

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Renata de Noronha Goehring

**O IMPACTO DO SOMBREAMENTO NA GERAÇÃO
FOTOVOLTAICA**

Santa Maria, RS, Brasil

2023

Renata de Noronha Goehring

O IMPACTO DO SOMBREAMENTO NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do título de **Engenheira Eletricista**.

Orientadora: Prof. Dra. Luciane Neves Canha

Santa Maria, RS, Brasil
2023

Renata de Noronha Goehring

O IMPACTO DO SOMBREAMENTO NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do título de **Engenheira Eletricista**.

Aprovado em 12 de Julho de 2023:

Luciane Neves Canha, Dra. Eng. (DESP-UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Cláudio Adriano Correia Cambambi (UFSM).

Renata Lautert (UFSM).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por ter me dado força e sabedoria para que eu concluisse minha graduação.

Quero agradecer meus pais Sonia Cristina de Noronha Goehring e Roberto Carlos Goehring por ter me possibilitado realizar meu sonho que era estudar em uma federal, ter tido paciência e ter me dado amor, carinho e todo o suporte que eu precisei para chegar ao final do curso. Também agradecer minha irmã Roberta Cristina Goehring, minha avó Mari Inês Mazon Guedes e a todos meus familiares que me ajudaram e incentivaram a minha formação no curso superior.

Também agradecer ao meu amigo Ronaldo Barcelos Silva que me ajudou desde o início do curso, sempre me apoiando e estando comigo, bem como a todos meus amigos e amigas que estiveram ao meu lado.

A minha orientadora, Prof. Dra. Luciane Neves Canha, pela orientação, atenção e ensinamentos adquiridos ao longo da minha graduação. E a todos que de alguma forma estiveram ao meu lado.

RESUMO

O IMPACTO SOMBREAMENTO NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

**AUTOR: RENATA DE NORONHA
GOEHRING**

ORIENTADORA: LUCIANE NEVES CANHA

O aumento da energia solar no Brasil nos últimos anos tem sido expressiva e com isso cada vez mais os consumidores querem gerar mais pra pagar menos e não se atentam aos fatores que podem atrapalhar no desempenho da geração, tal como o sombreamento realizado por nuvens, dejetos de animais, poeira e os coeficientes de temperatura de cada módulo. O estudo de sombreamento em módulos fotovoltaicos se dá pela importância de se obter o máximo de geração possível em um sistema fotovoltaico, bem como os meios tecnológicos que contribuem para se obter o máximo de irradiação solar ao longo do dia como o uso de um rastreador solar, que faz com que os módulos fotovoltaicos acompanhem o movimento do sol ao longo do dia. Sendo assim, as características dos módulos fotovoltaicos é de suma importância para se ter a máxima potência e uma melhor eficiência, desse modo, sabemos que uma grande temperatura diminui a tensão e aumenta a corrente, logo se tenho sombreamento não tenho nenhuma potência ou parcialmente dessa potência, além de poder danificar permanente o módulo. Um estudo de caso de um carport localizado na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) mostrará as curvas de geração estimada, com auxílio de um software de uma empresa de energia solar, que o sistema geraria caso estivesse em funcionamento.

Palavras-chave: Energia solar, Modulos Fotovoltaicos, Geração, UFSM.

ABSTRACT

THE IMPACT OF SHADING ON PHOTOVOLTAIC GENERATION

AUTHOR: RENATA DE NORONHA GOEHRING
ADVISOR: LUCIANE NEVES CANHA

The increase in solar energy in Brazil, in recently has been significant and with this more and more consumers want to generate more to pay less and do not pay attention to the factors that can hinder the performance of generation, such as the shading performed by clouds, animal waste, dust and the temperature coefficients of each module. The study of shading in photovoltaic modules is given by the importance of obtaining the maximum possible generation in a photovoltaic system, as well as the technological means that contribute to obtain the maximum of solar irradiation throughout the day such as the use of a solar tracker, which makes the photovoltaic modules follow the movement of the sun throughout the day. Therefore, the characteristics of the photovoltaic modules is of paramount importance to have the maximum power and a better efficiency, in this way, we know that a large temperature decreases the voltage and increases the current, so if I have shading I have no power or part of this power, besides being able to permanently damage the module. A case study of a carport located at the Federal University of Santa Maria (UFSM) will show the estimated generation curves, with the aid of a software from a solar energy company, that the system would generate if it were in operation.

Keywords: Solar Energy, Photovoltaic Module, Generation, UFSM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Módulos Fotovoltaicos sombreados.....	14
Figura 2 – Curvas IxV e PxV dos módulos da figura 1.....	14
Figura 3 – Esquemáticos dos circuitos.....	15
Figura 4 – Tipos de Sombreamento.....	15
Figura 5 – Protótipo Final.....	17
Figura 6 – Circuito Elétrico de Módulo Fotovoltaico.....	18
Figura 7 – Tipos de Rastreadores Solares.....	19
Figura 8 – Gráfico IxV	20
Figura 9 – Coeficiente de Temperatura.	21
Figura 10 – Comparação da geração em módulos FV.....	21
Figura 11 – Localização do Carport.	23
Figura 12 – Carport UFSM.....	23
Figura 13– Geração estimada.	24
Figura 14– Sombreamento dejetos animais.....	24
Figura 15– Sombreamento por poeira.	25

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

DC	Corrente Contínua
AC	Corrente Alternada
GD	Geração Distribuída
kWh	Quilo Watt Hora
MW	Mega Watt
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
I_{ph}	Fotocorrente gerada pela luz na célula fotovoltaica
T	Irradiação solar
E	Energia
I_d	Corrente no diodo equivalente da célula fotovoltaica
I_{sh}	Corrente de saturação da célula fotovoltaica
R_{sh}	Resistência paralelo da célula fotovoltaica
R_s	Resistência série da célula fotovoltaica
I	Corrente de saída da célula fotovoltaica
V	Tensão de saída da célula fotovoltaica
R	Resistência de carga
FV	Fotovoltaico
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
I_{mp}	Corrente de potência máxima
V_{mp}	Tensão em potência máxima
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
I_{sc}	Corrente de curto circuito
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	11
1.2	OBJETIVO GERAL.....	11
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.4	ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	18
2.2	CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	18
2.3	RASTREAMENTO SOLAR.....	19
3	METODOLOGIA	20
4	ESTUDO DE CASO.....	23
5	CONCLUSÃO	26
	REFERÊNCIAS	27

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países com os maiores índices de incidência solar do mundo tendo a capacidade de gerar anualmente de 1200 KWh/m² a 2400 KWh/m² por fonte solar (SOUZA et al., 2017). A partir disso, a inauguração da primeira usina solar no estado do Ceará no município de Tauá em 2011, além de impulsionar o desenvolvimento dessa fonte renovável entre os consumidores fez com a ANEEL regulamentasse a energia solar no Brasil tendo como pioneira a RN482/2012, seguido pela RN687/2015 e finalizando com a Lei 14.300/22.

A geração distribuída possui caráter expressivo no que tange ao impacto econômico e energético diante da concessionária, uma vez que exista a capacidade de consumir e injetar a energia gerada, além de alcançar lugares de difícil acesso, como moradias localizadas em morros. Diante disso, pode-se afirmar que a geração distribuída de maneira descentralizada, apresenta diversos benefícios, como redução de perdas no sistema, baixo impacto ambiental e redução no carregamento das redes (ANEEL, 2018).

Atualmente existem três maneiras que a energia solar fotovoltaica pode funcionar sendo elas, a off-grid, on-grid e híbrido. Sendo assim, o primeiro off-grid não depende da rede da concessionária para funcionar e sim de uma bateria ou um banco de baterias. Analogamente a isso, a on-grid funciona dependendo da rede da concessionária para o funcionamento do inversor e dos equipamentos quando a geração não for a suficiente para suprir o consumo elétrico. E por fim a híbrida que é a junção de ambas a on-grid e off-grid.

Segundo Nascimento (2004), o efeito fotovoltaico ocorre através dos materiais semicondutores que fazem a conversão direta da luz solar em eletricidade, ou seja, os módulos fotovoltaicos absorvem a luz solar, esta pode ser armazenada nas baterias na forma corrente contínua ou ser transformada pelo inversor de corrente contínua para corrente alternada, mas ambas tem o objetivo de gerar energia para funcionamento de aparelhos elétricos.

Analogamente a isso, para que a geração de energia solar tenha um melhor aproveitamento é necessário que os módulos fotovoltaicos estejam voltados para o norte e que não tenha nenhum tipo de sombreamento sobre eles, tais como dejetos de animais, poeira, sombras de outras residências, nuvens entre outros, caso contrário terá perdas ou não geração e poderá ter problemas elétricos nos módulos como sobreaquecimento. Uma das soluções além de se estudar como irá instalar as placas é o rastreamento solar.

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A concessionárias tem como missão oferecer aos seus consumidores uma energia de qualidade e ininterrupta, porém com o crescimento das tecnologias cada vez mais demanda-se de energia elétrica e com isso tem-se a sobrecarga nas subestações e necessidades de construção e melhorias de redes. Porém, a energia solar atualmente tem aliviado esses casos de sobrecarga e melhoria no sistema, por que gera a sua própria energia e alcança lugares de difícil acesso a concessionária, como áreas com morros.

Diante disso, o módulo fotovoltaico é o que absorve a energia solar e para que essa absorção seja máxima é necessário que não tenha nenhum tipo de interferência ao longo de sua geração que ocorre durante o dia. Por isso, é necessário estudar o impacto que o sombreamento ou a instalação na orientação solar errada causa na geração fotovoltaica, pois pode causar um sobreaquecimento dos equipamentos e perda na geração de energia. Vale salientar, que esse estudo também é de suma importância pois, com o crescente crescimento na energia solar, também aumentou a quantidade de empresas e indivíduos que compram e instalam esse sistema sem ter o devido conhecimento sobre o funcionamento da geração fotovoltaica em um módulo.

Simultaneamente a isso, o estudo será aplicado numa demonstração prática de uma instalação fotovoltaica de um Carport na Universidade Federal de Santa Maria, demonstrando os gráficos e os valores de geração estimados ao longo de um período de um ano tendo a máxima e mínima geração, assim como propor soluções já existentes no mundo atual para se ter uma melhor geração e contribuir de forma positiva com as concessionárias.

1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral, evidenciar como os diversos tipos de sombreamento nos módulos fotovoltaicos podem prejudicar a geração fotovoltaica, trazendo uma revisão bibliográfica e um estudo de caso realizado no carport da Universidade Federal de Santa Maria, que é utilizado para abastecimento de carros elétricos.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Importância da geração distribuída;
2. Explicar o impacto do sombreamento na geração fotovoltaica;
3. Trazer uma revisão bibliográfica sobre o tema de sombreamento em módulos fotovoltaicos e o rastreamento solar;
4. Trazer dados sobre o carport da Universidade Federal de Santa Maria;

1.4 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

O trabalho divide-se em 5 capítulos, onde o capítulo 1 apresenta a introdução sobre o assunto tratado no decorrer do trabalho, além dos objetivos geral e específico. O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, tanto no Brasil como no exterior sobre como o sombreamento em módulos fotovoltaicos afeta a geração.

No capítulo 3 é a metodologia do trabalho, sendo ela o processo de pesquisa e análise de trabalhos científicos. O capítulo 4 traz o estudo de caso e os gráficos da geração estimada de um sistema solar e por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo SIMPLICIO (2016), mesmo com obstáculos da vida urbana como árvores, grandes edifícios, construções, chaminés e entre outros, e os efeitos o sombreamento destes causam na geração fotovoltaica, ainda assim é rentável e tem retorno financeiro, nos piores casos, em 10 anos.

De acordo com SATHYANARAYANA (2015), concluiu que objetos que causam sombreamento uniforme, ou seja, não tem variações ao longo do dia, tem um impacto menor no desempenho se comparados com o não uniforme, baseando seu estudo em um módulo de 10W.

Para RODRIGUES (2018), o sombreamento de módulos fotovoltaicos ocasionados por fios elétricos em duas posições diferentes sendo elas vertical e horizontal tem grandes reduções de potência sendo de 2 a 5W para a posição vertical e 10 a 20 W para a horizontal.

Segundo (RODRIGO et al., 2013; PATEL; AGARWAL, 2008a; LU et al., 2013; REITER et al., 2012) um sistema fotovoltaico é altamente sensível a sombreamento parcial. Sendo assim, durante o sombreamento parcial, a potência máxima de um sistema fotovoltaico pode reduzir eficiência do sistema de acordo com o padrão do sombreamento e da configuração do sistema fotovoltaico.

- **Investigação do impacto de sombreamento em planta fotovoltaico conectada à rede no noroeste da China (SUN et al., 2014)**

Para analisar o impacto do sombreamento nas módulos fotovoltaicos pesquisadores colocaram um poste e uma planta fotovoltaica on-grid de 20kW no noroeste da China. O sistema era composto por 60 células em série com diodo bypas em módulo policristalino, como demonstra a figura 1.

O experimento teve como base comparar módulos fotovoltaicos sombreados com os não sombreados, para assim analisar as curvas corrente por tensão e potência por tensão, como demonstra a figura 2.



Figura 1- Módulos fotovoltaicos sombreados

Fonte: SUN, et al., 2014.

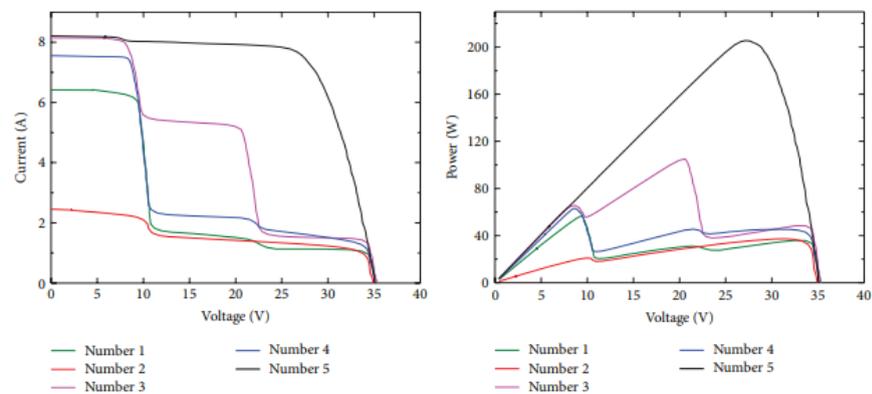


Figura 2- Curvas IxV e PxV dos módulos da figura 1.

Fonte: SUN, et al., 2014.

Por fim, este experimento teve como resultado para uma irradiância de 850W/m^2 no período da 10:00 a.m as 11:00 a.m, uma diminuição de corrente e tensão, logo uma queda na potência dos módulos, afetando assim a geração fotovoltaica.

- **Análise e comparação de diferentes configurações de ligação de módulos fotovoltaicos sob condições parciais de sombreamento (BINGÖL; ÖZKAYA, 2018)**

Experimentos foram realizados para analisar o impacto do sombreamento em diferentes arranjos fotovoltaicos, mas todos com o mesmo kWp. Sendo assim, utilizaram 36 módulos fotovoltaicos ligadas em cinco tipos de circuitos o série (a), paralelo-série (b), cruzamento total (c), conexão em ponte (d) e ninho de abelha (e), como demonstra figura 3.

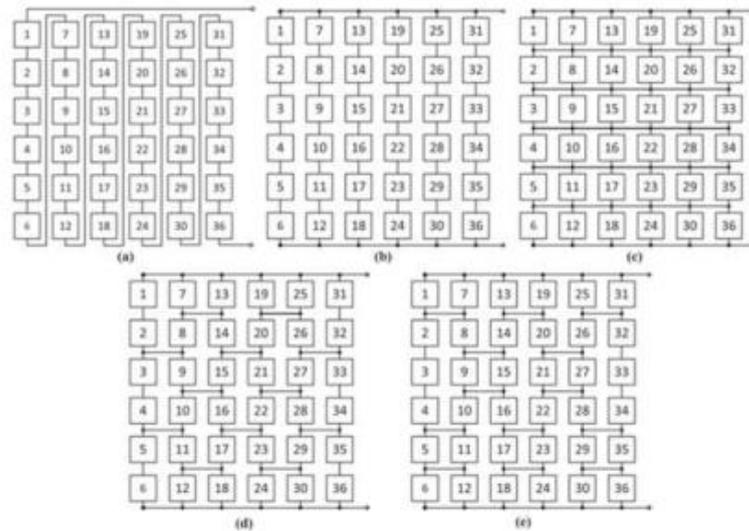


Figura 3-Esquemático dos circuitos

Fonte: BINGÖL; ÖZKAYA, 2018.

Para os resultados utilizaram suporte do software Matlab/Simulink e compararam os resultados com base em perdas de sombreamento, perdas por descasamento e fator de forma, os resultados são demonstrados na figura 4.

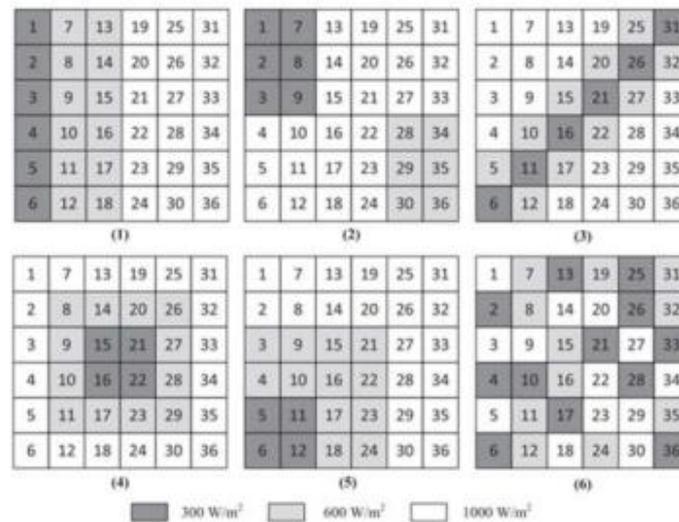


Figura 4- Tipos de sombreamento

Fonte: BINGÖL; ÖZKAYA, 2018

Por fim, é verificado que para o caso 1 as configurações série-paralelo, cruzamento total, ninho de abelha e conexão em ponte possuem a potência máxima. Para os outros padrões de sombreamento a maior potência, menor perda por descasamento e o melhor fator de forma se dá pelo circuito cruzamento total.

- **Efeito de sombreamento na performance de um painel solar fotovoltaicos (SATHYANARAYANA et al, 2015)**

Na Índia pesquisadores estudam o impacto do sombreamento uniforme e não uniforme em módulo fotovoltaico de 10 W, estudando seu efeito na potência de saída, no fator da forma e na eficiência.

Foram realizados teste com diferentes porcentagens de sombreamento sobre o módulo fotovoltaico desde 0% a 75% e com diferentes objetos como folhas de árvores, cabo elétrico, modelo de edifício e modelo de passáro. Após realizar os testes concluiu-se que as células que receberão menos irradiância comparada com as outras se comportaram como carga e causaram queda na corrente, potência e eficiência.

- **Funcionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede sob sombreamento parcial (DELINE, 2009)**

O estudo tem como base analisar a redução da potência de uma string fotovoltaica conectada a rede quando em condição de sombreamento.

Tipicamente, módulos de silício policristalino contem diodos by-pass para prevenir danos de corrente reversa em células parcialmente sombreadas. Esses dispositivos são dispostos a cada conjunto de células. O diodo irá conduzir quando a potência dissipada em uma célula sombreada for suficiente para causar altas temperaturas (BHATTACHARYA; NEOGY, 1991; BISHOP, 1989).

Em contrapartida, apesar do diodo de by-pass não ter como funcionalidade melhorar a performance do módulo fotovoltaico em condições de sombreamento, ele é muito útil nesse aspecto, pois acaba isolando as células sombreadas, melhorando a eficiência deste módulo fotovoltaico.

Para análise, foi realizado dois experimentos o primeiro era sombrear todos os dez módulos fotovoltaico de 165W por meio de um filme fosco e o segundo foi colocar uma placa de madeira de 3600m² a 50m do último módulo fotovoltaico e um cano PVC na frente do penúltimo módulo fotovoltaico.

Por fim, ambos os experimentos tiveram perda na potência de saída e tiveram os módulos sombreados, sendo o segundo experimento o que teve uma maior potência relativa chegando a 60%, e no primeiro experiento a atuação do diodo de bay-pass o que garantiu a queda na tensão de saída a um terço da original.

- **Características de painéis fotovoltaicos sob sombreamento (TADJINE; REKIOULA, 2016)**

Esse estudo tem como base observar as características elétricas de sistema fotovoltaico de 80Wp com módulo da marca Sunthe, nas diversas condições climáticas e de sombreamento. Como foco de estudo o autor analisou seis tipos diferentes de sombreamento variando de 100%, 75%, 50% e 25%, depois um coberto por folhas e outro por areia.

Experimentos foram realizados variando a irradiância e a temperatura sobre o módulo e os autores tiraram as seguintes conclusões, que a tensão de circuito aberto (V_{oc}) diminui quando a irradiância aumenta e a corrente de curto circuito (I_{sc}) é proporcional a irradiância e a temperatura. Além disso, também perceberam queda na eficiência, nas curvas $I \times V$, $P \times V$ e por último a atuação do diodo de bypass que não possibilitou o módulo fotovoltaico de ter pontos quentes.

- **Desenvolvimento de sistema de rastreamento solar para painel fotovoltaico (Nicolau, Pâmela, C. S., 2018)**

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um rastreador solar de pequeno porte para sistema fotovoltaico, com o objetivo de se obter maior aproveitamento da irradiância solar, o exemplo do protótipo segue na figura 5.

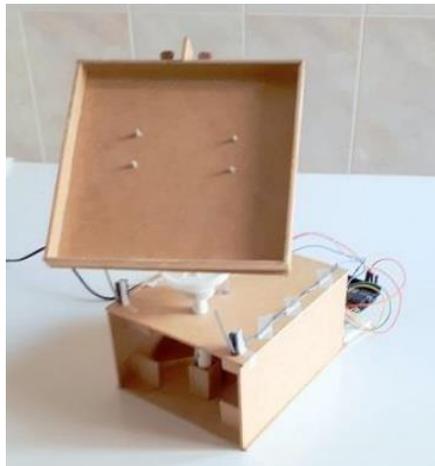


Figura 5- Protótipo final

Fonte: (NICOLAU, PÂMELA,C.,S., 2018)

Para o funcionamento do controle do rastreador foi utilizado um Arduino UNO, um software com linguagem C, motor de corrente contínua 5V, 2 LDRs, 2 sensores de fim de curso, 4 resistores de $10k\Omega$, 1 fonte corrente contínua 5V, uma protoboard e os materiais para a carcaça. Após a construção se obteve resultados positivos, pois o

protótipo executou corretamente o que era esperado, acompanhar a luminosidade do sol durante o dia e retornar ao estado inicial a noite.

2.1 MÓDULO FOTOVOLTAICO

Atualmente os dois tipos de módulos solares mais utilizados são as monocristalinos e policristalinos. A diferença entre eles é o modo que os cristais de silício são construídos no módulo, ou seja, na monocristalina é um bloco único de cristal de silício, já na policristalina é construída com vários pequenos cristais silício. Além da diferença construtiva a eficiência em módulos fotovoltaicos monocristalino é mais alta por se tratar de um bloco único, isso também o torna mais caro no mercado atual.

Diante disso, existem módulos solares de vários valores de potência, por exemplo, de 330W a 660W e ainda dois tipos de borda do módulo, a half screen e a full screen, a diferença das duas é a largura dessa borda sendo a full screen quase inexistente, fazendo com que ela absorva mais energia e tendo melhor geração que a half screen.

As características elétricas variam de acordo com a potência e o tipo de módulo fotovoltaico, porém a sua construção e o seu circuito equivalente é o mesmo para todos os módulos fotovoltaicos como evidencia a Figura 6, de acordo com BOUNECHBA, 2014. Porém, os fabricantes tipicamente utilizam o termo Standart Test Conditions (STC) ou condições de teste padrão nos dados de catálogo. Neste caso, os valores de irradiância e temperatura são fixados em $S = 1000 \text{ W/m}^2$ e $T = 298,15 \text{ oK}$, respectivamente (MURILLO-SOTO; MEZA, 2018; BUNI et al., 2018).

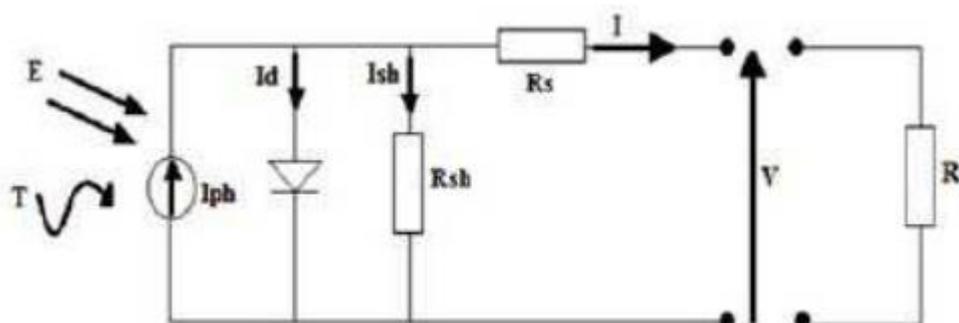


Figura 6 – Circuito elétrico de um Módulo Fotovoltaico

Fonte: (BOUNECHBA, 2014).

2.2 CÉLULA FOTOVOLTAICA

Um conjunto de células fotovoltaicas formam um módulo fotovoltaico, sendo assim a célula fotovoltaica absorve fótons, esses quando absorvidos excitam elétrons que fluem através

das células, gerando a eletricidade.

Uma célula fotovoltaica é composta por uma junção de um material semicondutor, mas usualmente sendo o silício que é dopado para que cada junção tenha uma carga elétrica positiva e a outra negativa, dando origem assim a um campo elétrico que é fundamental para o funcionamento da célula fotovoltaica. Diante disso, a junção superior da célula é dopada com fósforo e a junção inferior com boro.

Atualmente existem diferentes tipos de células solares sendo elas, a monocristalina, policristalinas, amorfas, CdTe (telureto de cádmio), CIS (cobre, índio, selênio) e o CIGS (cobre, índio, gálio e selênio), a diferença entre elas é a eficiência esta sendo maior na monocristalina.

2.3 RASTREAMENTO SOLAR

O rastreamento solar é importante para a geração fotovoltaica, pois ele garante uma maior eficiência e geração dos módulos fotovoltaicos ao acompanhar ao longo do dia o movimento do sol obtendo assim uma maior irradiância solar.

Diante disso, existe dois tipos de rastreadores solares sendo eles o rastreador de eixo único e o rastreador de dois eixos como demonstra a figura 7. De acordo com Trevelin (2014) o aumento da potência elétrica gerada ao utilizar o eixo único é de 25% e o de duplo eixo de 39,2% quando comparadas com o sistema fixo.

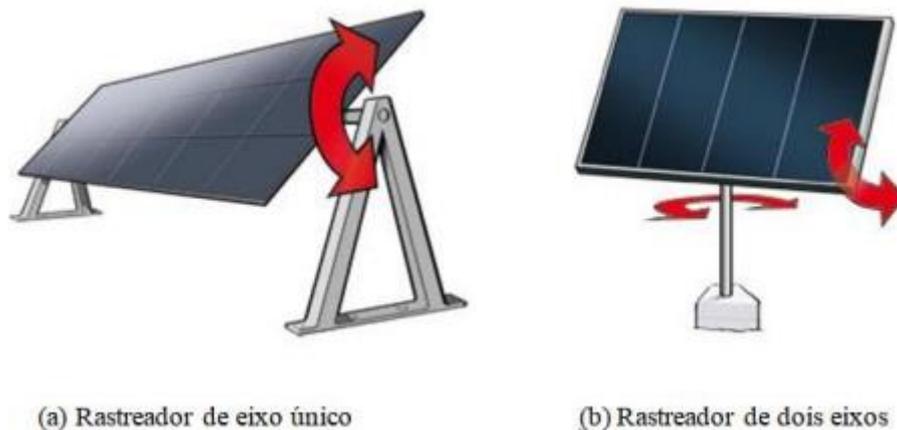


Figura 7- Tipos de rastreadores solares

Fonte: Solar Choice (2010)

3. METODOLOGIA

A metodologia se dará a partir do estado da arte, ou seja, um mapeamento e análise de estudos sobre a temática impacto do sombreamento em módulos fotovoltaicos e sobre o rastreamento solar.

Para analisar os impactos que o sombreamento causa na geração fotovoltaica, primeiramente é necessário entender como funciona a sua geração. Diante disso, um módulo fotovoltaico funciona com o deslocamento de elétrons pelo silício quando este recebe um fóton solar, logo a geração só acontece em dias ensolarados.

Diante disso, para entender a análise do impacto do sombreamento em módulos fotovoltaicos é necessário entender o principal conceito relacionado a geração dos módulos fotovoltaicos que é a potência elétrica em relação a corrente e tensão elétrica. Sendo assim, a corrente elétrica depende da irradiação solar e a tensão elétrica é influenciada pela temperatura, logo se a temperatura no módulo aumenta a tensão diminuiu afetando a sua eficiência.

Simultaneamente a isso, os datashets dos módulos fotovoltaicos trazem alguns valores elétricos de tensão, corrente e potência sua análise sendo da seguinte maneira, a tensão V_{oc} e I_{sc} são zero quando a geração de potência está em condições de circuito aberto, conseqüentemente existe apenas tensão (V_{mp}) e corrente (I_{mp}) que multiplicadas dará a potência máxima (P_{max}), quando existir geração, como figura 8.

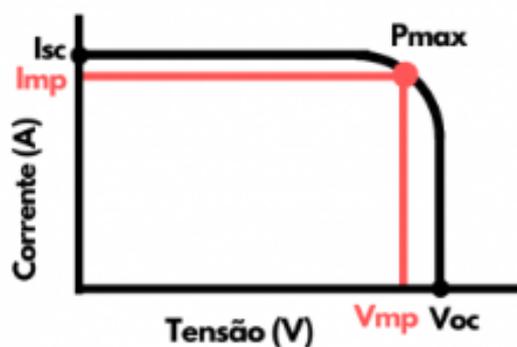


Figura 8- Gráfico IxV
Fonte: Energês

Para o entendimento de como a temperatura afeta a tensão e corrente é necessário olhar os coeficientes de temperatura para uma temperatura de operação de -40°C a 85°C , que se encontrar no datashet dos módulos fotovoltaicos, como demonstra figura 9, de

um módulo da marca BYD de potência 335W.

COEFICIENTES DE TEMPERATURA	
COEFICIENTE DE TEMPERATURA DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	0.07% / °C
COEFICIENTE DE TEMPERATURA DA TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO	-0.31% / °C
COEFICIENTE DE TEMPERATURA DA POTÊNCIA DE PICO	-0.39% / °C

Figura 9 – Coeficientes de temperatura
Fonte: Datasheet BYD

De acordo com a figura 9 é possível se estimar o percentual de perda de potência que o módulo fotovoltaico terá estando a uma temperatura diferente da nominal que é de 25°C. Por exemplo, se o módulo fotovoltaico estiver em uma temperatura de 42°C a perda percentual do módulo de 335W será de 14,43%, ou seja a potência máxima do módulo fotovoltaico estará esse percentual abaixo da potência informada na ficha técnica.

Segundo Elismar Ramos Barbosa, Merlim dos Santos Ferreira de Faria e Fábio de Brito Gontijo, a eficiência das placas com sombreamento por conta de sujeira diminui em cerca de 10,26%, por que as sujeiras impedem que os módulos fotovoltaicos recebam a irradiância solar. Para mitigar esse problema os autores realizaram a limpeza e plotaram um gráfico comparando antes e depois da limpeza do sistema comprovando a que se tem a queda na geração, como segue a figura 10.

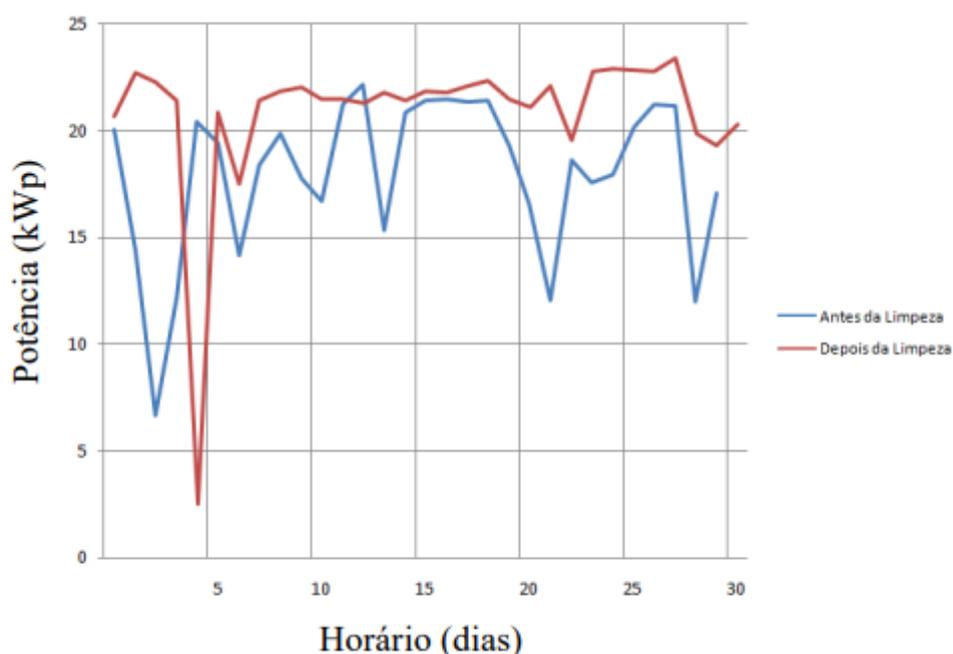


Figura 10- Comparação da geração em módulos FV
Fonte: Barbosa, Elismar R; Faria, Merlim, S.F.;Gontijo, Fábio. B

A utilização de rastreadores solares tem suas vantagens e desvantagens em uma instalação fotovoltaica, sendo assim a vantagem de se ter um rastreador solar é poder aumentar a geração de energia principalmente no inverno em que a radiação solar é menor comparada ao verão, porém ele é um mecanismo com alto custo e tem que ser realizada uma manutenção periódica em seu maquinário.

4. ESTUDO DE CASO

Analisaremos a geração fotovoltaica de um carport localizado na Universidade Federal de Santa Maria, que é utilizado para recarregar carros elétricos, ele está localizado atrás do Centro de Tecnologia universidade de acordo com a figura 11.



Figura 11- Localização do Carport
Fonte: Grafana

O carport é composto por 30 módulos fotovoltaicos de 335W da marca BYD, totalizando um sistema de 10,05kWp, seu arranjo é composto por três placas em cada linha e dez colunas, em uma inclinação de 8,2°, de acordo com figura 12.



Figura 12 – Carport UFSM
Fonte: Vinicius de Lucca

De acordo com os dados extraídos do Cresesb para a irradiação no local aonde as placas estão instaladas, utilizando o radiasol para descobrir a radiação diária e com o

auxílio de software de uma empresa solar do qual já estima as perdas como sombreamento por nuvens, perdas por coeficiente de temperatura, diferença de geração entre módulos, cabeamentos, assim a figura 13 tras a geração estimada mensal por um ano.

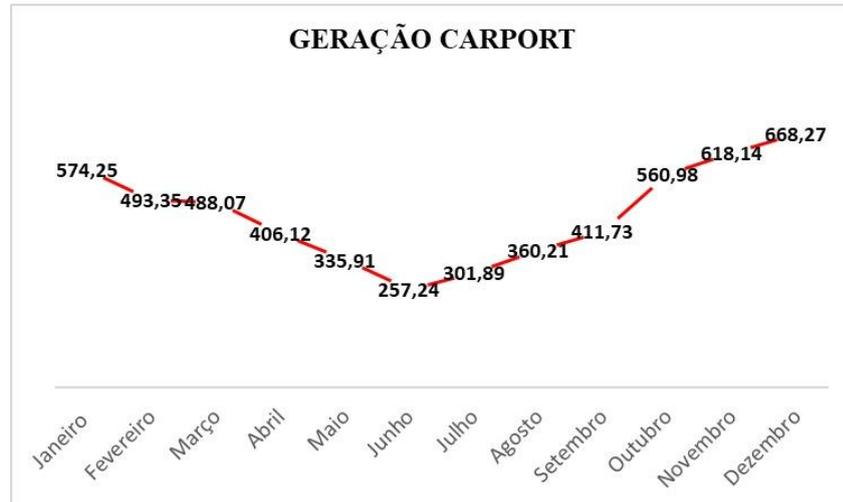


Figura 13- Geração esperada
Fonte: Autora

Os dados seriam comparados com a geração real do carport, porém o sistema não está em funcionamento e não se tem os dados da geração anteriores. Porém, pelas figuras 14 e 15, se pode concluir que a geração solar não seria a esperada por conta do sombreamento causado por desejos animais e por poeira, fazendo com que os módulos tenha quedas na geração. Também, a existência de nuvens ao logo do dia, como se observa no fundo das figuras faz com que determinados momentos a irradiância solar nos módulos diminuam.



Figura 14- Sombreamento por desejos animais
Fonte: Autora



Figura 15- Sombreamento por poeira
Fonte: Autora

Como solução, causada por esse sombreamento é necessário a realização da limpeza dos módulos fotovoltaicos podendo ser realizada com água e detergente, não é necessário a aplicação de um rastreador solar por conta da estrutura de carport funcionar como uma garagem e proteção para os carregadores elétricos.

5. CONCLUSÃO

Após a primeira grande usina solar no Brasil a ANEEL criou e aprimorou regulamentações até a lei vigente, sobre os deveres e direitos dos consumidores. Diante disso, várias empresas de energia solar foram surgindo no Brasil e também os estudos sobre essa fonte de energia, como o impacto do sombreamento causa na geração dos módulos fotovoltaico.

Existem vários tipos de sombreamento, como folhas, dejetos animais, edificações, orientações solares equivocadas, nuvens entre outros, todos mesmo sendo mínimos afetam diretamente a geração dos módulos fotovoltaicos, pois impede que a radiação esteja em contato com o módulo fotovoltaico.

As características elétricas dos módulos fotovoltaicos se encontram no datasheet específico de cada fornecedor e variam de acordo com a potência do módulo, sendo assim quanto maior os coeficientes de temperatura e maior a diferença da mesma, maior será a perda de tensão no módulo com isso menor a corrente e a potência, as perdas sendo ainda maiores se o módulo estiver com qualquer tipo de sombreamento.

O uso de rastreadores solares trazem muitas vantagens a um sistema de geração fotovoltaica, pois ele acompanha o movimento solar ao longo do dia garantindo melhor irradiação solar e conseqüentemente sendo mais difícil o sombreamento de placas solares, uma solução para lugares que possuem grande espaço e requerem máxima geração tendo apenas que realizar a manutenção periódica do maquinário.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Geração Distribuída. 2018. Disponível em: Acesso em: 16 jul. 2023.

BARBOSA, ESLISMAR, R.; FARIA, MERLIM, S. F.; GONTIJO, FÁBIO, B. Influência da sujeira na geração fotovoltaica. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018.**

BINGÖL, O.; ÖZKAYA, B. Analysis and comparison of different PV array configurations under partial shading conditions. **Solar Energy, v. 160, p. 336-343, 2018.** ISSN 0038-092X.

CHAVES, MATHEUS, P. Estudo sobre sombreamento em planta fotovoltaica localizada em Zona Urbana de Fortaleza-CE. **Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, 2018.**

DELINE, C. Partially shaded operation of a grid-tied PV system. **Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2009 34th IEEE, 2009. IEEE. p.001268-001273.**

BYD. Policristalino Half-Cell, PHK-36-SÉRIE-5BB 325-350W, 2019. Disponível em: https://www.byd.ind.br/2020/wpcontent/uploads/2020/09/PHK_36_SERIES_5BB_pnl_solar_byd_01_020320.pdf. Acessado: 30, julho.

FREIRE, FELIPE. Célula fotovoltaica: como funciona?. Disponível em: <https://www.shareenergy.com.br/como-funciona-celula-fotovoltaica/>. Acessado: 18, julho.

K. Tadjine and D. Rekioua. "Photovoltaic panels characteristics under shadows," *2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Marrakech, Morocco, 2016, pp. 873-878, doi: 10.1109/IRSEC.2016.7983889.*

MURILLO-SOTO, L. D.; MEZA, C. A simple temperature and irradiance-dependent expression for the efficiency of photovoltaic cells and modules. In: IEEE. 2018 IEEE 38th **Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVIII).** [S.l.], 2018. p. 1–6.

RODRIGUES, M. S.; TELES, M. B.; MACÊDO, W. N. Resultados experimentais de sombreamento parcial em módulos fotovoltaicos. **VII Congresso Brasileiro de Energia SolarCBENS 2018, 2018.**

RODRIGO, P.; FERNÁNDEZ, E. F.; ALMONACID, F.; PÉREZ-HIGUERAS, P. A simple accurate model for the calculation of shading power losses in photovoltaic generators. **Solar Energy**, Elsevier, v. 93, p. 322–333, 2013.

SATHYANARAYANA, P. et al. Effect of shading on the performance of solar pv panel. **Energy and Power**, v. 5, n. 1A, p. 1-4, 2015. ISSN 2163-1603.

SIMPLICIO, R. S. et al. Impacto do sombreamento em um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. 2016.

SOUZA, O. DE et al. Avaliar a viabilidade de micro geração de energia solar fotovoltaica distribuída na cidade do Rio de Janeiro com o emprego de Opções. **SEGeT**, p. 17, 2017.

SUN, Y. et al. Investigating the impact of shading effect on the characteristics of a large scale grid- connected PV power plant in Northwest China. **International Journal of Photoenergy**, v. 2014. ISSN 1110-662X.