Curso de:

ENGENHARIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso:

O SOMBREAMENTO E SUAS CONSEQUÊNCIAS NA EFICIÊNCIA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Autor:

BRENO ALVES ANDRADE

Orientador:

Me. MURILO BATISTA LOPES

Palmas - TO

2022

UniCatólica

BRENO ALVES ANDRADE

O SOMBREAMENTO E SUAS CONSEQUÊNCIAS NA EFICIÊNCIA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

Projeto apresentado como requisito parcial para obtenção de grau de bacharel em Engenharia Elétrica, habilitação em Engenharia Elétrica do Centro Universitário Católica do Tocantins, sob a orientação da professora Dra. Valdirene Cássia da Silva.

Sugestão de orientador: Me. Murilo Batista Lopes.

Palmas – TO
2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à Deus por abençoar e guardar a minha vida e me instruir da melhor forma para a realização desse projeto.

Agradeço imensamente ao meus pais pelo carinho, apoio, proteção e alicerce em toda minha vida.

Agradeço a minha irmã Bruna por todo carinho e companheirismo.

Agradeço ao meu amigo Patrick por ter me ajudado na construção desse trabalho, tirando dúvidas, e ter me ajudado na coleta dos dados e apontando os pontos que deveria melhorar.

Agradeço aos meus orientadores Dra. Valdirene Cássia da Silva. e Me. Murilo Batista Lopes por não medirem esforços para me auxiliarem nessa jornada, e pela disponibilidade e considerações que enriqueceram meu trabalho.

Agradeço ao Centro Universitário Católica do Tocantins.

Agradeço a empresa Renov Solar por me darem a oportunidade de estágio e alavancar o meu conhecimento e amadurecimento.

RESUMO

O presente trabalho refere-se à avaliação da influência do sombreamento na geração de energia de um sistema solar fotovoltaico, analisando a potência instantânea do sistema. A metodologia consistiu em uma pesquisa exploratória e experimental, desenvolvida através da revisão bibliográfica e da coleta de dados a partir de testes em campo. Além de explanar conceitos teóricos sobre sistemas fotovoltaicos, e verificando na prática as tecnologias de otimização de potência. Foram realizadas 8 condições de sombreamento em um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica localizado na cidade de Palmas – TO, para análise do comportamento da potência em diferentes condições de sombreamento. As condições de sombreamento foram classificadas de A à H, na qual as condições A, B ,C, H e I foram realizadas em apenas um módulo, as condições D, E e F foram realizadas em condições diferentes projetadas sobre dois módulos, enquanto as condições A, B, C, D, E e H foram realizadas em módulos da MPPT 1, as condições F e G foram realizadas em módulos da MPPT 2. Os resultados encontrados foram comparados entre as condições de sombreamento projetadas. Pode-se constatar a eficácia dos módulos *Half-cell* e a utilização dos diodos de *by-pass*. Também foi analisado a formação de pontos quentes em um módulo fotovoltaico, foi projetado por uma pequena pedra, na qual o diodo de b*y-pass* não conseguiu identificar esse pequeno sombreamento, devido a ser somente a nível de testes o ponto quente foi causado de forma proposital, evitando prejudicar as células fotovoltaicas.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica. MPPT. Potência instantânea. Diodos de *by-pass*.

ABSTRACT

The present work refers to the evaluation of the influence of shading on the energy generation of a photovoltaic solar system, analyzing the instantaneous power of the system. The methodology consisted of an exploratory and experimental research, developed through literature review and data collection from field tests. In addition to explaining theoretical concepts about photovoltaic systems, and verifying in practice the power optimization technologies. Eight shading conditions were performed in a photovoltaic system connected to the electricity grid located in the city of Palmas - TO, to analyze the behavior of the power in different shading conditions. The shading conditions were classified from A to H, in which conditions A, B, C, H and I were carried out in only one module, conditions D, E and F were carried out in different conditions projected on two modules, while the shading conditions were carried out in different conditions. conditions A, B, C, D, E and H were carried out in modules of MPPT 1, conditions F and G were carried out in modules of MPPT 2. The results found were compared between the projected shading conditions. One can verify the efficiency of the Half-cell modules and the use of the by-pass diodes. The formation of hot spots in a photovoltaic module was also analyzed, it was designed by a small stone, in which the by-pass diode could not identify this small shading, due to being only at the level of tests the hot spot was caused in a way intentionally, avoiding harming the photovoltaic cells.

Keywords: Photovoltaic solar energy. MPPT. Instant power. Bypass diodes.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: AMOSTRA DE INDICADORES ENERGÉTICOS E EMISSÕES DE CO2 MUNDIAL - 2009. 16
FIGURA 2: MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA EM 2020 17
FIGURA 3: MAPA DA RADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL 22
FIGURA 4: COMPOSIÇÃO DO ESPECTRO DE RADIAÇÃO SOLAR 24
FIGURA 5: ÁTOMOS DE SILÍCIO 25
FIGURA 6: ELÉTRONS MIGRANDO PARA O LADO NEGATIVO 26
FIGURA 7: FORMAÇÃO DA JUNÇÃO PN 27
FIGURA 8: EFEITO FOTOVOLTAICO DA JUNÇÃO PN 27
FIGURA 9: CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS 28
FIGURA 10: CÉLULA FOTOVOLTAICA MONOCRISTALINA 29
FIGURA 11: CÉULA FOTOVOLTAICA POLICRISTALINA 30
FIGURA 12: CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO AMORFO 31
FIGURA 13: CONEXÃO ELÉTRICA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS EM UM MÓDULO 32
FIGURA 14: COMPONENTES DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO 32
FIGURA 15: CURVA CARACTERÍSTICA I-V E CURVA DE POTÊNCIA P-V 34
FIGURA 16: CURVA DE GERAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO 37
FIGURA 17: GRÁFICO DE GERAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO COM SOBREDIMENSIONAMENTO.....39
FIGURA 18: CURVA CARACTERÍSTICA DA *STRING*.....41
FIGURA 19: EFEITO DE UMA SOMBRA LOCALIZADA SOBRE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO CONVENCIONAL.....42
FIGURA 20: MÓDULO DE 72 CÉLULAS COM 3 DIODOS DE *BYPASS*. 24 CÉLULAS EM PARALELO COM CADA DIODO DE *BYPASS*.....43
FIGURA 21: MÓDULO FOTOVOLTAICO COM SOMBRA EM UMA CÉLULA SEM O DIODO DE *BYPASS*.....44
FIGURA 22: CORRENTE FLUINDO POR UM MÓDULO COM UM DIODO DE *BYPASS* ACIONADO.....44
FIGURA 23: RESULTADO DE SOMBREAMENTO NA CURVA CORRENTEXTENSÃO DO MÓDULO.....46

FIGURA 24: COMPARAÇÃO DO SOMBREAMENTO EM MÓDULO COM E SEM A TECNOLOGIA *HALF-CELL*.....46
FIGURA 25: DISPOSIÇÃO DOS MÓDULOS SOBRE O TELHADO.....48
FIGURA 26: ARRANJO FOTOVOLTAICO.....48
FIGURA 27: DEMONSTRAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SOMBREAMENTO.....50
FIGURA 28: PEDRA SOBRE A CÉLULA FOTOVOLTAICA.....52
FIGURA 29: GERAÇÃO DA MPPT1 (PV1) E MPPT 2 (PV2) 54
FIGURA 30: PONTO QUENTE EM UM MÓDULO FOTOVOLTAICO.....59

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: CONDIÇÕES DE SOMBREAMENTO.....50
TABELA 2: TABELA DE COLETA DE DADOS DO DIA:01/09/2022.....55
TABELA 3: TABELA DE COLETA DE DADOS DO DIA:02/09/2022.....56
TABELA 4: TABELA DE COLETA DE DADOS DO DIA:03/09/2022.....57
TABELA 5: TEMPERATURA NOS DIAS E NO MOMENTO DOS TESTES.....58
TABELA 6: COMPORTAMENTO DA POTÊNCIA NAS CONDIÇÕES DE SOMBREAMENTO.....60
TABELA 7: PERDA DE POTÊNCIA EM PORCENTAGEM.....61
TABELA 8: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica;

CA - Corrente Alternada;

CC - Corrente Contínua;

MPPT - *Maximum Power point tracking*, em português, rastreador de máximo ponto de potência;

SEB - Sistema Elétrico Brasileiro;

EPE - Empresa de Pesquisa Energética;

STRING - Termo utilizado para Módulos conectados em uma série fotovoltaica;

OVERSIZING - Termo utilizado para sobrecarregando de inversor;

CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito.

PV - Mesmo termo que MPPT.

LISTA DE GRANDEZAS

I - Corrente Elétrica (A);

W - Potência Elétrica em watts;

kW - Potência elétrica em kilowatts;

P - Potência Elétrica (W);

V - Tensão Elétrica em volts (V);

V mp - Tensão de máxima potência do módulo (V);

I mp - Corrente de máxima potência (A);

Isc - Máxima corrente que pode ser entregue em tensão nula (A);

Pmáx - Potência nominal máxima (Wp);

Voc - Máxima tensão que pode ser entregue em corrente nula (W).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
1.1 JUSTIFICATIVA 12
1.2 PROBLEMATIZAÇÃO 13
1.3 OBJETIVOS 13
1.3.1 Geral 13
1.3.2 Específicos 14
2 REFERENCIAL TEÓRICO 15
2.1 ENERGIA E SUSTENTABILIDADE. 15
2.2 ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL. 16
2.3 HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. 17
2.4 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL. 18
2.5 POTENCIAL SOLAR NO BRASIL. 20
2.6 RADIAÇÃO SOLAR 22
2.7 EFEITO FOTOVOLTAICO 23
2.8 CÉLULA FOTOVOLTAICA 26
2.8.1 CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO MONOCRISTALINA 27
2.8.2 CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO POLICRISTALINA 28
2.8.3 CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO AMORFO 29
2.9 MÓDULO FOTOVOLTAICO 30
2.10 INVERSOR FOTOVOLTAICO 33
2.11 ESTUDO DO SOMBREAMENTO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS 39
2.12 TECNOLOGIA PARA MINIMIZAÇÃO DOS EFEITOS CAUSADOS PELO SOMBREAMENTO 42
3 MATERIAIS E MÉTODOS 46
3.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA A REALIZAÇÃO DA PESQUISA 46
3.2 METODOLOGIA 48
3.3 COLETA DE DADOS 51
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 52

4.1 ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA 54
4.2 ANÁLISE DE PONTO QUENTE 56
4.3 ANÁLISE DA POTÊNCIA 59
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 63
REFERÊNCIAS 65
ANEXO 1 – DATASHEET DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS 67
ANEXO 2 – DATASHEET DO INVERSOR FOTOVOLTAICO 68

1 INTRODUÇÃO

A eletricidade hoje é muito importante para a realização das atividades dos seres humanos, e hoje ela está presente no nosso dia a dia. Nas residências utiliza-se a energia para o funcionamento dos equipamentos elétricos, iluminação, aquecimento, entre outros; o mundo industrial depende diretamente da eletricidade para seu funcionamento.

Devido ao crescimento acelerado das indústrias e o crescimento populacional, a demanda por energia tem aumentado bruscamente. O Brasil possui um potencial energético especialmente por fontes renováveis, sendo a principal fonte de energia a hidrelétrica, proveniente dos recursos hídricos. Porém essa fonte de energia tem se tornado escassa, devido ao aumento do período de estiagem, que deixa o nível dos reservatórios abaixo do limite, levando a ativação das usinas termoelétricas, que utiliza combustíveis fósseis para geração da eletricidade, porém isso gera um custo muito alto, além de emitir muitos gases poluentes que agridem o meio ambiente.

Por isso, há a necessidade de desenvolver investimentos e pesquisas para diversificar a matriz elétrica, visando minimizar impactos sociais, econômicos e no meio ambiente como, por exemplo, a emissão de poluentes e gases do efeito estufa. Há algumas fontes de energias que causam menos impactos socioambientais como: solar, biomassa e eólica.

No Brasil, a energia advinda da radiação solar começou a ser aproveitada no período em que o Brasil começou a desenvolver programas de atendimento da zona rural, e eram instalados sistemas off-grid, com um banco de baterias e controlador de carga e devido a serem em regiões isoladas, os sistemas fotovoltaicos eram desconectados da rede de energia elétrica. (TOLMASQUIM, 2016).

Com a ampliação das normas reguladoras, a geração de energia descentralizada foi potencializada. O mercado de energia fotovoltaica passou por um crescimento considerável, e hoje soma mais de 3 GW de geração elétrica na matriz elétrica brasileira.

A geração distribuída, nome dado quando a fonte de geração está próxima ou dentro do consumidor, fez com que diminuísse as perdas na transmissão e distribuição de energia, mantendo a estabilidade da rede elétrica. Os sistemas fotovoltaicos podem ser conectados à rede (On Grid) e isolados (Off Grid). Na elaboração do projeto, é de

extrema importância dimensionar os cabos corretamente, a quantidade de geração desejada e avaliar estruturas próximas que podem sombrear os módulos fotovoltaicos.

Sistemas fotovoltaicos que sofrem com sombreamento, tem a sua geração totalmente limitada. A corrente das células fotovoltaicas quando afetada pelo sombreamento é quase nula, logo isso afeta toda a corrente da série de módulos, diminuindo a geração total do sistema.

1.1 JUSTIFICATIVA

Esta pesquisa se justifica uma vez que a participação de energias renováveis tem contribuído para diversificar a matriz energética, e assim tornando o Brasil menos dependente de fontes de energia suja. Sabe-se que a geração de energia proveniente das usinas hidrelétricas corresponde a maior parte da matriz energética, porém, devido à grandes períodos de seca, ela não tem sido suficiente para suprir a demanda de energia.

A alternativa de diversificação da matriz energética é o uso da energia solar fotovoltaica, uma fonte limpa e inesgotável, que sua fonte de energia é a radiação solar, e se encontra disponível por quase todo o ano. Para o máximo aproveitamento da geração do sistema fotovoltaico, não deve haver bloqueio da radiação solar nos módulos fotovoltaicos.

Quando os módulos são expostos à sombreamento, há um bloqueio da luz que incide sobre os módulos, ocasionando perdas na geração de energia. A falta de luz causa uma baixa produção de corrente nas células, e acabam funcionando como uma carga, ou seja, as células vão consumir energia ao invés de gerar, e consequentemente irão sobreaquecer ocasionando os pontos quentes, podendo danificar as células fotovoltaicas.

Portanto, é importante analisar na elaboração do projeto do sistema fotovoltaico estruturas próximas que podem causar sombreamento, porém, em locais onde o sistema já está montado, pode surgir sombreamento posteriormente a instalação do sistema, devido a construções próximas e crescimento de árvores.

Nesse caso, pode ser feito uso de tecnologias para amenizar os efeitos do sombreamento, como uso de módulos Half-Cell, diodos de *by-pass* ou micro inversores. Esse projeto é motivado pelos estudos dessas tecnologias e melhor aprimoramento delas.

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

O Brasil possui uma grande extensão em área e é cortado pela linha do Equador, o que o torna um país tropical, com um grande índice de radiação solar durante todo o ano. Isso contribui para que a energia solar fotovoltaica se torne a principal fonte de energia da matriz elétrica brasileira.

Segundo especialistas, nos últimos anos, devido a incentivos do governo, e maior competitividade do mercado de energia solar, houve uma redução de mais de 70% no preço da energia solar. Essa redução de preço também se deve ao aumento da tarifa de energia elétrica nos últimos anos, que levou os consumidores a buscarem outras fontes de energia. Dessa forma, muitos consumidores passaram a gerar a sua própria energia, ou seja, a geração de energia elétrica ficou mais perto do consumidor, o que é chamado de geração distribuída.

Devido a geração de energia elétrica estar mais próxima do consumo, teve-se algumas vantagens, como: menos perdas no sistema de geração e melhor qualidade de energia. Porém, em muitas instalações, o projetista não leva em consideração edificações, árvores ou fachadas próximas, que causam sombreamento total ou parcial, prejudicando a eficiência da geração e aumentando as perdas de energia. Frente a esse contexto, questiona-se: como o sombreamento afeta a eficiência da geração de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

Compreender o efeito do sombreamento na geração de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos.

1.3.2 Específicos

- Definir as características elétricas das células e dos módulos sobre influência do sombreamento;
- Descrever as tecnologias para a minimização dos impactos causados pelo sombreamento em módulos fotovoltaicos;
- Analisar a geração do sistema fotovoltaico sobre cenários de sombreamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ENERGIA E SUSTENTABILIDADE.

A energia elétrica está presente desde a criação do planeta. Desde então ela tem sustentado a vida humana e garantido o desenvolvimento do planeta. Ela exerce um papel muito importante no planeta, satisfaz as necessidades do ser humano e isso leva a diferentes níveis de consumo entre países desenvolvidos e subdesenvolvidos. Ao longo dos anos o consumo de energia tem crescido e mal distribuído. Estima-se que atualmente a energia que uma pessoa consome para satisfazer as suas necessidades, é 130 vezes maior que no período paleolítico (JUNIOR; REIS 2016).

O modelo energético adotado no passado por países desenvolvidos, utilizado para suprir a crescente demanda de energia, levou à criação e investimentos em grandes projetos, como a construção de usinas hidrelétricas, nucleares e termelétricas e refinarias de petróleo. A relação entre o consumo de energia e o desenvolvimento econômico gerou dependência econômica e social entre países, desarticulação no setor energético, danos ambientais, entre outros... Tudo isso contribuiu para um crescimento autônomo de alguns países e setores em relação a outros, e até mesmo dentre eles (JUNIOR; REIS 2016).

Essas estratégias adotadas em relação à matriz energética geraram grande crescimento e desenvolvimento econômico, mas no cenário atual, provavelmente essas estratégias não geram tanto desenvolvimento como antigamente. Hoje o consumo energético é bastante elevado, vivemos em um cenário econômico, social e ambiental diferente em cada país. Por isso, os países devem realizar um estudo de sua política energética, considerando o consumo futuro de energia (NETO; CARVALHO, 2012).

Os países desenvolvidos possuem uma excelente estrutura e desenvolvimento social, político e econômico em relação a países subdesenvolvidos. Dessa forma, possuem um maior consumo de energia, estima-se que 70% do consumo mundial de energia vêm dos países desenvolvidos e possuem apenas 30% da população mundial. (JUNIOR; REIS 2016).

Na tabela abaixo são listados alguns países, entre eles o Brasil, para comparação entre desenvolvimento econômico, consumo de energia e emissão de dióxido de carbono.

Figura 1 – Amostra de Indicadores Energéticos e Emissões de Co2 Mundial - 2009.

País	Produção (Mtep)	Importação (Mtep)	Consumo (tep/hab)	Eletricidade (kWh/hab)	Emissão (tCO_2/hab)
EUA	1.686,40	559,01	7,03	12.884,00	16,90
Japão	93,79	384,46	3,71	7.833,00	8,38
Alemanha	127,09	202,94	3,89	6.781,00	9,16
Chile	9,30	20,46	1,70	3.288,00	3,84
China	2.085,00	305,00	1,70	2.648,00	5,14
Brasil	230,15	15,65	1,24	2.201,00	1,74
Índia	502,47	181,97	0,58	597,00	2,35
Etiópia	30,37	2,30	0,39	45,00	0,09

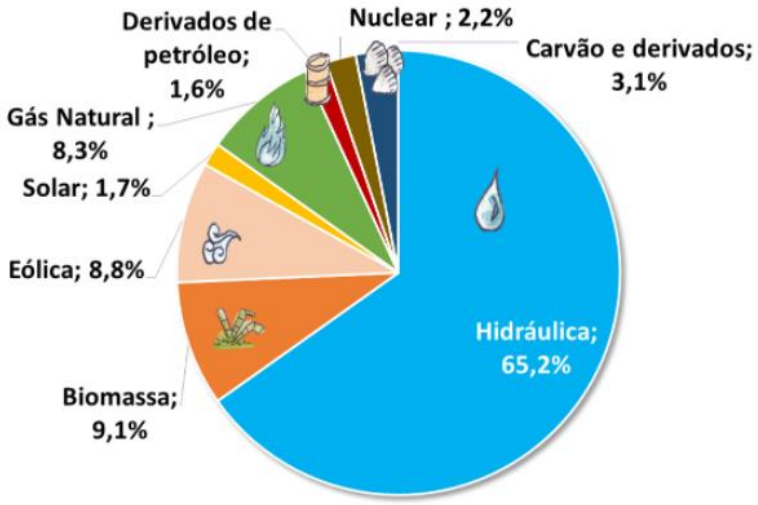
Fonte: Neto; Carvalho (2012).

Nota-se que os países desenvolvidos como EUA, Japão e Alemanha possuem um consumo de energia por habitante maior que os países subdesenvolvidos, e em comparação também possuem uma taxa de emissão de poluentes maior em relação aos outros países.

2.2 ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL.

O Brasil possui uma matriz elétrica bem distinta da matriz elétrica mundial, que é baseada, principalmente, no uso de combustíveis fósseis como carvão mineral, óleo mineral e gás natural produzido em termelétricas. Atualmente a matriz elétrica brasileira é considerada renovável, como grande parte da energia sendo gerada por usinas hidrelétricas. A hidroeletricidade tem sido a principal fonte de geração no sistema elétrico brasileiro (SEB), devido à competitividade econômica e pela abundância do recurso hídrico no país (EPE, 2020).

Figura 2 – Matriz Elétrica Brasileira em 2020.



Fonte: Balanço Energético Nacional (2021).

Observa-se, portanto, na imagem acima a diversidade das fontes de eletricidade, e a maior parte sendo de fontes renováveis, como a hidrelétrica. Além disso, a energia solar, que é obtida através da conversão da luz em eletricidade, é considerada uma energia limpa, sem emissão de poluentes, além de possuir uma grande flexibilidade.

2.3 HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.

Desde os primórdios da humanidade, os incas já tinham o conhecimento sobre a utilização da luz do sol como fonte de energia. O entendimento do efeito fotovoltaico é atribuído aos estudos pioneiros em 1839, do físico francês Alexander Edmond Becquerel. Ele confeccionou e estudou a primeira célula fotovoltaica, no decorrer dos seus estudos, utilizou dois eletrodos imersos em uma solução ácida, na qual estava iluminada, produzindo energia elétrica. Ele concluiu que a geração de energia elétrica era devido à luz (TOLMASQUIM, 2016).

Aproximadamente 40 anos mais tarde, pesquisadores conseguiram produzir energia elétrica a partir da interação solar com semicondutores sólidos. A absorção de a luz solar pelos semicondutores selênio e silício provocam a excitação dos elétrons do material, conectando esse semicondutor a um circuito elétrico metálico, criará uma

diferença de potencial (DDP). Quando a luz incidir sobre o material semicondutor, seus elétrons irão se desprender, e irá ocorrer a circulação dos elétrons de forma ordenada, dando origem à uma corrente elétrica (MALVINO; BATES, 2016).

Em 1883, Charles Fritts, um físico americano, criou a primeira célula fotovoltaica produzida de selênio. Ele revestiu o selênio, um material semicondutor, com uma camada extremamente fina de ouro. Essa célula tinha uma eficiência elétrica de conversão de apenas 1%. As células de selênio logo foram substituídas por silício (Si), pois possuía melhor eficácia elétrica, e até hoje é o semicondutor mais utilizado em células fotovoltaicas (APARECIDA, 2020).

Em 1939, Russel Ohl, um engenheiro americano ficou conhecido por criar e patentear a célula solar moderna. Ele descobriu a barreira PN, ou como é conhecida a junção P-N. No ano de 1949, Bulling e Plessnar medem a eficiência de células de silício cristalino. Apenas em 1954 surgiu a primeira célula de silício com características semelhantes às encontradas hoje em dia, e apresentava uma eficiência elétrica de 6% (APARECIDA, 2020).

No que diz Aparecida (2020), o uso das fotocélulas foi empregado em ações espaciais, sendo o principal uso até meados da década de 70, quando ficou economicamente viável e começou a ser utilizado em uso terrestres. No ano de 2000, houve um grande avanço, e foram construídos os primeiros sistemas fotovoltaicos conectados à rede (On-Grid) e a produção anual de energia fotovoltaica alcançou 4.200 MWp.

2.4 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL.

No ano de 2011, houve grandes avanços no setor de energia fotovoltaica no Brasil, o Grupo Setorial de Energia Fotovoltaica da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE) se juntou em discussões com o Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicações (COBEI), gerando grandes resultados. O objetivo da discussão era promover a energia fotovoltaica, elaborar uma norma de conexão de inversores fotovoltaicos à rede elétrica e discutir regras para a entrada dessa fonte renovável na matriz elétrica brasileira (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Em abril de 2012, foi elaborada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a Resolução Normativa nº 482, permitindo aos consumidores o acesso à microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Dessa forma, todo consumidor que estiver ativamente cadastrado no Ministério da Fazenda, por um CPF ou CNPJ, tem concessão para conectar um sistema gerador de energia elétrica próprio, advindo de fontes renováveis, às redes de distribuição das concessionárias de energia, garantindo a compensação do consumidor do excedente de energia injetado na rede (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

> [...] a resolução 482/2012 definiu a microgeração distribuída como uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada. Tratou também da minigeração distribuída, definindo-a como uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada. (AGUIAR JUNIOR; PINTO, 2017, p. 3).

A geração centralizada se caracteriza pela geração longe do consumo, havendo que transmitir grande quantidade de energia até o consumidor, o que pode levar a grandes perdas de energia durante esse processo. Um estudo feito pela ANEEL(Agência Nacional de Energia Elétrica), afirma que a média de perdas de energia da geração na usina até a casa do consumidor, é em média 16%. A geração distribuída descentraliza a produção de energia, gerando energia próximo do local de consumo, permitindo aliviar as linhas de transmissão e redes de distribuição, já que a geração será próxima ao consumo, e consequentemente não terá perdas de energia (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

O sistema de compensação de crédito das concessionárias, garante que a energia que o sistema estiver gerando não for toda consumida instantaneamente pela residência, esse excedente será injetado na rede elétrica da concessionária, assim, gerando créditos. Mais tarde, esses créditos são gastos ao receber energia elétrica pela noite, ou em dias chuvosos ou nublados, quando a geração do sistema fotovoltaico não é suficiente para atender a demanda da residência (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

A Resolução Normativa nº 482 foi um grande marco regulatório, porém, a utilização dos créditos não atendia como esperado, o tempo de consumo era de 3 meses, porém as regras não eram muito claras e muita das vezes esses créditos nem eram contabilizados pela concessionária. Somente em 2015 com a Resolução Normativa nº 687 (ANEEL), definindo novas regras para a geração distribuída, aumentando o prazo de até 60 meses para utilizar os créditos do sistema de compensação (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Foram permitidas também sistemas de até 5MW, que se encaixam em minigeração. A microgeração continuou sendo definida em sistemas de até 75 kW. A principal mudança imposta pela RN 689 foi a inclusão de novas modalidades para a geração distribuída, uma delas é o Autoconsumo Remoto, que permite o compartilhamento dos créditos para outras unidades consumidoras pertencentes ao mesmo titular. Devido a incentivos do governo, com a isenção de tributos PIS/COFINS e ICMS sobre a energia compensada na rede pela unidade consumidora, tornou-se a geração distribuída mais acessível e mais vantajosa (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Nessa contextura, o Brasil com um extenso território e abundância de recurso de radiação solar, se mostra como um grande país para proveito da energia solar fotovoltaica.

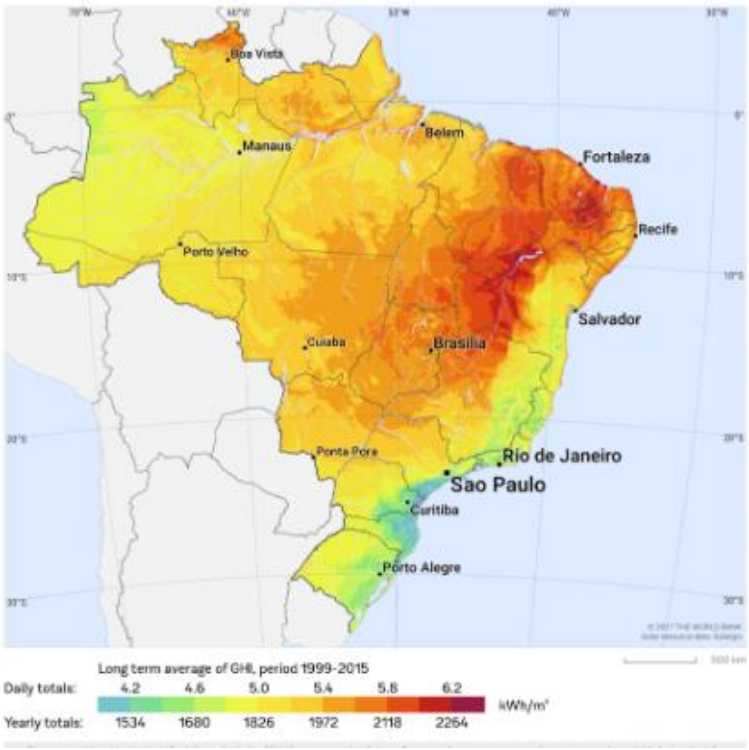
2.5 POTENCIAL SOLAR NO BRASIL.

O Brasil possui um enorme potencial para geração de energia solar, em razão da sua localização geográfica, com altos índices de irradiação solar que propicia a geração de energia através do sol em todo o país. Um fator que influencia na quantidade de radiação solar em um local é a latitude, ou seja, quanto mais perto estiver da linha do Equador, maior será a quantidade de luz naquele local. Por isso o Brasil é muito abundante em irradiação solar, pois grande parte do seu território está na região tropical (PINHO; GALDINO, 2014).

Outros fatores que influenciam na quantidade de radiação solar em um local, é a época do ano, sabemos que no verão os dias são mais longos, consequentemente a quantidade de luz será maior. Já no inverno, os dias são mais curtos, e

consequentemente a quantidade de luz será menor. Portanto, a época do ano influencia na quantidade de radiação solar em um local. Outro fator que determina a radiação solar, é o clima da região, lugares secos geralmente chove menos, e tem uma quantidade maior de radiação solar em relação com lugares chuvosos (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 3: Mapa da Radiação Solar no Brasil.



Fonte: Globo Solar Atlas (2019).

Segundo o Atlas Solar Brasileiro (2019), incide diariamente no Brasil entre 4.444 Wh/m² à 5.483 Wh/m².

Analisando a figura 3, vemos que a região Centro-Oeste e Nordeste são as que mais recebem sol, essas regiões possuem uma vegetação seca, como o Centro-Oeste cuja sua vegetação é o cerrado, que se caracteriza por um clima seco e chuvas sazonais, a radiação solar fica em média 2080 kWh/m², equivalente à 5,6 kWh/m². No Nordeste a vegetação que predomina é a caatinga, que possui um clima semiárido, bastante seco e com poucas chuvas ao ano, a radiação alcança o valor máximo em torno de 2264

kWh/m², equivalente a 6,2 kWh/m². Já nas regiões litorâneas dos estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, a irradiação alcança o valor de 1534 kWh/m², equivalente à 4,2 kWh/m/2 do país e no Norte, são regiões que chove bastante, portanto possuem menor radiação solar.

Deve destacar que não existe nenhuma região no Brasil que não recebe a quantidade de luz solar suficiente para inviabilizar a instalação de um sistema fotovoltaico.

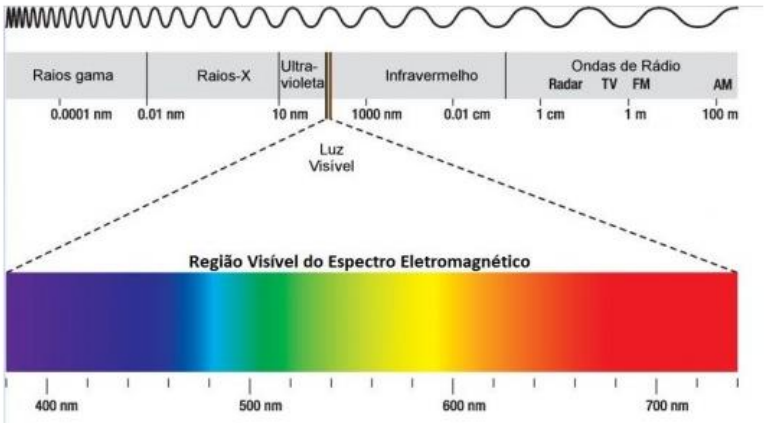
O Brasil possui potencial de destaque no cenário de energia solar mundial e aumenta ainda mais quando leva em consideração sua reserva de silício, que também é uma das maiores do mundo. A partir de iniciativas governamentais, o Brasil vem aumentando a participação da energia solar em seu espectro energético, a matriz elétrica dominada pelas fontes hidrelétricas e termelétricas.

2.6 RADIAÇÃO SOLAR

A energia emitida pelo sol é transmitida em forma de onda eletromagnética constituída de diferentes frequências e comprimentos de onda, e recebe o nome de radiação solar. As ondas eletromagnéticas que são emitidas pelo sol são compostas por 53% de radiação invisível, essa radiação não pode ser vista pelo olho humano (luz ultravioleta e luz infravermelho), e 47% é de luz visível, e podem ser captadas pelo olho humano. (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Aproximadamente 25% da irradiação solar penetram na superfície da terra de forma direta, sem nenhuma interferência, e isso constitui a insolação direta, enquanto o restante da irradiação é refletido de volta para o espaço, absorvida ou espalhada em volta até atingir a superfície terrestre. A distribuição da radiação solar é dependente de vários parâmetros, portanto cada região da estratosfera terrestre possui uma quantidade de energia radiante diferente (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 4: Composição do Espectro de Radiação Solar.



Fonte: Knoow.net (2022).

Segundo Villalva, Gazoli (2012) o topo da atmosfera terrestre é atingido por uma radiação solar proveniente da fotosfera solar, que nada mais é, uma camada tênue de plasma, que possui uma espessura de aproximadamente 300 km. A composição espectral nada mais é do que, o que se esperar na radiação de um corpo negro aquecido a cerca de 6000 ºC. A radiação solar, quando se fala em comprimento de onda, ocupa uma faixa espectral de 100 nm a 3000 nm, com densidade espectral máxima de 550 nm e que corresponde à luz verde amarela.

2.7 EFEITO FOTOVOLTAICO

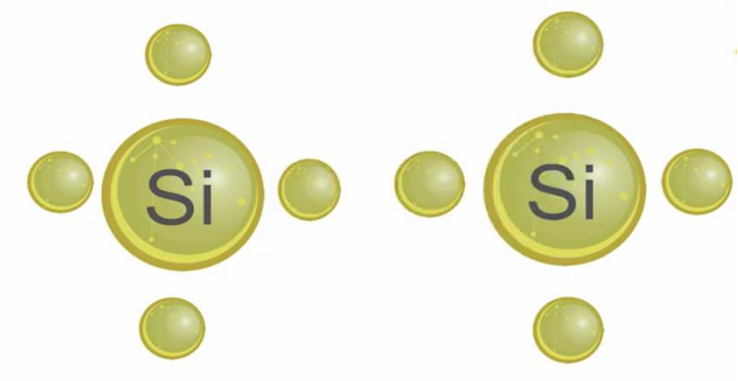
O efeito fotovoltaico, que ocorre nas células fotovoltaicas, é a base dos sistemas de energia solar para produção de eletricidade, o fenômeno físico consiste na capacidade de uma célula fotovoltaica converter a radiação eletromagnética emitida pelo sol em energia elétrica por meio de semicondutores. Esse fenômeno foi descoberto por Alexander Becquerel em 1839 (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

> O efeito fotovoltaico, que é a base dos sistemas de energia solar fotovoltaica para a produção de eletricidade, consiste na transformação da radiação eletromagnética do Sol em energia elétrica através da criação de uma diferença de potencial, ou uma tensão elétrica, sobre uma célula formada por um sanduíche de materiais semicondutores (VILLALVA; GAZOLI, 2012, p.41).

O fenômeno se baseia na geração de energia elétrica a partir da interação solar com um semicondutor sólido. A absorção da luz solar pelo semicondutor silício (Si), sendo hoje o semicondutor mais utilizado nas células fotovoltaicas, provocam a excitação dos elétrons do silício. Conectando esse semicondutor á um circuito elétrico metálico, irá criar uma diferença de potencial (DDP), quando a luz solar incidir sobre o material semicondutor, seus elétrons irão se desprender, circulando de forma ordenada, dando origem à uma corrente elétrica (MALVINO; BATES, 2016).

O silício se caracteriza por possuir 4 átomos na sua camada de valência e se ligam com os átomos cristalinos formando uma rede cristalina. No processo de fabricação das células fotovoltaicas, na purificação do silício, são adicionados outros elementos químicos, como por exemplo o fósforo e o bário. O elemento químico fósforo possui 5 elétrons na camada de valência, 1 elétron a mais que o silício, ou seja, haverá 1 elétron em excesso (MALVINO; BATES, 2016).

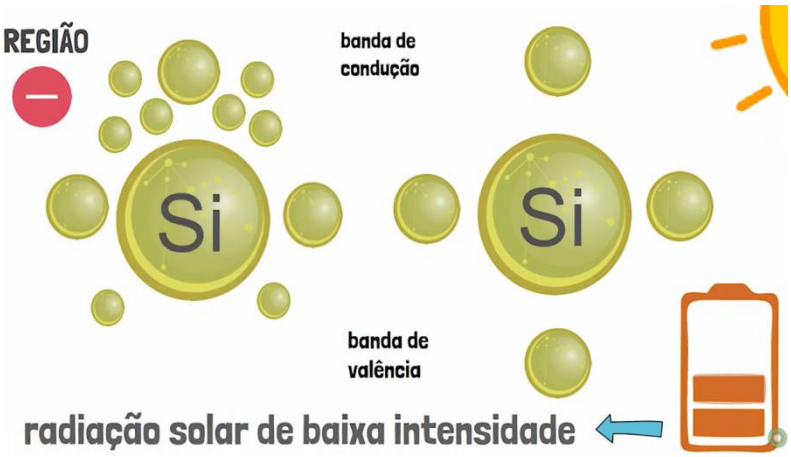
Figura 5: Átomos de Silício.



Fonte: Google Imagens (2022).

A presença desse elétron em excesso, criará uma região levemente negativa, dessa forma, com pouca energia, ou seja, com a radiação solar de baixa intensidade, os elétrons são excitados e migram da banda de valência para a banda de condução, como vemos o demonstrativo na figura 6.

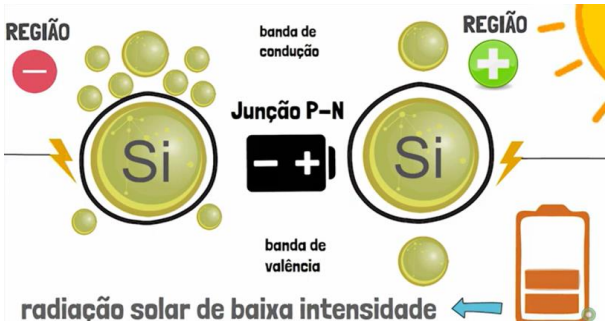
Figura 6: Elétrons migrando para o lado Negativo.



Fonte: Google Imagens (2022).

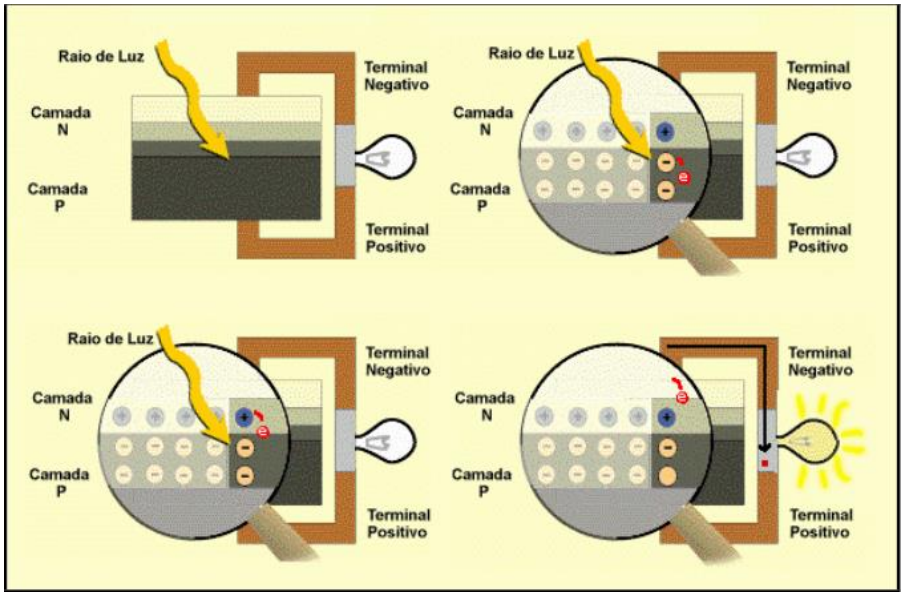
Já no outro lado, irá introduzir átomos com apenas 3 elétrons na camada de valência, como é o caso do elemento químico bório (Bh), haverá uma falta de elétrons para completar as ligações com os átomos de silício da rede cristalina das células fotovoltaicas. Essa falta de elétrons gera uma região levemente positiva no semicondutor. A junção dessas duas regiões, positiva (+) e negativa (-) é denominada de junção PN e permite aproveitar e converter os elétrons excitados do semicondutor em corrente elétrica contínua. Veja o demonstrativo na figura 7 (MALVINO; BATES, 2016).

Figura 7: Formação da Junção PN.



Fonte: Google Imagens (2022).

Figura 8: Efeito Fotovoltaico da Junção PN.



Fonte: Google Imagens (2022).

Portanto quando a radiação solar atinge a superfície de uma célula fotovoltaica, os elétrons do semicondutor silício são excitados, e através de um circuito elétrico externo, é possível converter esses elétrons em corrente elétrica contínua, nos permitindo aproveitar a energia solar para a produção de nossa própria energia elétrica.

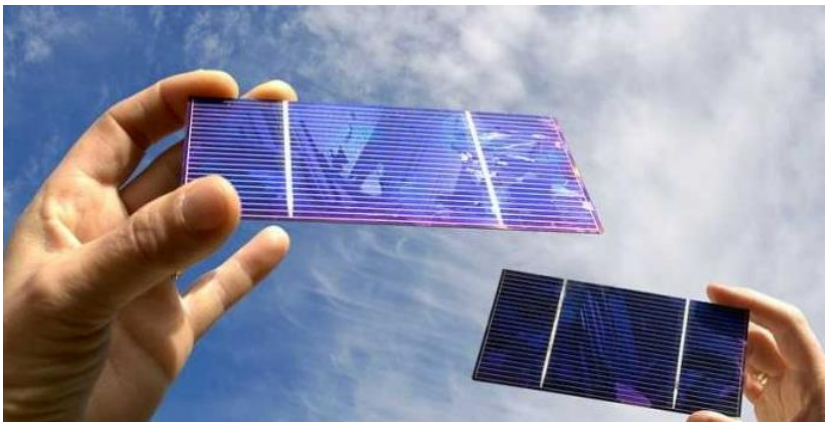
É importante lembrar as diferenças entre o efeito fotovoltaico e o efeito fotoelétrico, segundo Villalva, Gazoli (2012), ambos originados pela radiação eletromagnética sobre um material. O efeito fotovoltaico possui a capacidade de gerar corrente elétrica a partir da interação da luz solar com um semicondutor. Enquanto o efeito fotoelétrico ocorre a remoção dos elétrons pelos fótons de luz em materiais metálicos e não metálicos sólidos, mas não é capaz de criar uma tensão elétrica sobre o material.

2.8 CÉLULA FOTOVOLTAICA

As células fotovoltaicas, são utilizadas para converter a energia luminosa em energia elétrica, ou seja, realizarem o efeito fotovoltaico, como foi explicado no tópico

acima. Conforme apresentado na figura 9, que ilustra células fotovoltaicas produzidas para a composição dos módulos.

Figura 9: Células Solares Fotovoltaicas.



Fonte: Portal Energia (2017).

De acordo com Villalva, Gazoli (2012), às tecnologias empregadas na construção das células fotovoltaicas é a utilização do semicondutor de silício em forma de monocristalina, policristalina e ainda na forma fina de silício (silício amorfo). As células fotovoltaicas de silício possuem sua matéria-prima extraída do mineral quartzo.

2.8.1 CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO MONOCRISTALINA

Na construção das células de silício monocristalino, são utilizados blocos de silício ultrapuro, que são aquecidos em altas temperaturas até o silício ser fundido juntamente com uma pequena quantidade de dopante, geralmente é o boro. e são submetidos ao método de Czochralski, resultando em um lingote de silício monocristalino, que posteriormente o lingote é utilizado para produzir *wafers*. (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 10: Célula Fotovoltaica Monocristalina



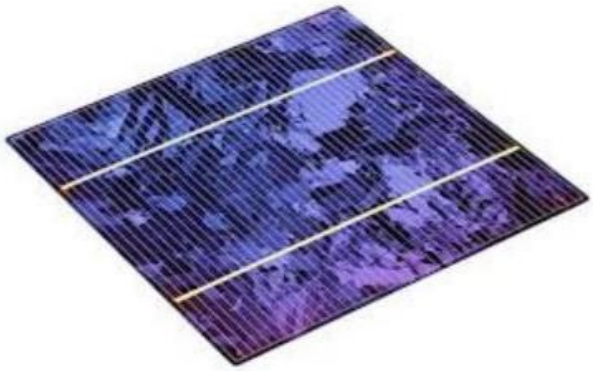
Fonte: Canal Solar (2019).

Segundo os dizeres de Villalva, Gazoli (2012), são utilizados blocos de silício ultrapuro, que é fatiado em finas em finas bolachas de silício de aproximadamente 300 μm, para então serem submetidos a processos químicos, formando a as camadas do semicondutor P e N. O aspecto da célula monocristalina é normalmente um azul escuro ou preto. Dentre as células fotovoltaicas que utilizam silício na sua construção, a célula monocristalina são as que apresentam melhor eficiência, cerca de 10% à 15% em relação às células policristalinas, devido à serem fabricadas somente com 1 cristal.

2.8.2 CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO POLICRISTALINA

No entanto, as células fotovoltaicas policristalinas não apresentam um aspecto uniforme, devido ao processo de fabricação das células ser menos rigoroso. Essas células possuem uma eficiência inferior em relação às células monocristalinas em razão de sua construção ser feita com vários cristais, por isso resultam em um custo menor de fabricação (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 11: Célula Fotovoltaica Policristalina.



Fonte: Canal Solar (2019).

Segundo Villalva, Gazoli (2012), a construção da célula policristalina se assemelha com a célula monocristalina, porém com processos menos rigorosos. O silício purificado é derretido, e a partir do processo de derretimento e resfriamento, o silício se cristaliza livremente, formando vários cristais, e exatamente por isso possuem uma menor eficiência. As células policristalinas são de aspecto heterogêneo, e apresentam uma cor azul.

2.8.3 CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO AMORFO

A célula fotovoltaica de silício filme fino é uma tecnologia mais recente, e se difere da estrutura cristalina das outras células, pois se caracteriza por possuir alto grau de desordem na estrutura atômica. No processo de fabricação do silício filme fino, além de permitir o uso de uma pequena quantidade de matéria-prima, sua temperatura fica em torno de 200ºC a 500ºC (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 12: Célula Fotovoltaica de Silício Amorfo.



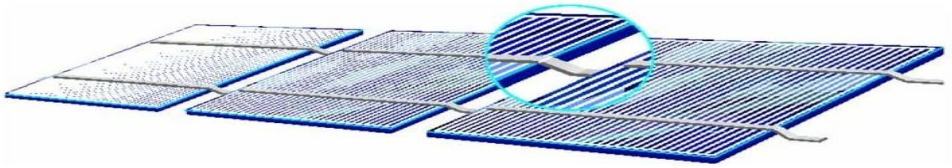
Fonte: Google Imagens (2022).

Portanto, de acordo com Villalva, Gazoli (2012), os filmes finos além de, necessitarem de uma menor quantidade de matéria prima, necessitam de uma menor quantidade de energia na sua produção, o que torna essa célula economicamente favorável em relação a célula monocristalina e policristalina.

2.9 MÓDULO FOTOVOLTAICO

São os geradores de energia, constituídos por um conjunto de células fotovoltaicas formando uma estrutura rígida, cuja fonte primária de energia é a luz solar. Geralmente essas células possuem uma tensão muito baixa, de 0,5V a 0,8V, para obter níveis de tensão aceitáveis elas são conectadas em série, para que soma-se a tensão de cada célula, aumentando a tensão de saída do módulo, conforme apresentado na figura 14. O número de células em um módulo pode variar entre 36 a 144 células, o queque depende marca do módulo (PINHO; GALDINO, 2014).

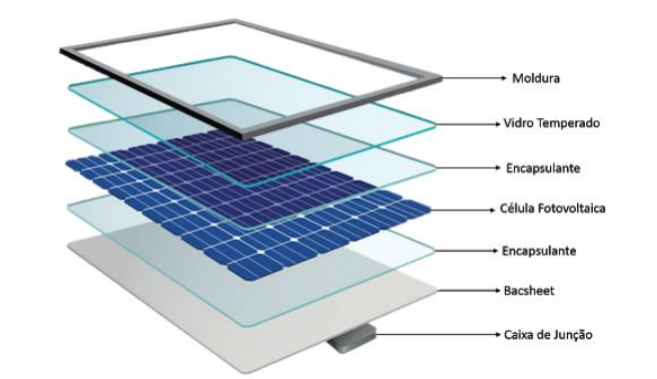
Figura 13: Conexão Elétrica das Células Fotovoltaicas em um Módulo.



Fonte: Núcleo Ats, 2019.

As células fotovoltaicas são muito finas, em torno 0,3 mm, o que o torna muito frágil, justamente por isso são moldadas em uma estrutura de alumínio , que serve para dar rigidez na estrutura do módulo, na qual são materiais encapsulados (E.V.A) que envolve as células, evitando contatos com partes externas; uma lâmina de vidro, que possui um aspecto antirreflexo, que permite que toda luz que incida sobre os painéis chegue até as células, outra função do vidro é a proteção mecânica que ele dá as células fotovoltaicas; e por fim uma caixa de junção, onde se encontra os diodos de *bypass*, na qual são conectados as os cabos elétricos das ligações dos painéis, conforme a figura 15 (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 14: Componentes de um Módulo Fotovoltaico.



Fonte: Empalux, 2022.

Cada módulo possui características distintas entre cada fabricante, e suas características de operação são fornecidas na folha de dados técnicos (datasheet). Nela são apresentadas características de potência, níveis de tensão e corrente de operação. Os testes são padronizados e empregados por organismos internacionais de certificação, no Brasil os módulos são avaliados e certificados pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia). Com essas informações fica fácil fazer o dimensionamento correto da quantidade de módulos que podem ser ligados em série/paralelo no inversor fotovoltaico (VILLALVA; GAZOLI, 2012; PINHO; GALDINO, 2014).

As características elétricas dos módulos fotovoltaicos são definidas através de ensaios e testes, nas condições padronizadas pela STC (Condições padronizadas de teste) e NOTC (Temperatura nominal de operação da célula). Ele apresenta alguns parâmetros elétricos em situações normais, o que não permite revelar características de operação. Dentre as características elétricas dos módulos, é relevante relatar a potência elétrica de pico do módulo (Wp), que é a máxima potência que o módulo irá conseguir fornecer em condições nominais (VILLALVA; GAZOLI, 2012; PINHO; GALDINO, 2014).

Quando um módulo é direcionado à luz do sol, uma tensão elétrica pode ser medida entre seus terminais positivo e negativo, através de um voltímetro. Essa tensão é chamada de tensão de circuito aberto (Voc), é a máxima tensão que pode ser entregue em corrente nula. Ao conectar os terminais desse módulo a um amperímetro, mede-se a corrente de curto-circuito (Isc), que é a máxima corrente que pode ser entregue em tensão nula. Porém esses dados são inconclusivos para analisar a real potência do módulo (PINHO; GALDINO, 2014).

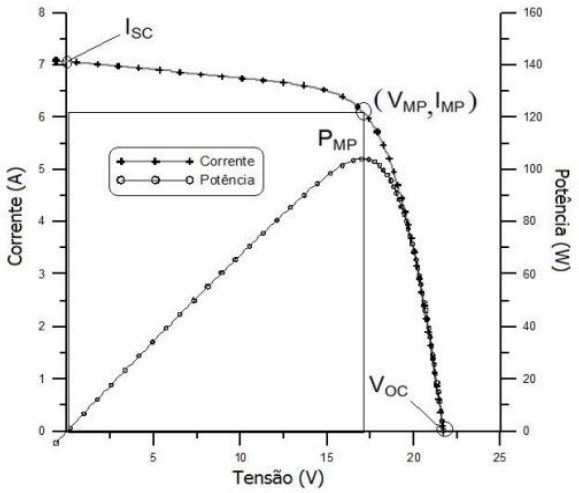
A tensão de máxima potência (V_{mp}) e a corrente de máxima potência (I_{mp}), são os valores de tensão e corrente, respectivamente, quando a potência apresentada nos terminais do módulo é máxima. A potência nominal máxima ($P_{máx}$), é a potência máxima que o módulo consegue fornecer ou potência de pico (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

O módulo não se comporta como uma fonte de tensão constante. A tensão elétrica depende da corrente elétrica ou vice-versa. O ponto de operação do módulo depende da demanda de carga que está conectada nos seus terminais, por exemplo, um aparelho de alta potência que demanda um valor alto de corrente, a tensão na saída do módulo tende

a cair. Por outro lado, se conectar uma carga de baixa potência, que demanda um baixo valor de corrente, a tensão na saída do módulo tende a se elevar. Um dos ensaios mais completos para definir as características elétricas de um módulo fotovoltaico é a curva IxV, pois o módulo é submetido a condições padrão de ensaio e uma tensão variável (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

O gráfico apresentado na figura 16, levou em consideração um módulo de potência de 100W, e que possui 36 células conectadas em série.

Figura 15: Curva característica I-V e curva de potência P-V



Fonte: Pinho; Galdino, 2014.

O gráfico da figura acima indica a potência gerada em cada ponto da curva IxV, além da curva da potência em função da tensão, a curva PxV, onde indica ponto de máxima potência. Neste ponto, são denominados o ponto de tensão e corrente de máxima potência (V_{mp}, I_{mp}), esse é o ponto conhecido como o ponto de máxima potência (P_{mp}).

2.10 INVERSOR FOTOVOLTAICO

Os módulos fotovoltaicos geram energia em corrente contínua, porém o formato padrão de distribuição da rede elétrica é uma corrente de formato senoidal (alternada). O

inversor fotovoltaico é um equipamento eletrônico conectado à rede capaz de converter a tensão e corrente contínua (CC) em tensão e corrente alternada (CA), sendo assim, permite que essa energia seja utilizada com valores compatíveis de tensão, corrente e frequência da rede (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Existe uma vasta variedade dos tipos de inversores, em função das peculiaridades do seu uso. Os mais conhecidos são os inversores *string*, que são utilizados principalmente em plantas residenciais, comerciais e industriais, e geralmente tem uma potência entre 2 kW até 200 kW, e os inversores centrais, que são destinados a sistemas fotovoltaicos com larga produção, como instalações industriais e grandes usinas em solo (SUNGROW, 2022).

Os inversores possuem duas compatibilidades disponíveis para conexão com a rede; monofásico e trifásico. Os inversores monofásicos, que geralmente são potência nominal de até 10kW, e possuem no seu terminal de saída uma fase, um neutro e um condutor de proteção que deve ser aterrado; e os inversores trifásicos, geralmente sua potência nominal é acima de 10 kW, e possuem no seu terminal de saída 3 fases defasadas 120º entre si, um neutro e um condutor de proteção para aterramento (VILLALVA; GAZOLI, 2012; MICHELETTI, 2020).

Os terminais de saída do inversor fornecem tensão e corrente alternada na frequência de 60 HZ, com os valores compatíveis da rede elétrica. Na maior parte dos estados brasileiros o nível de tensão da rede é 380/220V, porém em alguns estados o nível de tensão da rede é 220/127V. No caso de um estado brasileiro que a tensão da rede for 220V fase-fase e 127V fase-neutro, em inversores monofásicos de 220V fase-neutro, no seu terminal de saída pode ser conectado um transformador, para tornar compatível com a tensão 127V fase-neutro da rede elétrica (MICHELETTI, 2020).

Em inversores trifásicos, cuja sua tensão fase-neutro seja 220V, assim só pode ser conectado na rede elétrica caso seja utilizado um transformador na saída do inversor, para tornar compatível com a tensão 127V fase-neutro da rede. (MICHELETTI, 2020).

Para que o inversor possa operar sem causar problemas, é especificado uma faixa de tensão de operação por MPPT (rastreamento do ponto de máxima potência). Os inversores são construídos para receberem vários módulos ligados em série, formando uma fileira de módulos (*string*), e para que o inversor possa maximizar a produção de

energia dos módulos, o nível de tensão de cada *string* deve estar dentro da faixa permitida de operação (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Os inversores podem possuir uma ou até mais sistemas MPPT, e tem como objetivo rastrear o ponto de máxima potência dos módulos, permitindo que eles sempre operem no seu ponto de máxima potência. Cada MPPT de um inversor trabalha de forma independente, otimizando a produção de energia de modo independente para cada *string* (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Seria mais interessante que um inversor tivesse várias entradas MPPT, pois isso torna o inversor mais eficiente, assim o inversor teria mais entradas, como menos módulos em cada *string*, e caso uma das *strings* seja afetada por sombreamento, os demais módulos que estão conectados na outra entrada MPPT não serão afetados. (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Os inversores fotovoltaicos possuem uma proteção IP65, o que o torna próprio para operar em locais expostos ao tempo, podendo suportar intempéries como chuva, calor, vento, frio e poeira. Porém, o fato de possuírem resistências a poeira e água, não significa que ele pode ser instalado à céu aberto. O aquecimento excessivo do inversor pela incidência da luz solar ou condições muito úmidas reduzem a vida útil do equipamento (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

O inversor é projetado para operar em valores nominais de temperatura mínima e máxima, quando esse equipamento foge dos parâmetros de temperatura ideal, corre o risco de ser danificado. É indicado que o inversor seja instalado em locais abertos e cobertos com ventilação, e próximo aos módulos fotovoltaicos, isso reduz a distância dos cabos elétricos e, consequentemente, as perdas de energia. (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

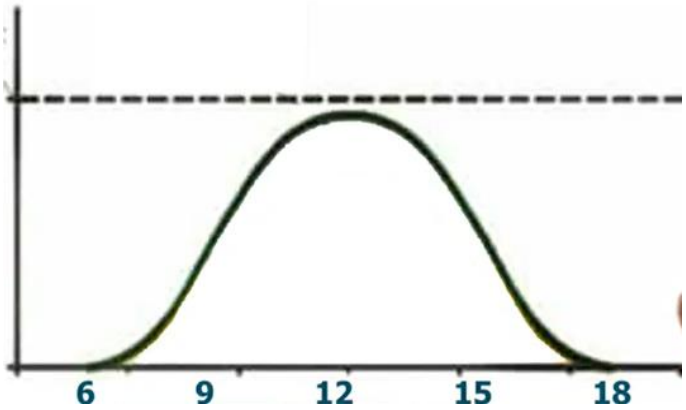
Para que o inversor possa operar com segurança, é exigido pelas companhias de energia e pelas normas de segurança a função anti-ilhamento, que evita que o inversor continue operando quando não há alimentação na rede elétrica, ou seja, opere ilhado da rede externa, alimentando somente as cargas internas. Com isso garante a segurança da rede elétrica, da equipe de manutenção da rede e do próprio inversor (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

É recomendado que os inversores fotovoltaicos trabalhem até 30% de sobredimensionamento em relação à potência fotovoltaica dos módulos. Quando falamos

da entrada do inversor fotovoltaico, é a parte de corrente contínua, ou seja, dos módulos fotovoltaicos até o inversor; e quando falamos da saída do inversor, estamos falando da parte de corrente alternada, ou seja, do inversor fotovoltaico até a rede. Muitas empresas buscando otimização dos custos do sistema fotovoltaico, acabam buscando um sobredimensionamento dos inversores, em média de 30%, por exemplo, um inversor com potência nominal de 5 kW, para fazer a conversão CC-CA de 6,6 kWp de potência de módulo instalados (PINHO; GALDINO, 2014).

E isso faz um certo sentido, pois os módulos só estariam gerando os 6,5 kWp em poucos momentos durante a operação do sistema, por exemplo, durante o dia, o sistema fotovoltaico, a geração começa em média às 6 da manhã, e tem um crescimento gradativo até atingir meio-dia, a partir daí, começa a ter um decréscimo da curva de geração, como apresentada na figura 17.

Figura 16: Curva de Geração do Sistema Fotovoltaico.



Fonte: Google Imagens, 2022.

Portanto, faz todo o sentido que leve em consideração que não é necessário o uso de um inversor que fique constantemente fornecendo 6,5kW na saída. Além desse pico de geração que tem ao meio-dia, ainda tem as estações do ano diferente, em que algumas estações o sistema irá atingir uma geração maior e em outras uma menor geração. Isso significa que esse pico de geração no verão, possa ter um valor máximo maior, e no inverno o pico de geração possa ser bem menor.

Logo não é interessante que se trabalhe na potência máxima fotovoltaica, desse modo, usa-se o sobredimensionamento de 30% do inversor. Porém esse valor de sobredimensionamento deve ser levado em consideração a região de cada instalação, pois ele não é um valor fixo que vale para todos os sistemas. Pegando o exemplo acima de uma potência de módulos de 6,5 kWp, e um inversor de potência nominal de 6,5 kW, o inversor fotovoltaico durante a maior parte do tempo o inversor será subutilizado. Essa é a questão, um inversor muito grande, que poderia entregar muita potência, mas que não chega potência suficiente nele (MC ELÉTRICA, 2022).

Outra situação é quando leva em consideração um fator de sobredimensionamento maior que 30%, em uma região com alta radiação solar, por muito tempo durante o ano, o sistema estará entregando mais energia na entrada do que na saída do inversor, isso faz com que aconteça o *oversizing* no inversor. (MC ELÉTRICA, 2022).

O *oversizing* é o termo utilizado para designar a situação que a potência dos módulos está superdimensionada em relação a potência do inversor, e uma consequência do *oversizing* é o efeito clipping, que se caracteriza pelo corte na curva de geração do inversor, como está apresentado na figura 18. A potência de entrada no inversor é maior do que a potência que ele consegue entrar na saída, por consequência a geração do sistema é limitada, o pico de geração do sistema é cortado pelo inversor (MC ELÉTRICA, 2022).

O sistema estaria deixando de gerar energia em decorrência dessa energia que é cortada. Analisando essas duas questões, deixa-se o inversor subdimensionado, na qual foi investido um valor alto em um inversor que não vai entregar seu valor de potência nominal, ou sobre dimensionar o inversor, na qual terá o efeito clipping e uma perda na geração (MC ELÉTRICA, 2022).

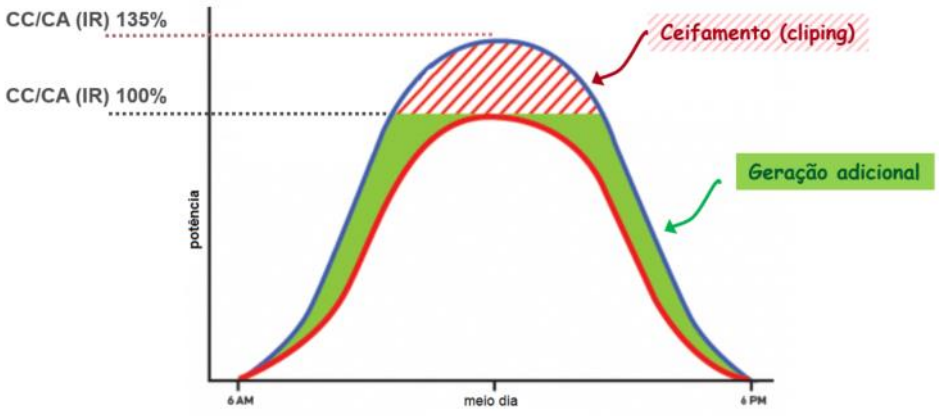
Em um sistema fotovoltaico na região Sul do país, o fator de sobredimensionamento de 30% seria o ideal, por exemplo, um inversor de potência nominal de 5 kW e potência de módulos de 6,5 kWp, dificilmente teria muitas perdas de geração, pois são regiões que não tem tanta radiação solar e em pouco momentos o sistema irá atingir o pico de geração (MC ELÉTRICA, 2022).

Por outro lado, um sistema fotovoltaico na região Norte e Nordeste do país, um fator de sobredimensionamento de 30% é muito, pois são regiões com alta radiação solar, e o sistema fotovoltaico atingiria mais rápido o pico de geração, causando o efeito clipping. O interessante em sistemas instalados nessa região seria um fator de sobredimensionamento de até 20% (MC ELÉTRICA, 2022).

Analisando a figura 18, nota-se que a curva azul atingiu primeiro o pico de geração que a curva vermelha, na qual não atingiu o pico de geração. A curva azul como está com um sobredimensionamento maior ela atinge mais rápido o pico de geração do sistema.

Suponha que a curva vermelha também atinja o pico de geração, porém como ela está com um fator de sobredimensionamento menor, levaria mais tempo e ficaria um tempo menor no pico de geração.

Figura 17: Gráfico de Geração do Sistema Fotovoltaico com Sobredimensionamento.



Fonte: Google Imagens, 2022.

Observando-se o tempo de operação do sistema, nota-se que nas extremidades da curva, a quantidade de energia gerada é maior do que a energia que cortada pelo efeito clipping. Nesse caso compensaria um fator de sobredimensionamento maior, pois

além de, o sistema alcançar o pico de geração mais rápido, ele fica mais horas do dia gerando o máximo de potência.

2.11 ESTUDO DO SOMBREAMENTO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A geração de energia elétrica em módulos fotovoltaicos acontece devido à incidência de raios solares, porém devido à ocorrência de um sombreamento sobre uma ou mais células fotovoltaicas, acarreta perdas de geração de todo o sistema. A corrente elétrica que uma célula fotovoltaica pode fornecer é diretamente proporcional à intensidade da radiação solar que ela recebe, portanto, ao receber pouca ou nenhuma luz, a corrente elétrica da célula será bem pequena (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Visto que as células fotovoltaicas são conectadas em série, quando ocorre de uma célula receber pouca radiação solar devido ao sombreamento, a geração das outras células serão afetadas, fazendo com que diminua a produtividade do módulo fotovoltaico. Caso haja mais módulos conectados em série, toda a geração da *string* é afetada, ocasionando perda na geração de energia (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Dentre o pior de caso de sombreamento, pode-se citar o sombreamento parcial, é quando as sombras se incidem somente em uma parte dos módulos do sistema, fazendo com que apenas alguns módulos da *string* sejam afetados e a causa está relacionada por meio de nuvens e objetos próximos aos módulos fotovoltaicos. Por outro lado, o sombreamento uniforme é aquele em que todos os módulos são sombreados da mesma forma, recebendo a mesma quantidade de luz (PINHO; GALDINO, 2014).

O inversor fotovoltaico através da tecnologia MPPT, vai sempre com o objetivo de buscar a máxima potência de operação. Porém no caso do sombreamento parcial, a curva de geração dos módulos irá apresentar dois ou mais pontos de máxima potência, ocasionando uma confusão no inversor e sua operação pode convergir para um ponto de pequena potência, diminuindo drasticamente a geração de energia (PINTO, 2015).

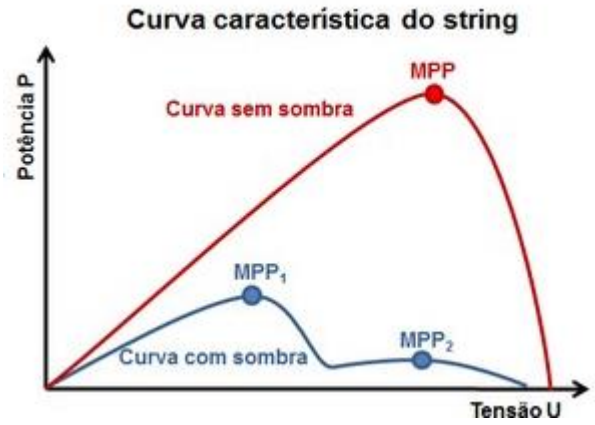
Em contrapartida, o sombreamento uniforme apresenta somente um ponto de máxima potência de geração. Nesse caso, embora a potência do sistema fotovoltaico

seja menor do que a projetada, a curva de geração dos módulos irá tender a atingir a um único ponto, através da tecnologia MPPT do inversor fotovoltaico (PINTO, 2015).

Para entendermos melhor, vamos analisar a figura 19. A curva vermelha representa vários módulos conectados em série, nesse caso os módulos estão sem sombreamento, portanto, as tensões de cada módulo se somam, idem para as potências; formando uma curva com um ponto de máxima potência de geração.

Quando ocorre o sombreamento parcial, módulos com e sem sombreamento, ocorre o que vemos na curva azul. No ponto MPP1, há a soma das tensões dos módulos sombreados, mas não se aproveita a potência máxima dos módulos não sombreados. No ponto MPP2, a tensão é definida pelos módulos não sombreados, que são os que contribuem para a potência do sistema.

Figura 18: Curva característica da *String.*

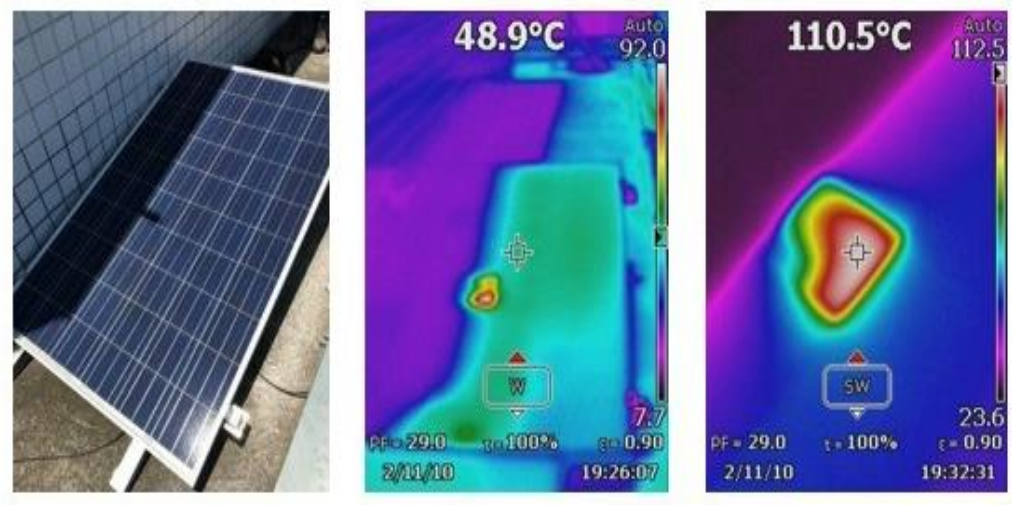


Fonte: Solarize, 2022.

Além de comprometer a geração do sistema, há ainda o risco de danificar as células fotovoltaicas. O *hotspot*, conhecido como ponto quente, é um fenômeno que ocorre em pequenas áreas dos módulos onde a incidência solar foi bloqueada; a área sombreada irá funcionar como um resistor, fazendo com que a potência elétrica que está sendo gerada se transforma em energia dissipada, produzindo calor e aquecendo as células (PINHO; GALDINO, 2014).

Conforme apresentado na figura 20, nota-se um módulo sombreado e através de uma câmera termográfica é possível visualizar o ponto quente no módulo.

Figura 19: Efeito de uma Sombra localizada sobre um Módulo Fotovoltaico Convencional.



Fonte: Sun Energia, 2021.

Não há pontos quentes em toda a região sombreada, pois o diodo de *bypass* desviou a corrente da fileira de células sombreadas. Porém há um pequeno ponto que não foi suficiente para o diodo de *bypass* identificar. Nesse ponto ocorreu o *hotspot.* Diante disso, esse tipo de ocorrência deve ser evitado durante a etapa de projeto e em campo pela limpeza do sistema, a fim de retirar sujeiras e dejetos de animais (PINHO; GALDINO, 2014).

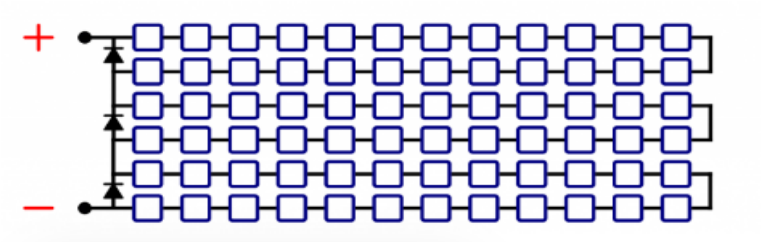
Cada sistema fotovoltaico deve ser avaliado de forma diferente, pois podem existir diferenças nas tecnologias dos módulos fotovoltaicos e dos inversores, configuração das séries de módulos e MPPT e diferentes condições de sombreamento.

2.12 TECNOLOGIA PARA MINIMIZAÇÃO DOS EFEITOS CAUSADOS PELO SOMBREAMENTO

Algumas tecnologias já foram desenvolvidas para minimizar os efeitos causados pelo sombreamento. Uma delas é a utilização do diodo de *bypass*, na qual quando ocorre o bloqueio da radiação solar sobre a célula fotovoltaica, sua função é desviar o fluxo de corrente da sub-string evitando que os módulos se danifiquem (PINHO; GALDINO, 2014).

Um painel fotovoltaico padrão possui 72 células, e geralmente é construído a partir de 3 sub-strings de 24 células, e usualmente cada uma é protegida por um diodo de *bypass*, como mostra a figura 21.

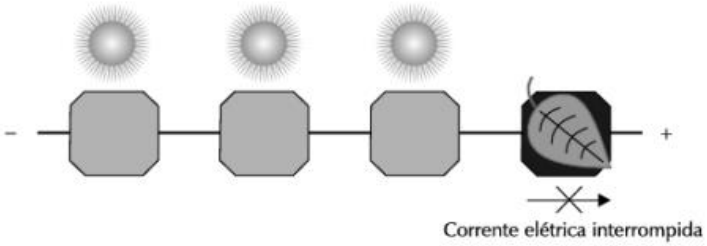
Figura 20: Módulo de 72 células com 3 diodos de *bypass*. 24 células em paralelo com cada Diodo de *Bypass*.



Fonte: Canal Solar, 2022.

Quando ocorre o sombreamento de uma célula em módulos fotovoltaicos sem a tecnologia de utilização do diodo de *bypass*, como mostra a figura 21, a passagem de corrente elétrica é interrompida, e consequentemente todas as células conectadas em série são prejudicadas. Essa célula sombreada ao invés de gerar energia, irá passar a consumir energia, aquecendo e formando os pontos quentes (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 21: Módulo Fotovoltaico com Sombra em uma Célula sem o Diodo de *Bypass*.

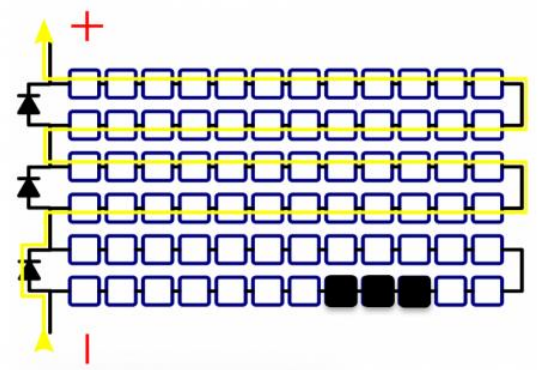


Fonte: Villava, Gazoli; 2021.

No entanto, quando ocorre o sombreamento em uma célula de um módulo que possui diodos de *bypass*, o diodo que está em paralelo com a sub-string afetada é acionado, e a corrente irá começar a passar por ele ao invés de passar na sub-string. Portanto o módulo ainda irá funcionar com 2/3 da sua capacidade de geração (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

A figura 22 apresenta o caminho da corrente elétrica quando a radiação solar de uma célula é interrompida devido ao sombreamento.

Figura 22: Corrente Fluindo por um módulo com um Diodo de *Bypass* acionado.

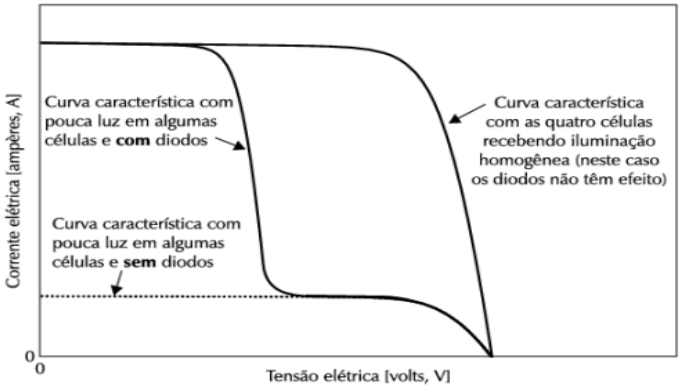


Fonte: Canal Solar, 2022.

É importante destacar que em casos de sombreamentos muito pequenos, em que a diferença de incidência de luz entre uma célula fotovoltaica e outra for menor que 20%, o diodo de *bypass* não irá conseguir atuar. Como o caso da figura 20, onde não houve atuação do diodo de *bypass* e consequentemente o sobreaquecimento da célula, detectado através de uma câmera termográfica (PINHO; GALDINO, 2014).

Na figura 24 apresentada abaixo, nota-se a diferença do comportamento das células com e sem o diodo de *bypass.*

Figura 23: Resultado de sombreamento na curva CorrenteXTensão do módulo.



Fonte: Villalva, Gazoli; 2022.

A curva maior indica a característica corrente e tensão (I-V) sem o sombreamento, com todas as células operando normalmente e sem a atuação do diodo de *bypass* (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

A curva menor tracejada mostra o comportamento das células com sombreamento sem a presença do diodo de bypass, e nota-se que a corrente é muito baixa, pois foi limitada pela célula sombreada (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

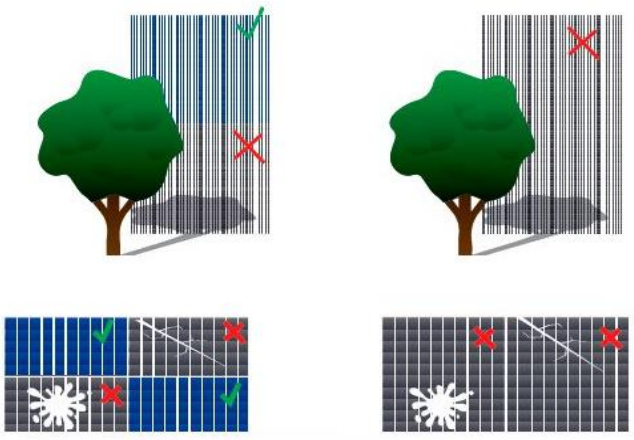
A curva mediana mostra o comportamento das células sombreadas e com a presença do diodo de *bypass*. Nota-se que que no início que a corrente de operação é máxima, e a partir de um tempo os diodos de *bypass* são despolarizados e a corrente do módulo é limitada ao valor de corrente que a célula sombreada pode fornecer (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Uma estratégia que também pode ser utilizada para minimizar as perdas de geração devido ao sombreamento, é a utilização de um inversor com múltiplas entradas MPPT. Cada rastreador MPPT trabalha de forma independente uma da outra e quando ocorre o sombreamento, as outras entradas continuam operando normalmente. (MICHELETTI, 2020).

Devido a inversores com diversas entradas MPPT se tornarem mais caros, o uso do micro inversor se torna uma opção mais acessível; e até mais eficiente em sistemas fotovoltaicos que apresentam sombreamento parcial. Em um micro inversor pode ser conectado até 4 módulos fotovoltaicos, e ele permite que cada módulo opere de forma independente, ou seja, quando um módulo é afetado pelo sombreamento, os outros que estão conectados no mesmo micro inversor continuam gerando normalmente (REZENDE, 2019).

Outra tecnologia que foi adotada recentemente é o módulo *half-cell*, que consiste na construção de módulos fotovoltaicos com células cortadas ao meio, o que torna os módulos mais eficientes e com dimensões menores. A divisão das células permite desativar partes do módulo conforme apresentado na figura 25.

Figura 24: Comparação do sombreamento em módulo com e sem a tecnologia *Half-Cell.*



Fonte: Canal Solar, 2022.

O módulo com a tecnologia *half-cell* consegue otimizar sistemas fotovoltaicos que sofrem com sombreamento, no entanto irá trabalhar com uma geração menor, porém sem o risco de ocorrer um ponto quente e danificar as células (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Observa-se na figura 25 que as partes dos módulos que foi interrompida a radiação solar, foram tiradas da produção de energia.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA A REALIZAÇÃO DA PESQUISA

No presente trabalho os experimentos foram realizados em um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica para a realização do experimento em campo, e ainda estava em processo de finalização da instalação, a fim de garantir que não ocorressem falhas que poderiam prejudicar os resultados.

O sistema fotovoltaico é a lanchonete do Sindicato dos Trabalhadores em Saúde do Estado do Tocantins (SINTRAS), localizado na cidade de Palmas - TO, com as seguintes coordenadas -10.158266, -48.342807, possui 80 módulos fotovoltaicos policristalino de 460W de 60 células, do modelo JKM460M-60HL4-V da marca *Jinko Solar,* o *datasheet* do módulo está disponível no Anexo 1 e o diagrama da disposição dos módulos sobre o telhado está disponível no Anexo 2. Cada módulo fotovoltaico possui 3 diodos de *bypass* e todos possuem a tecnologia *half-cell.* A figura 26 apresenta a vista de cima do sistema fotovoltaico em que os módulos se encontram em relação ao telhado.

Figura 25: Disposição dos módulos sobre o telhado.



Fonte: Autor (2022).

O Inversor que compõe esse sistema fotovoltaico é trifásico de potência 36 kW, modelo MID 36KTL3-X da marca *Growatt*, e tem sua folha de dados apresentada no anexo 3. Esse sistema possui a seguinte configuração de módulos, 2 *strings* de 8 módulos conectados no MPPT1, 2 *strings* de 8 módulos conectados no MPPT1, 2 *strings* de 12 módulos conectados no MPPT3, 2 *strings* de 12 módulos conectados no MPPT4.

Figura 26: Arranjo Fotovoltaico.



Fonte: O Autor (2022).

Na imagem acima possui 32 módulos, sendo 4 séries de 8 módulos, na qual utilizou-se para teste a *string* delimitada. A parte que está grifada em amarelo representada os módulos que serão utilizados para teste, são 2 séries de 8 módulos cada, ligados no MPPT 1 e MPPT 2 respectivamente.

3.2 METODOLOGIA

Esse trabalho consiste em uma pesquisa exploratória descritiva, realizado através de uma revisão da bibliografia específica, assim enriquecendo o trabalho, e da coleta de dados em campo, tendo mais familiaridade com o problema, tornando-o mais explícito e assim chegando nas conclusões finais (PEREIRA, 2018).

Através do sistema fotovoltaico *on-grid* proposto para estudos desse trabalho, feito o sombreamento artificial, foram analisadas as variações de tensão, corrente e potência através de medições com um multímetro e análise no painel de informações de geração localizada no inversor. Foi feita a análise da variação de tensão de uma série sem sombreamento e uma série com sombreamento.

Foi analisada também a questão de pontos quentes (*hotspots*), através de uma câmera de termografia, de forma artificial, utilizando uma pequena pedra sobre o módulo, a fim de testar se o diodo de *bypass* iria ser ativado ou não, desviando a corrente da célula sombreada por ele. Essas observações puderam ser analisadas a partir da configuração do sistema fotovoltaico, a fim de demonstrar o comportamento da curva de tensão e perda de potência que ocorre em sistemas que sofrem com sombreamento permanente.

Tabela 1: Condições de sombreamento.

Caso	Condição
1	Uma célula totalmente sombreada de um único módulo da MPPT 1
2	Duas fileiras de células sombreadas na lateral de um módulo da MPPT 1
3	Cinco fileiras de células sombreadas na parte de baixo do módulo e duas fileiras de células sombreadas na parte de cima do módulo da MPPT 1
4	Duas fileiras na lateral de dois módulos sombreadas da MPPT 1
5	Um módulo parcialmente sombreado e um módulo com 4 células sombreadas na mesma série na MPPT 1
6	Um módulo parcialmente sombreado e um módulo com 4 células sombreadas na mesma série na MPPT 2
7	Um módulo totalmente sombreado da MPPT 2
8	Um módulo totalmente sombreado da MPPT 1

Fonte: O autor (2022).

A figura 27 (A) (B) (C) (D) (E) (F) (G) (H) (I) mostra a ilustração das condições de sombreamento 1,2,3,4,5,6,7,8, respectivamente apresentadas na Tabela 1.

Figura 28: Demonstração das condições de sombreamento.



(A) Condição 1 (B) Condição 2 (C) Condição 3



(D) Condição 4 (E) Condição 5 (F) Condição 6



(G) Condição 8 (H) Condição 9

Para realizar as projeções de sombreamento sobre os módulos, foram utilizados alguns pedaços de papelão como pode ser observado nas imagens acima.

Para a simulação de pontos quentes, utilizou-se uma pequena pedra de tamanho 0,5 cm, como pode ser observado na imagem 28, e foi deixada sobre uma célula de um módulo fotovoltaico.

Figura 28: Pedra sobre a célula fotovoltaica.



Fonte: O autor (2022).

A partir da câmera termográfica analisa-se os pontos quentes e sus proporções.

3.3 COLETA DE DADOS

A coleta dos dados ocorreu na tela digital do Inversor Fotovoltaico *GROWATT* modelo MID 36KTL3-X antes e após o sombreamento e em seguida foi utilizado um multímetro para medição da tensão das séries fotovoltaicas das MPPT´S 1 e 2, antes e após o sombreamento artificial. A partir da análise dos valores de corrente, tensão e potência, foi realizada a análise do comportamento da corrente elétrica em cada caso de sombreamento.

Foi realizada uma análise de geração do telhado sul e do telhado norte, conectados na MPPT 1 e MPPT 2 respectivamente

A realização do teste ocorreu em um dia bastante ensolarado, sem presença de nuvens ou intempéries, onde a geração de energia estava quase no pico. Isso permitiu que a coleta de dados da geração não fosse prejudicada, e fosse feita a análise da perda de geração de séries que estavam sombreadas com séries de módulos que não estavam sombreadas e estavam no seu pico de geração.

Além da análise do sombreamento, foi feito um teste de ponto quente, que foi realizado no dia 01/09/2022 no horário de 14:00, ou seja, a geração estava próxima ao pico, com alta incidência solar, com isso, a nível de testes e para não correr risco de danificar as células e os módulos fotovoltaicos, a pedra foi deixada sobre a célula por 30 minutos, e com isso foi retirada e foi feito a aferimento com a câmera termográfica

O teste foi realizado no mês de Setembro, isso porque o Estado do Tocantins se encontra em latitudes baixas, em torno de 10°. Durante esse período o sol está em uma posição mais inclinado ao Norte, tornando maior a possiblidade de sombreamento advindas de estruturas próximas as instalações. Sem contar que segundo dados do CRESESB (Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito) a irradiação solar diária média [kWh/m^2.dia] no mês de Agosto na cidade de Palmas é 5,72 kWh/m^2. dia.

O equipamento indicado para medir níveis de radiação solar é um piranômetro, mas devido ao alto custo desse aparelho, acabou se tornando inviável, por isso para essa pesquisa utilizou-se os dados do CRESESB. As temperaturas nos dias dos testes estão expostas na tabela 5.

Os dados de temperatura, irradiação solar, tensão e potência obtidos, a fim do aprofundamento de pesquisa e melhor exposição dos dados, estarão apresentados em resultados e discussões, comparando as perdas de energia para cada condição de sombreamento e assim analisando a perda de geração. A análise para saber a perda de geração por sombreamento será feita a leitura da tela de informações localizada no inversor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na análise de geração de energia está apresentando através de tabelas a coleta de todos os dados obtidos, sendo a irradiação solar, tensão, corrente, potência, variação de potência para *string* sombreada e *string* não sombreada.

Antes de tudo, vale ressaltar que ao iniciar os testes, foi feita uma análise na produção de energia a nível de comparação, entre a *String* 1 da MPPT1 que estava inclinada para o Sul, e a *String* 1 da MPPT2 que estava inclinada para o Norte, e através

do painel digital do inversor, notou-se uma diferença de 47% de geração de energia entre o telhado Norte para o telhado Sul, conforme está apresentada nas imagens abaixo.

Figura 29: Geração da MPPT1 (PV1) e MPPT 2 (PV2).



Fonte: O autor (2022).

Analisando as imagens acima, na MPPT1 (PV1) é composta por 16 módulos de 460W, dividida em 2 séries e que estão inclinadas para a direção Sul, tendo uma geração de 3400W de potência. Na MPPT2 (PV2) também composta por 16 módulos de 460W e dividida em 2 séries, estando inclinadas para a direção Norte, tendo uma geração bem superior, de 5000W de potência. Isso se deve a trajetória do Sol, que se move no horizonte, fazendo com que a posição do poente e da nascente varie ao longo do ano. Portando como o Brasil está no Hemisfério Sul, para uma melhor geração dos módulos fotovoltaicos, eles devem estar orientados para o Norte, assim tendo maior aproveitamento da radiação solar e uma melhor eficiência da geração de energia.

4.1 ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA

As tabelas de dados coletados estão expostas logo abaixo na tabela 2, 3 e 4, onde estão apresentados os dias dos testes com os valores de tensão, corrente e potência com e sem sombreamento. Um importante ponto a ser destacado é que a tensão não variou muito em cada condição de sombreamento, já no caso da corrente houve uma maior variação que a tensão, nas condições D, E, F, G, H e I foram onde o sombreamento foi maior, a corrente elétrica teve uma maior variação. Nas condições A, B e C onde a área sombreada foi menor, houve uma menor variação de corrente.

Tabela 2: Tabela de coleta de dados do dia:01/09/2022.

	Somb. A	Somb. B	Somb. C	Somb. D	Somb. E	Somb. F	Somb. H	Somb. I
Data	01/09	01/09	01/09	01/09	01/09	01/09	01/09	01/09
Horário	15:14	15:18	15:20	15:22	15:24	15:26	15:30	15:32
Irradiância (kWh/m².dia)	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72
Temperatura (°C)	42°C	42°C	42°C	42°C	42°C	42°C	42°C	42°C
Tensão (V) s/ sombreamento	303	303	303	303	303	302	302	303
Corrente (I) s/sombreamento	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	12,37	12,37	5,61
Potência (W) s/ sombreamento	1.700	1.700	1.700	1.700	1.700	2.400	2.400	1.700
Tensão (V) c/ sombreamento	302	303	299	303	296	300	291	295
Corrente (I) c/sombreamento	5,29	4,29	4,01	4,62	4,56	5,83	5,32	2,37
Potência (W) c/ sombreamento	1.600	1.300	1.200	1.400	1.350	1.750	1.550	700
Discrepância de potência (W)	100	400	500	300	350	650	850	1.000
Discrepância de potência (%)	5,89	23,53	29,42	17,65	20,59	27,09	35,42	41,18

Fonte: O autor (2022).

Tabela 3: Tabela de coleta de dados do dia:02/09/2022.

	Somb. A	Somb. B	Somb. C	Somb. D	Somb. E	Somb. F	Somb. G	Somb. H
Data	09/09	09/09	09/09	09/09	09/09	09/09	09/09	09/09
Horário	15:05	15:05	15:05	15:05	15:05	15:05	15:05	15:05
Irradiância (kWh/m².dia)	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72
Temperatura (°C)	37°C	37°C	37°C	37°C	37°C	37°C	37°C	37°C
Tensão (V) s/ sombreamento	303	303	303	303	303	302	302	303
Corrente (I) s/sombreamento	5,28	5,28	5,28	5,28	5,28	6,79	6,79	5,28
Potência (W) s/ sombreamento	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600	2.050	2.050	1.600
Tensão (V) c/ sombreamento	300	299	298	297	296	301	293	292
Corrente (I) c/sombreamento	5,33	4,35	4,36	4,38	3,89	3,99	5,46	3,42
Potência (W) c/ sombreamento	1.500	1.300	1.300	1.300	1.200	1.200	1.600	1.000
Discrepância de potência (W)	100	300	300	300	450	850	450	600
Discrepância de potência (%)	6,25	18,75	18,75	18,75	28,12	41,46	21,95	37,5

Fonte: O autor (2022).

Tabela 4: Tabela de coleta de dados do dia:03/09/2022.

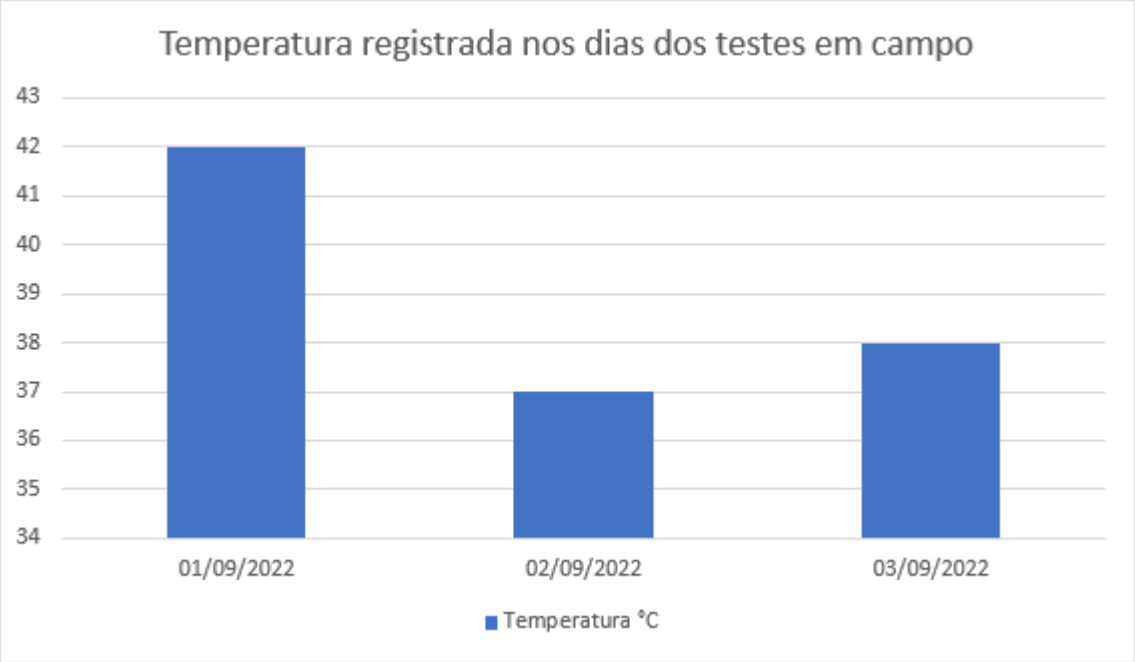
	Somb. A	Somb. B	Somb. C	Somb. D	Somb. E	Somb. F	Somb. G	Somb. H
Data	09/09	09/09	09/09	09/09	09/09	09/09	09/09	09/09
Horário	15:11	15:11	15:11	15:11	15:11	15:11	15:11	15:11
Irradiância (kWh/m².dia)	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72
Temperatura (°C)	38°C	38°C	38°C	38°C	38°C	38°C	38°C	38°C
Tensão (V) s/ sombreamento	301	301	301	301	301	301	301	301
Corrente (I) s/sombreamento	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	7,64	7,64	5,32
Potência (W) s/ sombreamento	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600	2.300	2.300	1.600
Tensão (V) c/ sombreamento	301	298	297	295	295	296	291	293
Corrente (I) c/sombreamento	5,31	5,03	4,88	4,4	4,4	4,05	6,53	3,75
Potência (W) c/ sombreamento	1.600	1.500	1.450	1.300	1.300	1.200	1.900	1.100
Discrepância de potência (W)	0	100	150	300	300	1.100	400	500
Discrepância de potência (%)	0	6,25	9,37	18,25	18,25	52,17	17,4	31,25

Fonte: O autor (2022).

Apesar os testes terem sidos realizados em 3 dias consecutivos, o valor da irradiação não altera de forma que pode comprometer os resultados, já que todos foram realizados no mesmo mês, pois a CRESESB fornece a irradiação solar média ao longo do mês de setembro.

Abaixo na tabela 5, está apresentada as temperaturas aferidas nos dias dos testes. A temperatura no primeiro dia do teste estava muito alta em relação aos outros dias, pode ser que devido á isso possa ter interferido no resultado do dia 1 em relação ao dia 2 e dia 3, visto que os resultados do dia 1 estão discrepantes em relação aos resultados dos dias 2 e 3.

Tabela 5: Temperatura nos dias e no momento dos testes.



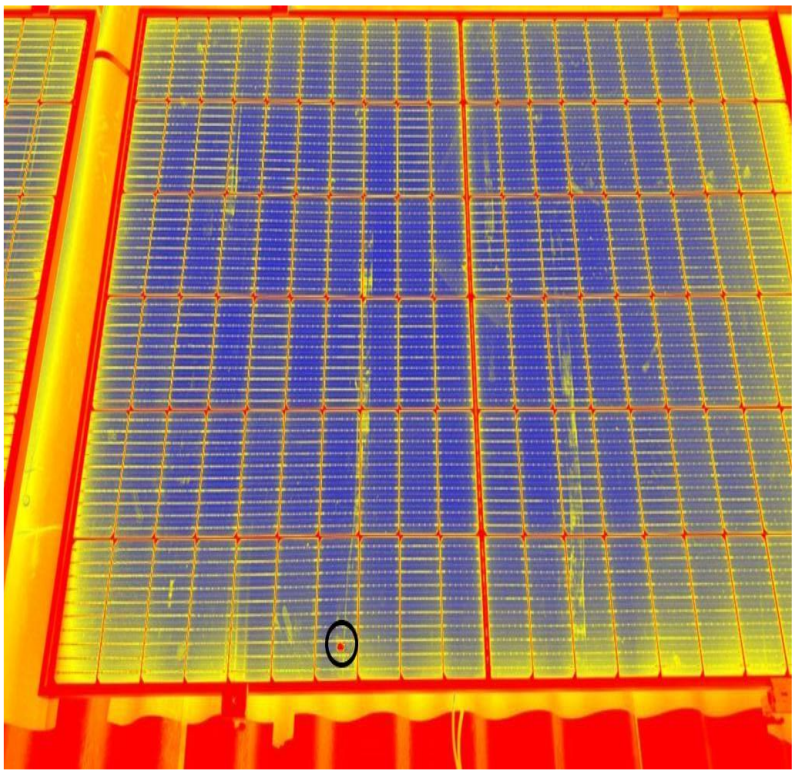
Fonte: O autor (2022).

A partir da análise na tabela acima, nota-se uma temperatura alta no primeiro dia do teste.

4.2 ANÁLISE DE PONTO QUENTE

O teste de *hotspots* foi realizado no dia 01/06/2022 às 14:00 à uma temperatura de 42°C. O sistema que foi usado para teste, como era recém-instalado, não possuía nenhuma sujeira sobre os módulos fotovoltaicos que pudesse provocar um ponto quente. Com isso, para simular o ponto quente foi utilizado uma pequena pedra capaz de produzir calor para realização do teste. Com uma câmera termográfica foi possível visualizar o ponto quente formado no módulo, conforme mostra a imagem abaixo.

Imagem 30: Ponto quente em um módulo fotovoltaico.



Fonte: O autor (2022).

Na imagem acima a formação do ponto quente está identificada pelo círculo preto. Como já mencionado acima nesse estudo, a geração de energia através de um módulo fotovoltaico se dá diretamente a quantidade de irradiação solar. A temperatura é um fator que influência o desempenho do sistema fotovoltaico, com uma temperatura alta, a tensão tende a cair e corrente elétrica tende a aumentar (PINHO; GALDINO, 2014).

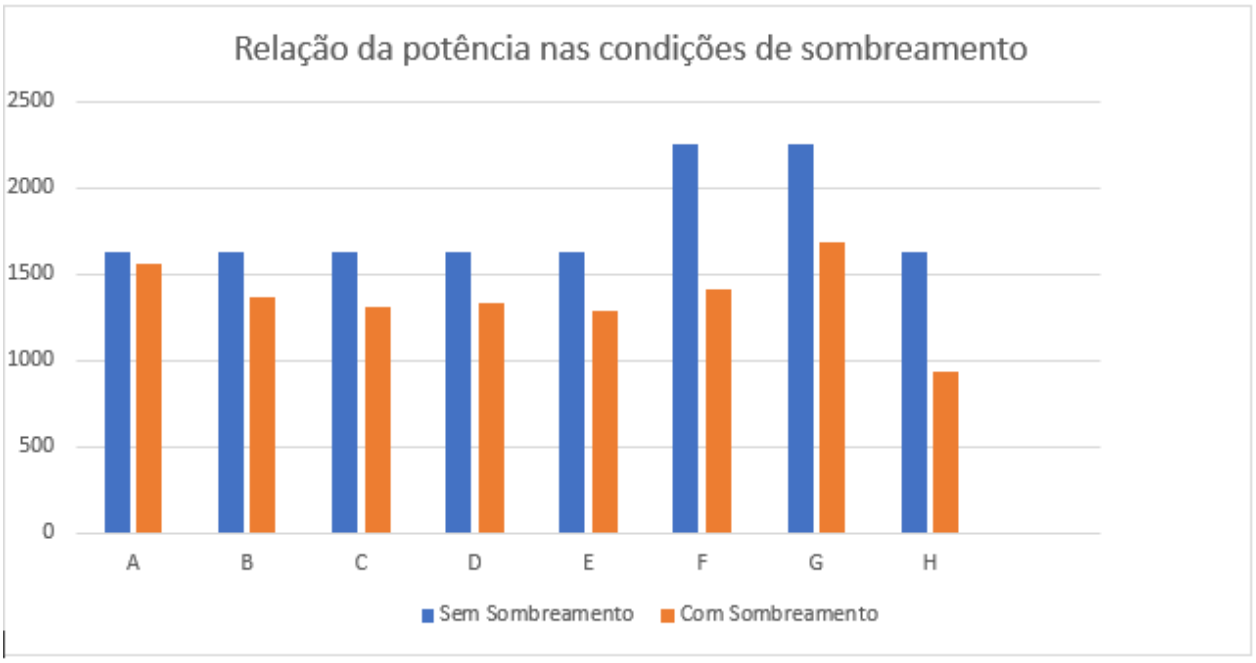
Como ocorreu na imagem acima, uma pequena pedra sobre uma célula ocasionou a queda da tensão e aumento da corrente naquele ponto, e com isso, essa pequena parte da célula passou a consumir corrente, provocando um superaquecimento devido ao efeito joule. O diodo de *by-pass* só é ativado em caso de um sombreamento acima de 20% em uma única célula fotovoltaica, que nesse teste não foi o caso, por isso se deu a formação de um pequeno ponto quente.

Foram feitas as medições de corrente, tensão e potência instantânea após a formação do ponto quente, mas devido a todo o sistema somente um módulo está afetado por apenas um *hotspots*, acabou se tornando desprezível, sem prejuízos na geração de energia e nos módulos e células fotovoltaicas.

4.3 ANÁLISE DA POTÊNCIA

Na imagem abaixo está apresentada os dados do comportamento da potência nas condições de sombreamento, dados esses que são importantes a nível de veracidade da prática com a teoria.

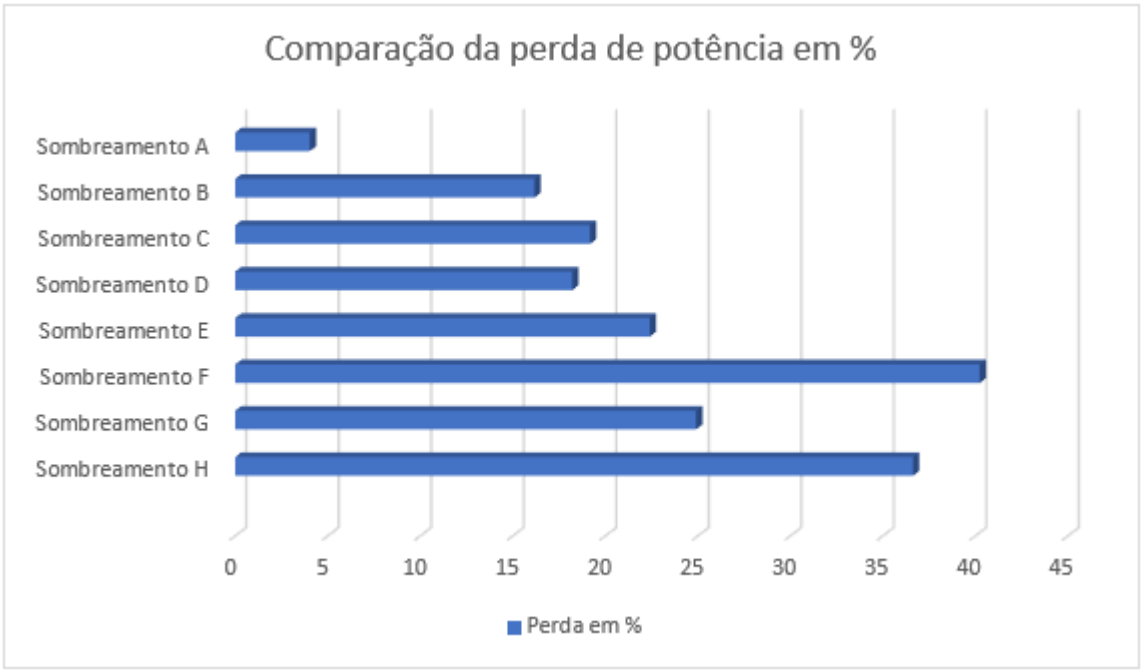
Tabela 6: Comportamento da potência nas condições de sombreamento.



Fonte: O autor (2022).

Através dos dados obtidos da potência com e sem sombreamento, pode-se fazer um gráfico da perda de potência em porcentagem em cada condição de sombreamento, que está apresentado na tabela 6.

Tabela 7: Perda de potência em porcentagem.



Fonte: O autor (2022).

A partir da análise da tabela 6, é possível notar que as condições A, B, D e E, tiveram menos perda de potência instantânea. As condições A, B e D os resultados foram próximos ao esperado, devido à sombra está sobre uma fileira que estava ligado a um diodo de *by-pass*, a variação da corrente nesses casos foi pequena, já a tensão é menos sensível a variação da irradiação solar sobre os módulos fotovoltaicos. Já na condição H esperava-se uma variação maior de corrente, como no caso da condição F em que teve uma área menor sombreada, mas teve maior variação de corrente.

É possível que uma das possíveis causas para essas discrepâncias seja correspondente ao comportamento da corrente e tensão dos módulos durante o processamento de MPPT do inversor. Para o inversor fotovoltaico extrair o ponto de máxima potência do MPPT, ele leva em consideração o comportamento elétrico dos módulos. Conforme (PINHO; GALDINO, 2014) o inversor fotovoltaico pode extrair o ponto de máxima potência de formas diferentes quando os módulos estão sombreados, e isso indica que a perda de geração de energia não é proporcional a área sombreada, e essas perdas podem estar relacionadas a ativação dos diodos de *by-pass*, da configuração do arranjo fotovoltaico e das características elétricas.

A partir disso, verifica-se a eficácia da utilização dos diodos de *by-pass* para esses casos de sombreamento. Em virtude do funcionamento dos diodos de *by-pass*, as perdas de potências nessas condições de sombreamento foram bem menores.

As condições E, F, G e H foram as que mais tiveram perda de potência instantânea do sistema. Na condição G e H mesmo tendo a mesma quantidade de sombreamento nas duas condições, tiveram uma diferença da perda de potência, isso porque na condição H, os módulos estavam orientados para o Sul, onde tinham menos irradiância solar, na condição G, os módulos estavam orientados ao Norte, onde tinha maior irradiância solar, e devido à isso teve uma menor perda. Acima foi mostrado através da figura 29 a diferença de geração entre a duas águas e com isso nota-se como a orientação influencia na geração de energia.

A corrente do arranjo na condição F e G foi realizada em módulos da orientação norte, e tendo uma corrente bem próxima. Mesmo com um sombreamento em uma área

maior na condição G do que na condição F, a diferença de corrente é bem pequena entre elas, isso porque a irradiação solar era alta.

Esperava-se que nas condições G e H devido ao sombreamento está sobre todo o módulo, a geração do arranjo seria quase nula, mas devido aos diodos de *by-pass* que desviou a corrente do módulo totalmente sombreado, permitindo que os outros módulos continuassem em operação.

Por último, quando o módulo é sombreado, a tensão varia pouco e já a corrente tem uma variação maior, isso ocorre devido aos módulos serem feitos de silício, e com 0,7 V em cada célula, já seria o suficiente para a condução de corrente. Segundo (MALVINO; BATES, 2016) quando a irradiação solar incidi sobre uma célula, ela já recebe a energia de um fóton que equivale à 0,7 V, e como essas células estão ligadas em séria, a tensão vai se somando até chegar na tensão nominal do módulo, que está em torno de 35 V a 50 V.

Então independente da quantidade de irradiação solar, mesmo sendo pequena, já seria o suficiente para uma célula superar a barreira de potência de 0,7 V. Agora em relação à corrente, será proporcional a quantidade de irradiação, quanto maior a irradiação solar sobre as células, mais fótons se incidem e mais elétrons se movimentam. Devido a isso a irradiação afeta mais a corrente elétrica do que a tensão, em que na maioria dos casos de sombreamento, permanece com poucas variações.

A tabela 7 apresenta a média de cada resultado encontrado dos 3 testes e o desvio padrão.

Tabela 8: Média e Desvio Padrão dos resultados obtidos

	MÉD. e DESVPAD. A	MÉD. e DESVPAD. B	MÉD. e DESVPAD. C	MÉD. e DESVPAD. D	MÉD. e DESVPAD. E	MÉD. e DESVPAD. F	MÉD. e DESVPAD. G	MÉD. e DESVPAD. H
Irradiância (kWh/m².dia)	5,72±0	5,72±0	5,72±0	5,72±0	5,72±0	5,72±0	5,72±0	5,72±0
Temperatura (°C)	39±2,65	39±2,65	39±2,65	39±2,65	39±2,65	39±2,65	39±2,65	39±2,65
Tensão (V) s/ sombreamento	302,3±1,1	302,3±1,1	302,3±1,1	302,3±1,1	302,3±1,1	301,6±0,58	301,6±0,58	302,3±1,15
Corrente (I) s/sombreamento	5,4±0,18	5,4±0,18	5,4±0,18	5,4±0,18	5,4±0,18	8,9±3	8,9±3	5,4±0,18
Potência (W) s/ sombreamento	1633,3±57,7	1633,3±57,	1633,3±57,7	1633,3±57,7	1633,3±57,7	2250±180,2	2250±180,3	1633,3±57,7
Tensão (V) c/ sombreamento	301±1	300±2,64	298±1	298,3±4,2	295,67±0,5	299±2,64	291,67±1,15	293,33±1,53
Corrente (I) c/sombreamento	5,31±0,02	4,65±0,57	4,42±0,44	4,47±0,13	4,28±0,35	4,62±1,05	5,77±066	3,18±0,72
Potência (W) c/ sombreamento	1566,67±57,74	1366,67±115,47	1316,67±125,83	1333,33±57,74	1283,33±76,38	1416,67±292,97	1683,33±189,3	933,33±208,17
Discrepância de potência (W)	66,67±57,74	266,67±152,75	316,67±175,59	300±0	366,67±76,38	866,67±225,46	566,67±246,64	700±264,58
Discrepância de potência (%)	4,04±3,5	16,18±8,92	19,18±10,03	18,22±0,55	22,41±5,05	40,24±12,58	24,92±9,37	36,64±5,02

Fonte: O autor (2022).

A condição A foi a condição com a menor perda de potência, devido somente uma célula está sombreada. As condições B, C e D tiveram tamanho próximo de áreas sombreadas e possuem a variação de potência semelhante. A condição H foi a que teve uma maior perda de potência, a *string* utilizada nessa condição estava virada para o Sul, onde a irradiação solar era bem inferior a orientação Norte, em que a *string* que foi utilizada nas condições F e G estavam orientadas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os testes foram realizados com êxito em um mês ideal, pois ocorreram em dias ensolarados e sem nuvens ou intempéries. Através de estudos teóricos e revisão bibliográfica foi possível encontrar embasamento para definir as possíveis condições de sombreamento e o funcionamento elétrico e comportamento das células fotovoltaicas, compreendendo os resultados encontrados.

A partir dos resultados encontrados nas condições G e H, analisa-se a grande variação da corrente e pequena variação da tensão. Esperava-se que nessas condições devido ao módulo está todo sombreado ele desligaria, e como os outros módulos estavam

em série, iria ocorrer o mesmo, porém, devido a ativação do diodo de *by-pass* que fez o desvio da corrente do módulo desligado para os outros módulos da série.

As condições A, B, C, D, E e F o não houve a interrupção completa da irradiação solar sobre os módulos, mesmo assim o diodo de *by-pass* foi ativado, o que no caso já era previsto.

Na realização do teste de ponto quente, uma pequena pedra em curto período, já foi capaz de causar o *hotspot* em uma célula fotovoltaica, devido á ser um bloqueio de irradiação solar muito pequeno, não foi capaz de ativar o diodo de *by-pass* podendo danificar a célula devido ao superaquecimento. Como falado acima, esse ponto quente não foi capaz de prejudicar a geração do sistema, devido a ser só um caso isolado em todos os módulos.

Em vista disso, essa pesquisa pode ser considerada relevante na elaboração de projetos de sistemas fotovoltaicos, em casos de interrupção da irradiação solar sobre os módulos fotovoltaicos e formação de pontos quentes. Como descrito no início deste trabalho, ressalvo mais uma vez a importância de em casos de instalações novas, realizar uma análise do local, observando possíveis sombreamentos.

REFERÊNCIAS

ENERGISA. Setor Elétrico Brasileiro. 07 Fevereiro de 2022. Disponível em: https://ri.energisa.com.br/a-energisa/setor-eletrico-brasileiro-2/. Acesso em: 18 de Maio de 2022.

MUNDO EDUCAÇÃO. Matriz energética Brasileira. 30 Maio de 2020. Disponível em: https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/matriz-energetica-brasileira.htm#:~:text=A%20matriz%20energ%C3%A9tica%20do%20Brasil,de%20produ%C3%A7%C3%A3o%20energ%C3%A9tica%20do%20pa%C3%ADs. . Acesso em 18 de Maio de 2022.

ESFERA BLOG. Dos primórdios ao Mercado Livre: História da Energia Elétrica no Brasil. Disponível em: https://esferaenergia.com.br/blog/historia-energia-eletrica-brasil/. Acesso em: 18 de Maio de 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Modernização do Setor Elétrico, 08 Junho de 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/modernizacao-do-setor-eletrico. Acesso em 19 de Maio de 2022.

GOV.BR. Geração Distribuída, 20 de Fevereiro de 2022. Disponível em: https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida. Acesso em: 24 de Maio de 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa Nº 482, 20 de Julho de 2021. Disponível em: https://antigo.aneel.gov.br/. Acesso em: 24 de Maio de 2022.

IBERDROLA. Radiação Solar, 09 de Janeiro de 2022. Disponível em: https://www.iberdrola.com/compromisso-social/radiacao-solar#:~:text=O%20QUE%20%C3%89%20A%20RADIA%C3%87%C3%83O,dos%20processos%20atmosf%C3%A9ricos%20e%20climatol%C3%B3gicos. Acesso em: 25 de Maio de 2022.

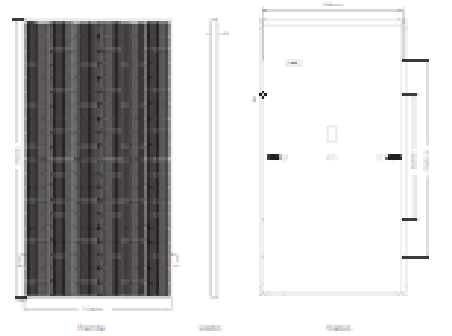
CANAL SOLAR. Entendendo o traçador de curva I-V para comissionamento de sistemas FV, 23 de Agosto de 2020. Disponível em: https://canalsolar.com.br/entendendo-o-tracador-de-curva-i-v-para-comissionamento-de-sistemas-fv-2/. Acesso em: 26 de Maio de 2022.

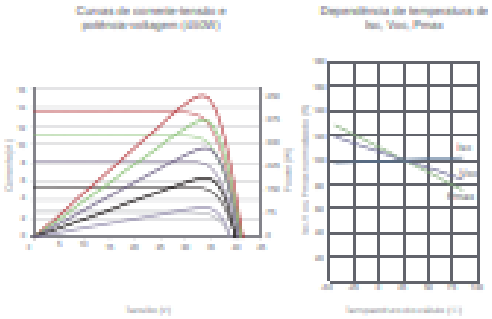
CANAL SOLAR. Oversizing e clipping nos sistemas fotovoltaicos, 30 de Junho de 2019. Disponível em: https://canalsolar.com.br/oversizing-e-clipping-nos-sistemas-fotovoltaicos/. Acesso em: 27 de Maio de 2022.

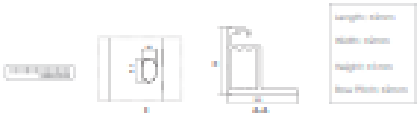
CANAL SOLAR. Entendendo os efeitos das sombras parciais nos sistemas fotovoltaicos, 6 de Março de 2020. Disponível em: https://canalsolar.com.br/efeito-das-sombras-parciais-nos-sistemas-fv/#:~:text=Sombras%20no%20sistema%20fotovoltaico,que%20chamamos%20de%20sombreamento%20parcial. Acesso em: 28 de Maio de 2022.

CANAL SOLAR. Diodo de by-pass e de bloqueio nos sistemas de energia solar fotovoltaica, 8 de Setembro de 2020. Disponível em: https://canalsolar.com.br/diodos-de-bypass-e-de-bloqueio-nos-sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica/. Acesso em: 30 de Maio de 2022.

ANEXO 1 – DATASHEET DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS







Configuração de embalagem

(Dois padrões = uma pilha)

35pcs/ palete, 70 pcs/pilha, 840 pcs/container de 40HQ

Características mecânicas

Tipo de célula	P type Mono-crystalline
Nº de células	120 (6×20)
Dimensões	1903×1134×30mm (74.92×44.65×1.18 inch)
Peso	34.2 kg (33.33 lbs)
Vidro frontal	3.2 mm, revestimento anti-reflexo, alta transmissão, baixo teor de ferro, vidro temperado
Quadro	Liga de Alumínio Anodizado
Caixa de Junção	Classificação IP68
Cabos de saída	TUV 1 × 4.0 mm2 (+): 290mm, (-): 140 mm ou comprimento personalizado

ESPECIFICAÇÕES

Tipo de Módulo	JKM460M-60HL4 JKM460M-60HL4-V		JKM465M-60HL4 JKM465M-60HL4-V		JKM470M-60HL4 JKM470M-60HL4-V		JKM475M-60HL4 JKM475M-60HL4-V		JKM480M-60HL4 JKM480M-60HL4-V	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Potência máxima (Pmax)	460Wp	337Wp	465Wp	341Wp	470Wp	345Wp	475Wp	349Wp	480Wp	352Wp
Tensão máxima de energia (Vmp)	33.72V	31.39V	33.82V	31.48V	33.91V	31.73V	34.04V	31.91V	34.20V	32.07V
Corrente de potência máxima (Imp)	13.65A	10.43A	13.76A	10.49A	13.87A	10.55A	13.96A	10.61A	14.05A	10.67A
Tensão de circuito aberto (Voc)	41.02V	38.73V	41.10V	38.79V	41.18V	38.83V	41.30V	39.01V	41.48V	39.13V
Corrente de curto-circuito (Isc)	13.75A	11.07A	13.79A	11.10A	13.85A	11.13A	13.93A	11.20A	14.01A	11.33A
Eficiência do módulo STC (%)	20.39%		20.62%		20.83%		21.06%		21.30%	
Temperatura de operação (°C)	-40°C ~ +60°C									
Tensão máxima do sistema	1000/1500VDC (IEC)									
Classificação máxima do fusível em série	25A									
Tolerância de potência	0~+3%									
Coeficientes de temperatura de Pmax	-0.30%/°C									
Coeficientes de temperatura de Voc	-0.26%/°C									
Coeficientes de temperatura de Isc	0.048%/°C									
Temperatura nominal da célula operacional (NOCT)	45±2°C									

STC: Irradiance 1000W/m² | Temperatura da célula 25 °C | AM=1.5

NOCT: Irradiance 800W/m² | Temperatura ambiente 20 °C | AM=1.5 | Velocidade do vento 1m/s

©2020 Jinko Solar Co., Ltd. Todos os direitos reservados.
As especificações incluídas nesta folha de dados estão sujeitas a alterações sem aviso prévio.

JKM440-460M-60HL4-(V)-F1-PT

Fonte: Jinko Solar (2022).

ANEXO 2 – DATASHEET DO INVERSOR FOTOVOLTAICO

Ficha de dados	MAC 25KTL3-XL	MAC 30KTL3-XL	MAC 36KTL3-XL
Dados de entrada			
Máxima potência fotovoltaica recomendada (para módulo STC)	32500W	39000W	46800W
Máxima tensão CC		1100V	
Tensão de partida		250V	
Tensão nominal		760V	
Faixa de tensão MPP		200V-1000V	
Número de rastreador MPP		3	
Número de strings fotovoltaicas por MPPT		4/4/4	
Máx. corrente de entrada por rastreador MPP		52A/52A/52A	
Máx. corrente curto-circuito por rastreador MPP		65A/65A/65A	
Saída (CA)			
Potência nominal de saída	25000W	30000W	36000W
Tensão nominal de saída(Faixa)		127V/220V(101.6-139.7V)	
[illegible]		[illegible]	
Corrente nominal de saída CA	65.6A	78.8A	94.5A
Máx. Corrente de saída	73.0A	87.4A	94.5A
Fator de potência		>0.99	
Fator ajustável de potência		0.8-0.8	
THDi		<3%	
Tipo de conexão CA		3W+N+PE	
Eficiência			
Máx. Eficiência		98.6%	
Euro-eta		98.2%	
Eficiência MPPT		99.9%	
Dispositivo de proteção			
Proteção de polaridade reversa de CC		Sim	
Interruptor CC		Sim	
Proteção de surtos CC		Tipo II	
Monitoramento de resistência de isolação		Sim	
Proteção de surtos CA		Tipo II	
Proteção de curto-circuito CA		Sim	
Monitoramento de rede		Sim	
Proteção anti-ilhamento		Sim	
Unidade de monitoramento de corrente residual		Sim	
Proteção AFCI		Sim	
Dados Gerais			
Dimensões (LIA/P)		680/608/281 mm	
Peso		45.2kg	
Faixa de temperatura operacional		-25°C ... +60°C (>45°C Derating)	
Emissão de ruído		<65dB(A)	
Altitude		4000m	
Consumo noturno		1W	
Topologia		Sem transformador	
[illegible]		[illegible]	
Grau de proteção elétrico		IP66	
Humidade relativa		0~100%	
Conexões CC		H4(OPT)	
Conexões CA		Terminal OT	
Características			
Exibição		OLED+LED/WiFi+APP	
Interfaces: Rs485/ USB/WiFi		Sim/Sim/Sim	
Garantia 5 Anos		Sim	
IEC61000-6/3,IEC62109-1/2,IEC62116,IEC61727, IEEE1547, UL1741			
SHENZHEN GROWATT NEW ENERGY CO.,LTD.	2nd & 3rd Floor,Building 4,Liuyu Industrial Zone,Xibaoning,Shangwu Village,Shiyan,Baoan District,Shenzhen		

Fonte: Growatt (2022).