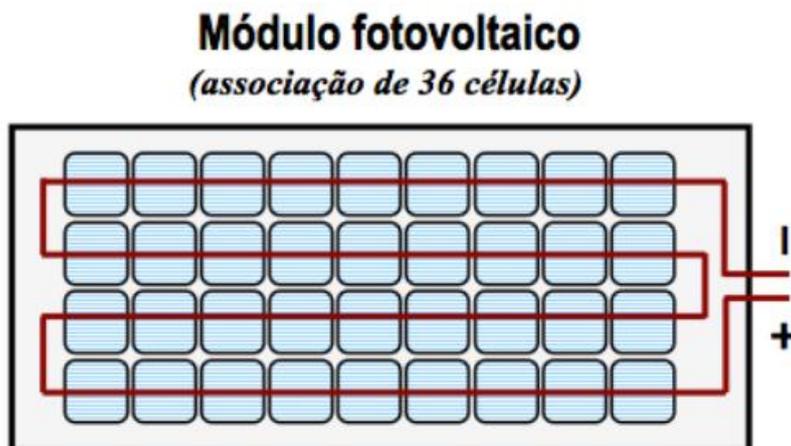
3.3 MÓDULO FOTOVOLTAICO

De acordo com Carneiro (2010), a potência máxima que é alcançada através da utilização de uma única célula fotovoltaica não excede, em geral, a potência de 3W, o que é manifestamente insuficiente para a maioria das aplicações reais. Por este motivo, é feito o agrupamento das células fotovoltaicas para que assim se tornem um módulo fotovoltaico. Para que isso aconteça, ou seja, tornar-se um módulo fotovoltaico, as células presentes necessitam ser ligadas em séries umas às outras.

A tensão produzida por uma célula fotovoltaica pode variar de 0,6 V a 0,8 V, dependendo do material semicondutor e da tecnologia utilizada. A corrente gerada pela célula é diretamente proporcional ao tamanho da mesma, ou seja, quanto maior a célula maior será a corrente gerada por ela (Carneiro, 2010; Uchino, 2010).

Para aumentar a potência total disponível, várias células fotovoltaicas são agrupadas e conectadas entre si para formar um módulo fotovoltaico, também conhecido como painel solar. agrupamento das células fotovoltaicas geralmente é feito conectando-as em séries e/ou em paralelo. Na conexão em série, as células são conectadas positivo a negativo, aumentando a tensão total do módulo enquanto a corrente permanece constante. Já na conexão em paralelo, as células são conectadas positivo a positivo e negativo a negativo, aumentando a corrente total enquanto a tensão é mantida constante, conforme a figura 15.

Figura 15: Representação esquemática referente à associação de várias células fotovoltaicas visando o aumento da potência total



Fonte: Carneiro (2010)

Desta forma é possível uma geração de energia maior, conforme construção de cada módulo. Existem atualmente módulos compostos por 36, 60 e 72 células.

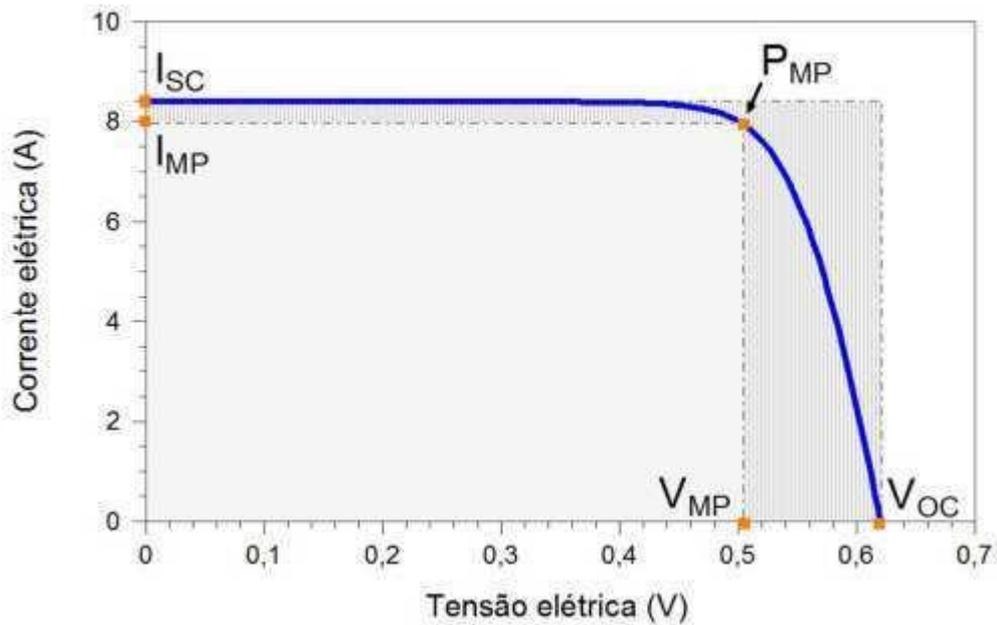
A conexão em série dessas células permite aumentar a tensão total do módulo, enquanto a conexão em paralelo aumenta a corrente elétrica. Essas combinações visam otimizar a saída de energia de acordo com as necessidades específicas do módulo (Carneiro, 2010).

Uma célula fotovoltaica é identificada pela sua potência máxima de pico (P_{mp}) é a potência máxima que a célula pode gerar em condições ideais de irradiação solar, tensão de circuito aberto (V_{oc}) é a tensão máxima disponível em uma célula fotovoltaica quando nenhum circuito está conectado, Corrente de curto-circuito (I_{sc}) é a corrente máxima disponível em uma célula fotovoltaica quando os terminais são curto-circuitados e Eficiência (η) e a capacidade da célula de converter a energia solar incidente em energia elétrica (Villalva *et al.*, 2012).

Essas informações são essenciais para entender o desempenho e as características de uma célula fotovoltaica, permitindo a configuração adequada das

conexões em série e em paralelo para atender às exigências específicas do sistema solar. Tais parâmetros podem ser identificados na figura 16.

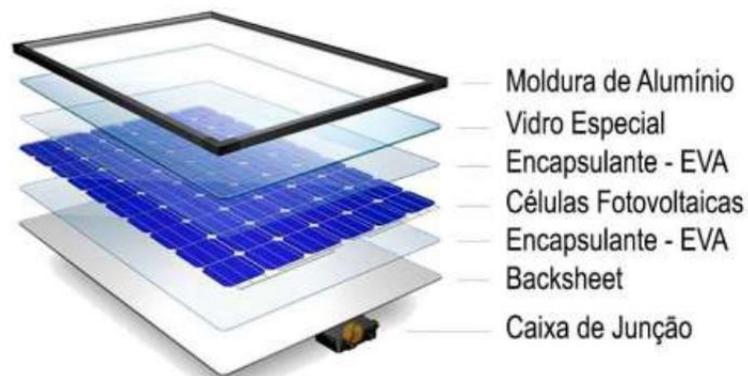
Figura 16: Corrente elétrica em função de uma diferença de potencial aplicado em uma célula fotovoltaica



Fonte: PINHO & GALDINO, (2014).

O módulo fotovoltaico possui diversas peças além das células fotovoltaicas que serão apresentadas a seguir:

Figura 17: Esquema de montagem do módulo fotovoltaico



Fonte: (<https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>).

3.3.1 VIDRO FOTOVOLTAICA

Na confecção do painel é utilizado um vidro ultra puro com baixo teor de ferro, vidro é feito especialmente para deixar um número maior de raios de luz atravessar o mesmo. O vidro especial representa uma faixa de 10% no custo de fabricação do painel (PORTAL SOLAR, 2011).

De acordo com *Hagemann* (2016), os vidros fotovoltaicos possuem uma série de diferenciais em relação aos vidros convencionais. Esses vidros possuem uma camada antirreflexiva que ajuda a melhorar a eficiência energética do painel, evitando perdas de energia causadas pela reflexão da luz solar. Essa camada também aumenta a durabilidade do vidro, reduzindo a probabilidade de riscos e danos causados por intempéries.

Este tipo de vidro é essencial para otimizar a eficiência dos painéis solares, pois permite que mais luz solar seja absorvida pelas células fotovoltaicas, convertendo-a em energia elétrica. A figura 18 é uma mostra do vidro.

Figura 18: Vidro Fotovoltaica



Fonte: (<https://www.portalsolar.com.br/passos-a-passos-da-fabricacao-do-painel-solar.html>).

3.3.2 FILME ENCAPSULANTE

É um copolímero termoplástico que possui excelentes propriedades de adesão, flexibilidade e resistência ao envelhecimento. Ele é amplamente utilizado na indústria fotovoltaica como material de encapsulamento para painéis solares, principalmente por sua capacidade de fornecer uma camada protetora confiável e durável para as células fotovoltaicas (Lu *et al*, 2017).

Sua função principal é proporcionar proteção e isolamento para as células solares contra agentes externos, tais como umidade, poeira, choques mecânicos e variações climáticas, garantindo a durabilidade e o desempenho do painel solar ao longo do tempo. Abaixo uma imagem desse copolímero.

Figura 19: Filme Encapsulante – EVA



Fonte: <https://www.portalsolar.com.br/passos-a-passos-da-fabricacao-do-painel-solar.html>

3.3.3 BACKSHEET DA PLACA FOTOVOLTAICA

É o filme branco que localizado na parte de trás do painel solar, é composto por 3 camadas e seu objetivo é funcionar como isolante elétrico, além de proteger os componentes internos (Cruz *et al.* 2016). Os *backsheets* são considerados um dos componentes críticos em painéis solares, uma vez que fornecem proteção elétrica e mecânica para as células solares, além de impedir a penetração de umidade, poeira e outros agentes externos (Meyer, 2018).

Sua construção em camadas é projetada para fornecer resistência mecânica, durabilidade e estabilidade térmica, garantindo que as células fotovoltaicas permaneçam protegidas ao longo do tempo, mesmo em condições ambientais adversas, conforme a figura 20.

Figura 20: *Backsheet* do módulo fotovoltaica



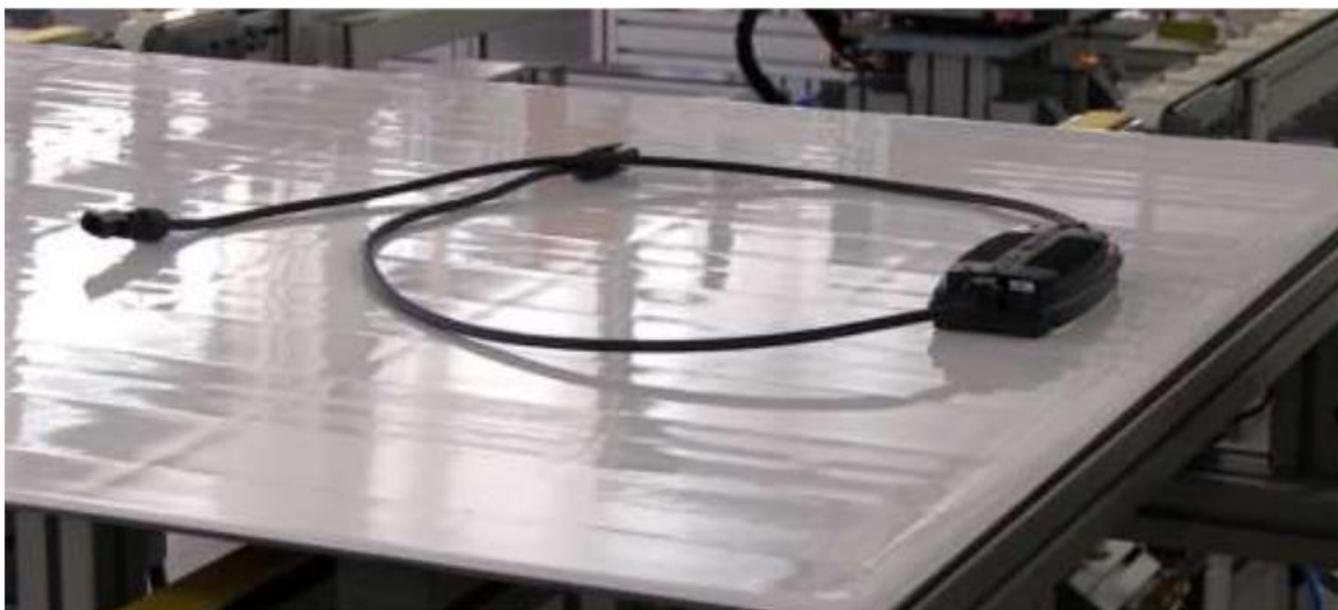
Fonte: (<https://www.portalsolar.com.br/passos-a-passos-da-fabricacao-do-painel-solar.html>).

3.3.4 CAIXA DE JUNÇÃO

É um componente fundamental em um sistema fotovoltaico, responsável por garantir a segurança e o bom funcionamento dos painéis solares de acordo com Oliveira (2017), a conexão elétrica dos painéis é feita por meio da caixa de junção, que geralmente é fixada na parte traseira do módulo fotovoltaico. Suas funções principais incluem.

A Conexão elétrica é a caixa de junção é responsável por conectar os cabos elétricos que vêm de cada painel solar, permitindo que a eletricidade gerada por eles seja canalizada para um único ponto de saída, bem como, proteção de facilitar as conexões elétricas, a caixa de junção oferece proteção aos componentes elétricos contra intempéries, como chuva, umidade e poeira, garantindo a segurança do sistema. Abaixo a imagem dessa junção.

Figura 21: Caixa de Junção



Fonte: (<https://www.portalsolar.com.br/passos-da-fabricacao-do-painel-solar.html>).

3.3.5 MOLDURA PARA PAINEL SOLAR

É a moldura em alumínio anodizado tem como função trazer robustez e garantir a integridade do painel solar impedindo que o mesmo sofra torções durante sua

instalação e assim evitando a trinca das células fotovoltaicas, além de ser o ponto de fixação entre o painel e a estrutura a qual ele está sendo alocado (Ferreira *et al*, 2011), Geralmente fabricada em alumínio anodizado, essa moldura tem diversos propósitos importantes. conforme a figura 22.

Figura 22: Moldura em Alumínio Anodizado



Fonte: <https://www.portalsolar.com.br/passos-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>

3.4 SOMBREAMENTO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Segundo Pinho e Galdino (2014), o conceito de sombreamento traduz fundamentalmente que no caso da diminuição de radiação em um conjunto de células fotovoltaicas ligadas em série, acarretará em uma redução na corrente, essa redução será propagada para as demais células mesmo que nelas tenha sido mantida a radiação. Contudo este efeito, além da diminuição de potência no gerador, provoca o risco de danos ao material da célula, com uma intensa produção de calor no local da placa com sombreamento, podendo inclusive quebrar o vidro ou algum outro dano. Este fenômeno é conhecido como “Ponto quente” ou “*Hotspot*”.

O sombreamento em sistemas fotovoltaicos reduz a eficiência e pode provocar problemas mais graves capazes de interromper a geração de eletricidade parcial ou total. Nesse sentido. À luz disso, Bidram, Davoudi e Balog (2012) extraíram a potência máxima de matrizes fotovoltaicas parcialmente sombreadas a fim de aprimorar técnicas de rastreamento de máxima potência MPPT, um recurso bastante utilizado na literatura para análise de sombreamento.

Quando um grupo de células se encontra sombreado, assiste-se a uma perda da energia produzida de duas maneiras: pela redução da energia gerada pela célula e pelo aumento das perdas nas células sombreadas. Este problema torna-se mais grave quando o sombreamento das células causa a polarização reversa, pois os módulos fotovoltaicos deixam de ser geradores de energia e passam a atuar como carga (*Alonsogarcia et al, 2006*).

Esses desafios relacionados ao sombreamento e suas implicações na eficiência dos sistemas fotovoltaicos têm sido alvo de pesquisas e desenvolvimentos significativos. Além das técnicas de rastreamento de máxima potência (MPPT), muitos estudos têm se concentrado em identificar estratégias de mitigação de sombreamento, aprimorando assim o desempenho geral dos sistemas fotovoltaicos.

Uma abordagem comum para lidar com o problema do sombreamento é a utilização de configurações de painéis solares que minimizem as áreas sombreadas. Isso pode incluir arranjos de painéis solares em série e paralelo, de forma a otimizar a distribuição de energia e reduzir o impacto do sombreamento localizado.

A Swiss Solar Systems é uma companhia suíça que produz módulos laminados fotovoltaicos do tipo vidro/vidro e vidro/folha, nos quais podem ser incorporados vários tipos de células, também fabricadas pela própria companhia, e ainda comercializa sistemas fotovoltaicos para integração em fachadas e coberturas (Teixeira, 2010). O desenvolvimento desses painéis solares com características elétricas mais flexíveis tem permitido que partes sombreadas de um sistema continuem a contribuir com a geração de energia, mesmo em condições adversas.

No entanto, apesar dos avanços, a polarização reversa ainda permanece como uma preocupação significativa em sistemas fotovoltaicos parcialmente sombreados.

De acordo com Boylestad (2004), quando as células fotovoltaicas são expostas ao sombreamento e a polarização reversa ocorre, a dissipação de energia pode não

apenas interromper a geração de eletricidade, mas também causar desgaste e danos aos próprios componentes do sistema. Isso pode levar a uma redução da vida útil dos módulos fotovoltaicos e, conseqüentemente, a custos adicionais de manutenção e substituição.

De acordo com Teixeira (2010), estratégias avançadas de detecção e controle têm sido investigadas para detectar sombreamentos e evitar a polarização reversa. Sensores de sombreamento, algoritmos de controle inteligentes e sistemas de monitoramento em tempo real são algumas das abordagens adotadas para mitigar os efeitos prejudiciais do sombreamento em sistemas fotovoltaicos.

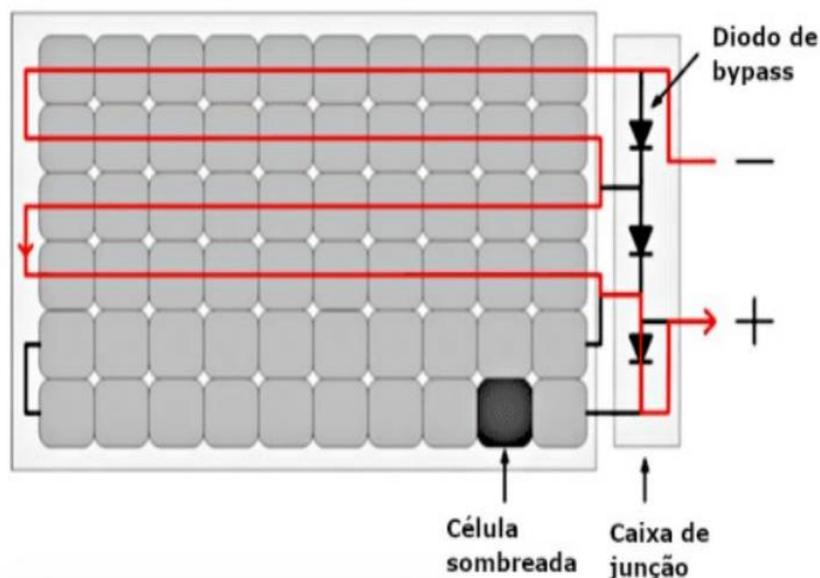
Portanto, é evidente que o estudo do sombreamento em módulos fotovoltaicos é crucial para a otimização do desempenho e da confiabilidade desses sistemas. Avanços contínuos nessa área não apenas contribuem para o aumento da eficiência energética, mas também promovem a utilização sustentável da energia solar como fonte renovável e limpa.

3.5 DIODO *BYPASS* EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Nos sistemas fotovoltaicos, especialmente em instalações que envolvem painéis solares conectados em série, o diodo *bypass* desempenha um papel crucial. Segundo *Serafimovski et al.* (2014), o diodo *bypass* é utilizado para minimizar os efeitos do sombreamento parcial em uma ou mais células fotovoltaicas, garantindo assim a eficiência e a confiabilidade do sistema como um todo."

O diodo *bypass* é inserido em cada módulo fotovoltaico ou em grupos de módulos conectados em série. Sua função principal é permitir que a corrente elétrica gerada pelas células solares sombreadas seja desviada, evitando assim o fenômeno conhecido como "efeito sombra" ou "efeito de ponto quente" (*Alonsogarcia et al.*, 2006), conforme a figura 23 abaixo, comportamento da corrente com *bypass*.

Figura 23: Corrente fluindo por um módulo com um diodo de *bypass* acionado



Fonte: <https://canalsolar.com.br>

Esse efeito ocorre quando uma célula fotovoltaica está sombreada ou danificada, fazendo com que ela se comporte como uma carga em vez de uma fonte de energia. Isso pode levar à reversão da polaridade da célula, causando perdas significativas de energia e até danos permanentes ao módulo (*Bidram et al., 2012*).

O diodo *bypass* é instalado de forma a permitir que a corrente elétrica flua apenas em uma direção, garantindo que as células sombreadas não influenciam negativamente o desempenho das células não sombreadas. Dessa forma, a energia gerada pelas células solares pode ser maximizada, mesmo em condições de sombreamento parcial.

Além disso, o diodo *bypass* também é importante para a segurança do sistema, uma vez que ajuda a evitar o superaquecimento das células sombreadas, que poderia levar a danos permanentes nos módulos fotovoltaicos (*Oliveira, 2017*).

Por fim, é importante ressaltar que a escolha adequada do diodo *bypass*, levando em consideração a tensão e a corrente de trabalho, é essencial para garantir

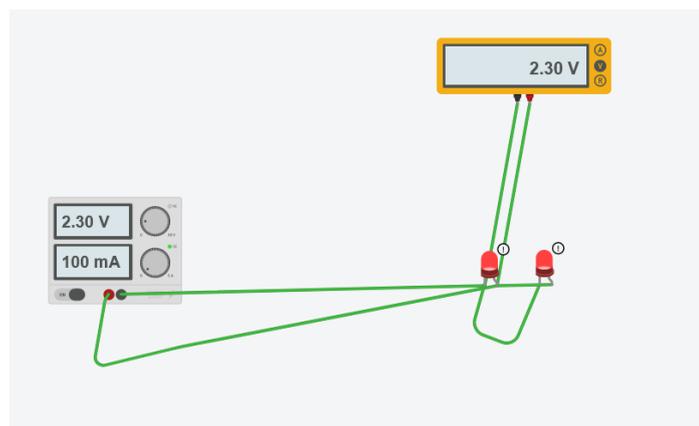
o funcionamento correto do sistema fotovoltaico, maximizando sua eficiência e vida útil.

Em resumo, o diodo *bypass* desempenha um papel fundamental na otimização do desempenho e na garantia da segurança dos módulos fotovoltaicos, especialmente em ambientes propensos a sombreamento parcial. Sua utilização contribui para a maximização da eficiência energética e para a prolongação da vida útil dos módulos fotovoltaicos.

3.6 MEDIÇÃO DE TENSÃO

Em buscar em responder à questão da análise da voltagem em relação ao sombreamento no módulo fotovoltaico. Primeiro é necessário entender para medir a tensão no multímetro, devemos colocar as ponteiros em paralelo no ponto de onde quer medir, verificar a escala da tensão, bem como o tipo de tensão se VDC (Tensão de corrente contínua) ou VAC (tensão de Corrente Alternada), a figura 24 uma simulação da medição da tensão de corrente contínua no multímetro sobre um led.

Figura 24: Esquema de medir tensão de Corrente Contínua



Fonte: Autor

Para medir a voltagem placa, sabemos que os módulos da placa está associado série é a saída dos conectores esta em paralelo com circuito da placa,

conforme datasheet da placa estuda a voltagem em circuito aberto e de 22,3v, ou seja, tensão total (Tt) da placa e conforme a equação: $Tt = V1 + V2 + V3$,

Dados:

36 módulos

22,3v condições normais

Ou seja,

$$C = C1.1 + C2.1 + C.3.1 \dots$$

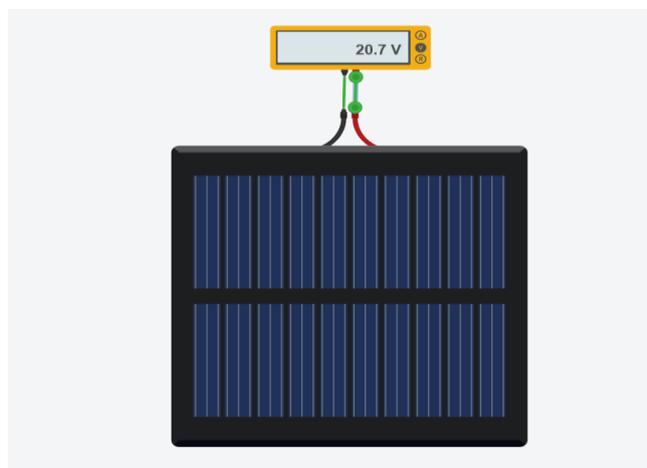
então,

$$C = 22.3v$$

$$22,3/36 = 0,619v$$

Então, conforme a figura 25 abaixo a simulação da medição de uma módulo de 20,7.

Figura 25: Medição da tensão na Placa Solar



Fonte: Autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor representar as células sombreadas no módulo fotovoltaico foram criados croquis para melhor compreensão.

O Croqui 01, representa a ausência de sombreamento no módulo, onde as colunas C .1 a C .4 identificam as colunas e as células representadas de C1.1 a C9.4.

Croqui 01: do módulo fotovoltaico

C .4	C .3	C .2	C .1
C9.4	C9.3	C9.2	C9.1
C8.4	C8.3	C8.2	C8.1
C7.4	C7.3	C7.2	C7.1
C6.4	C6.3	C6.2	C6.1
C5.4	C5.3	C5.2	C5.1
C4.4	C4.3	C4.2	C4.1
C3.4	C3.3	C3.2	C3.1
C2.4	C2.3	C2.2	C2.1
C1.4	C1.3	C1.2	C1.1

Tabela 01: Tensões das células nas Colunas C .4 e C .1

Medições	C .4 Tensões (v)	C .3	C .2	C .1 Tensões (v)
M1	20,7	C9.3	C9.2	20,7
M2	20,5	C8.3	C8.2	20,6
M3	20,4	C7.3	C7.2	20,4
M4	20,4	C6.3	C6.2	20,3
M5	20,2	C5.3	C5.2	20,2
M6	20,1	C4.3	C4.2	20,1
M7	20,0	C3.3	C3.2	19,8
M8	19,9	C2.3	C2.2	19,8
M9	19,8	C1.3	C1.2	19,8

Fonte: Autor

Ao comparar as colunas C .4 com C .1 é possível perceber um decréscimo na tensão (Tabela 01) à medida em que aumenta a área sombreada, entretanto ao ser aplicado o teste Estatístico não-paramétrico Wilcoxon foi obtida a probabilidade de rejeita a hipótese de que não haja diferença significativas nas tensões, $p \leq 0,465209$, isto é, comprova que as diferenças existente na tensões entre as colunas citadas não são estatisticamente significativas.

Tabela 02: Variação de tensão.

Medições	C .4	Vt(%)	C .1	Vt(%)
M1	20,7	-0,96	20,7	-0,96
M2	20,5	-1,91	20,6	-1,44
M3	20,4	-2,39	20,4	-2,39
M4	20,4	-2,39	20,3	-2,87
M5	20,2	-3,35	20,2	-3,35
M6	20,1	-3,83	20,1	-3,83
M7	20,0	-4,31	19,8	-5,26
M8	19,9	-4,78	19,8	-5,26
M9	19,8	-5,26	19,8	-5,26

Fonte: Autor

Para o cálculo da variação da tensão foi considerada a tensão do módulo sem sombreamento (Croqui 01) que corresponde a 20,9v.

Na Tabela 02, é possível perceber que medida em que as células do módulo são sombreadas, começando em C9.4 até C1.4 e C9.1 a C1.1 vai ocorrendo um decréscimo da tensão, (C9.4 equivale a -0,96 até C1.4 -5,26), entretanto ao ser aplicado o teste Qui-quadrado foi obtido a probabilidade $p \leq 0,999987$, isto é, a variação da tensão em relação a tensão do módulo quando não sombreado não é estatisticamente significativa. O desvio padrão amostral de C .4 e C .1 ambos corresponde a 0,3 v, indicando que as áreas sombreadas apresentam um decréscimo com a mesma homogeneidade.

Na Tabela 03, consta as tensões do módulo fotovoltaico conforme as configurações dos Croquis R0 a R09, embora seja possível identificar decréscimo na tensão não há um comportamento de uma progressão aritmética decrescente, o que justifica pelo fato de que as células não são idênticas em virtude de pequenas variações entre as células ocorridas no processo de fabricação, entretanto a medida em que o sombreamento aumenta irá diminuindo a tensão até que não ocorrerá a produção de corrente elétrica. O desvio padrão apresentado nas tensões da Tabela 03 corresponde a 0,4 v maior do que ocorrido na Tabela 02 (0,3 v), o que compreensivo, pois além de pequenas variações de produção de corrente elétrica entre as células as ligações em série entre elas (C .4 a C .1) não estão conectados a um único *bypass*, mas distribuídos entres três *bypass*'s.

Tabela 03: Variação de tensão em relação a configuração do croqui.

Croqui	Tensão	Vt (%)
02	20,3	-2,87
03	20,2	-3,35
04	20,1	-3,83
05	19,9	-4,78
06	19,8	-5,26
07	19,6	-6,22
08	19,6	-6,22
09	19,3	-7,66
10	19,3	-7,66
11	19,3	-7,66

Fonte: Autor

Segue as configurações de sombreamento do módulo (croquis).

Croqui 02: Células sombreadas de C1.1 a C1.4.
Croqui 03: Células sombreadas de C2.4 a C2.3.
Croqui 04: Células sombreadas de C1.1 a C2.3.

C .4	C .3	C .2	C .1
C9.4	C9.3	C9.2	C9.1
C8.4	C8.3	C8.2	C8.1
C7.4	C7.3	C7.2	C7.1
C6.4	C6.3	C6.2	C6.1
C5.4	C5.3	C5.2	C5.1
C4.4	C4.3	C4.2	C4.1
C3.4	C3.3	C3.2	C3.1
C2.4	C2.3	C2.2	C2.1
C1.4	C1.3	C1.2	C1.1

20,3 v

C .4	C .3	C .2	C .1
C9.4	C9.3	C9.2	C9.1
C8.4	C8.3	C8.2	C8.1
C7.4	C7.3	C7.2	C7.1
C6.4	C6.3	C6.2	C6.1
C5.4	C5.3	C5.2	C5.1
C4.4	C4.3	C4.2	C4.1
C3.4	C3.3	C3.2	C3.1
C2.4	C2.3	C2.2	C2.1
C1.4	C1.3	C1.2	C1.1

20,2 v

C .4	C .3	C .2	C .1
C9.4	C9.3	C9.2	C9.1
C8.4	C8.3	C8.2	C8.1
C7.4	C7.3	C7.2	C7.1
C6.4	C6.3	C6.2	C6.1
C5.4	C5.3	C5.2	C5.1
C4.4	C4.3	C4.2	C4.1
C3.4	C3.3	C3.2	C3.1
C2.4	C2.3	C2.2	C2.1
C1.4	C1.3	C1.2	C1.1

20,1 v

Croqui 05: Células sombreadas de C1.1 a C2.2.

C .4	C .3	C .2	C .1
C9.4	C9.3	C9.2	C9.1
C8.4	C8.3	C8.2	C8.1
C7.4	C7.3	C7.2	C7.1
C6.4	C6.3	C6.2	C6.1
C5.4	C5.3	C5.2	C5.1
C4.4	C4.3	C4.2	C4.1
C3.4	C3.3	C3.2	C3.1
C2.4	C2.3	C2.2	C2.1
C1.4	C1.3	C1.2	C1.1

19,9 v

Croqui 06: Células sombreadas de C1.1 a C2.1.

C .4	C .3	C .2	C .1
C9.4	C9.3	C9.2	C9.1
C8.4	C8.3	C8.2	C8.1
C7.4	C7.3	C7.2	C7.1
C6.4	C6.3	C6.2	C6.1
C5.4	C5.3	C5.2	C5.1
C4.4	C4.3	C4.2	C4.1
C3.4	C3.3	C3.2	C3.1
C2.4	C2.3	C2.2	C2.1
C1.4	C1.3	C1.2	C1.1

19,8 v

Croqui 07: Células sombreadas de C1.1 a C3.4.

C .4	C .3	C .2	C .1
C9.4	C9.3	C9.2	C9.1
C8.4	C8.3	C8.2	C8.1
C7.4	C7.3	C7.2	C7.1
C6.4	C6.3	C6.2	C6.1
C5.4	C5.3	C5.2	C5.1
C4.4	C4.3	C4.2	C4.1
C3.4	C3.3	C3.2	C3.1
C2.4	C2.3	C2.2	C2.1
C1.4	C1.3	C1.2	C1.1

19,6

Croqui 08: Células sombreadas de C1.1 a C3.4.

Croqui 09: Células sombreadas de C1.1 a C3.3.

Croqui 10: Células sombreadas de C1.1 a C3.2.

C . 4	C . 3	C . 2	C . 1
C9.4	C9.3	C9.2	C9.1
C8.4	C8.3	C8.2	C8.1
C7.4	C7.3	C7.2	C7.1
C6.4	C6.3	C6.2	C6.1
C5.4	C5.3	C5.2	C5.1
C4.4	C4.3	C4.2	C4.1
C3.4	C3.3	C3.2	C3.1
C2.4	C2.3	C2.2	C2.1
C1.4	C1.3	C1.2	C1.1

19,6 v

C . 4	C . 3	C . 2	C . 1
C9.4	C9.3	C9.2	C9.1
C8.4	C8.3	C8.2	C8.1
C7.4	C7.3	C7.2	C7.1
C6.4	C6.3	C6.2	C6.1
C5.4	C5.3	C5.2	C5.1
C4.4	C4.3	C4.2	C4.1
C3.4	C3.3	C3.2	C3.1
C2.4	C2.3	C2.2	C2.1
C1.4	C1.3	C1.2	C1.1

19,3 v

C . 4	C . 3	C . 2	C . 1
C9.4	C9.3	C9.2	C9.1
C8.4	C8.3	C8.2	C8.1
C7.4	C7.3	C7.2	C7.1
C6.4	C6.3	C6.2	C6.1
C5.4	C5.3	C5.2	C5.1
C4.4	C4.3	C4.2	C4.1
C3.4	C3.3	C3.2	C3.1
C2.4	C2.3	C2.2	C2.1
C1.4	C1.3	C1.2	C1.1

19,3 v

**Croqui 11: Células
sombreadas C1.1 a C3.2**

C .4	C .3	C .2	C .1
C9.4	C9.3	C9.2	C9.1
C8.4	C8.3	C8.2	C8.1
C7.4	C7.3	C7.2	C7.1
C6.4	C6.3	C6.2	C6.1
C5.4	C5.3	C5.2	C5.1
C4.4	C4.3	C4.2	C4.1
C3.4	C3.3	C3.2	C3.1
C2.4	C2.3	C2.2	C2.1
C1.4	C1.3	C1.2	C1.1

19,3 v

As células sombreadas no Croqui 12 apresentaram tensão média individualmente de 20,2 v, enquanto o sombreamento realizado no Croqui 8 obteve uma média de 19,6 v.

Na comparação das áreas sombreadas nos Croquis 12 e 8, por meio do Teste Estatístico Wilcoxon foi encontrado a probabilidade $p \leq 0,041227$, isto é, as diferenças

nas tensões são estatisticamente significativas. Sendo sugestivo de que, quando o sombreamento ocorre no sentido do Croqui 8 as perdas de tensões são maiores o que o Croqui 12, sendo ressaltada por meio das Tabela 03 e 03, onde a diminuição da V_t são maiores na tabela 03

Croqui 12: Células sombreadas C1.4 a C9.4.				Croqui 08: Células sombreadas de C1.1 a C3.4.			
C .4	C .3	C .2	C .1	C .4	C .3	C .2	C .1
C9.4	C9.3	C9.2	C9.1	C9.4	C9.3	C9.2	C9.1
C8.4	C8.3	C8.2	C8.1	C8.4	C8.3	C8.2	C8.1
C7.4	C7.3	C7.2	C7.1	C7.4	C7.3	C7.2	C7.1
C6.4	C6.3	C6.2	C6.1	C6.4	C6.3	C6.2	C6.1
C5.4	C5.3	C5.2	C5.1	C5.4	C5.3	C5.2	C5.1
C4.4	C4.3	C4.2	C4.1	C4.4	C4.3	C4.2	C4.1
C3.4	C3.3	C3.2	C3.1	C3.4	C3.3	C3.2	C3.1
C2.4	C2.3	C2.2	C2.1	C2.4	C2.3	C2.2	C2.1
C1.4	C1.3	C1.2	C1.1	C1.4	C1.3	C1.2	C1.1
Média da tensão 20,2 v				Média da tensão 19,6v			

Ao analisar os dados, tem uma pequena diferença nas tensão apresentada dos Croqui 12 e Croqui 08, com a mesma quantidade de módulos sombreadas, essa diferença é devido que no Croqui 08 as células do módulos sombreadas estão passando por todo circuito da placas e todos *bypass*, porém no Croqui 12 o sombreamento ocorre no sentido controlado por somente em um *bypass*.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sombreamento não tem efeito significativo na tensão de saída da placa fotovoltaica. Para mitigar os efeitos do sombreamento, diodos de *bypass* são conectados em paralelo com os módulos fotovoltaicos.

Neste trabalho, foi proposta uma metodologia para identificar e estabelecer a relação entre a posição e o número de células sombreadas versus a tensão de saída, e assim, com os dados apresentados, aplica-se os testes estatísticos Wilcoxon e Qui-Quadrado.

Com base nos resultados aqui observados, concluiu-se que as células fotovoltaicas estão em série. A sensibilidade de célula fotovoltaica ao sombreamento pelo número de módulos sombreados, posição do sombreamento e a irradiação solar.

No entanto quando sombreados uma ou mais células, elas ainda permitem que a corrente flua ao redor delas, como *bypass* em paralelo, isso significa que a corrente total ainda pode fluir através das outras células não sombreadas, mantendo a tensão da placa em um nível relativamente estável, mesmo com algumas células sombreadas. Foi observado também que quando sombreamento atinge mais de uma coluna de células em série a diminuição da tensão são maiores.

Sugestão para futuros trabalho:

- Análise da tensão em função de diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR (2023). Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/estatisticas>. Acesso em: 10 mai. 2023.

ABSOLAR. Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo. Versão: 01/2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 10 mai. 2023.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. (2021). Atlas Brasileiro de Energia. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 10 Ago. 2023.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Guia do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede. Brasília, 2020.

Alonsogarcia, M.; Ruiz, J.; Chenlo, F. Experimental Study Of Mismatch And Shading Effects In The – Characteristic Of a Photovoltaic Module. Solar Energy Materials and Solar Cells, V. 90, N. 3, P. 329–340, 15 Fev. 2006.

Beigelman, B. B. A Energia Solar Fotovoltaica e a Aplicação na Usina Solar. Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2013.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

CARNEIRO, J. Módulos fotovoltaicos - características e associações. 2010. 18f. Trabalho de curso (2º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Universidade do Milho, Campus de Azurém, Guimarães, Portugal. Disponível em: http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16961/1/M%C3%B3dulos%20Fotovoltaicos_Caracteristicas%20e%20Associa%C3%A7%C3%B5es.pdf. Acesso em:

10 Jun. 2023.

CCEE. 20 Anos do mercado brasileiro de energia elétrica. Roberto Rockmann (Organizador). 234p. Livro Digital. 1 ed. São Paulo: CCEE, 2019. Disponível em: https://www.kelman.com.br/CCEE_%2020_anos_Livro_Versao_Digital.pdf. Acesso em: 08 mai. 2023.

CECCHINI, T. Otimização das regiões altamente dopadas de células solares fabricadas por processos térmicos rápidos de pequeno porte. 2003. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CRESESB/CEPEL. Energia Solar Princípio e Aplicações. CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito; CEPEL – Centro de pesquisas de Energia Elétrica. Sistema Eletrobrás. Rio de Janeiro:1999.

CRESESB/CEPEL. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito; Grupo de trabalho de Energia Solar. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: 2008. 206p.

CORSINI, I.; SALLES, S. Estudo aponta que energia é responsável por mais de 20% do custo da cesta básica. CNN, Rio de Janeiro, 14 de jun. de 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/estudo-aponta-que-energia-e-responsavel-por-mais-de-20-do-custo-da-cesta-basica/>. Acesso em: 8 mai. 2023.

D. Serafimovski et al., "Impact of Partial Shading on PV Module Bypass Diodes," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 7, pp. 3527-3534, July 2014.

Carroll, B. W., & Ostlie, D. A. (2007). An Introduction to Modern Astrophysics (2nd ed.). Addison-Wesley.

EPE. Anuário estatístico de energia elétrica de 2022. Empresa de Pesquisa Energética.

2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 08 mai. 2023.

DIAS, M. A. B., et al. Desenvolvimento de um módulo fotovoltaico de silício cristalino de 36 células. Revista Brasileira de Energias Renováveis, 2021.

ELIAS, J. Falta de chuva encareceu luz, comida e etanol; tendência é que seca seja comum. CNN Brasil Business, 11 de nov. de 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/falta-de-chuva-encareceu-luz-comida-e-etanol-tendencia-e-que-seca-seja-comum/>. Acesso em: 07 mai. 2023.

GIL, A. C. Como Elaborar Projetos de Pesquisa. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

Gradella Villalva, Marcelo. Energia Solar Fotovoltaica. São Paulo: Érica, 2012.

IRENA (2021). International Renewable Energy Agency. Disponível em: <https://www.irena.org/newsroom/pressreleases/2021/Mar/Brazil-ramps-up-renewables-with-new-wind-and-solar-targets>. Acesso em: 07 mai. 2023.

JARDIM, Carolina da Silva. A inserção da geração solar fotovoltaica em alimentadores urbanos enfocando a redução do pico de demanda diurno. 2007. 066 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

Kalogirou, S. A. (2014). Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Academic Press.

MEYER, J. (2018). Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Academic Press.

MATSUMURA, M.; SHOJI, Y.; TAKATA, Y. (2017). Solar energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems. Academic Press.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. Imagine The Universe! fevereiro de 2014. Disponível em: <
<https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/sun1.html> acessado em: 31 de outubro de 2022

PRODANOV, C. C.; FREITAS, C. E. metodologia do trabalho científico : Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo/RS: Feevale, 2013.

SALHAB, Rafael Mazzeo. Financiamento de energia solar fotovoltaica para clientes de varejo: desafios e oportunidades. 2021. Revista BNDES, v. 28, n.56, p. 437-474, dez. 2021.

TEIXEIRA, Bruno André Pimenta. Aplicabilidade e funcionalidade de elementos fotovoltaicos como revestimento exterior de edifícios. 2010. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Especialização em Construções) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.

Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Filho, E. R. (2009). Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Transactions on Power Electronics, 24(5), 1198-1208.

VENTURA, M. Energia e combustível já são segundo maior gasto das famílias, revela pesquisa. O Globo, Rio de Janeiro, 09 de ago. de 2022. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/noticia/2022/08/energia-e-combustivel-ja-sao-segundo-maior-gasto-das-familias-revela-pesquisa.ghtml>. Acesso em: 10 mai 2023.

Young, H. D., & Freedman, R. A. (2014). *Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics* (13th ed.). Pearson.