

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

THIAGO RISSETTI ROQUETTO

**PROJETO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA
COMERCIAL CONECTADO À REDE**

Ilha Solteira
2024

THIAGO RISSETTI ROQUETTO

**PROJETO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA
COMERCIAL CONECTADO À REDE**

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
UNESP como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Prof. Dr. Carlos Antônio Alves
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R786p Roquette, Thiago Rissetti.
Projeto e avaliação de um sistema de geração fotovoltaica comercial
conectado à rede / Thiago Rissetti Roquette. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
80 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha
Solteira, 2024

Orientador: Carlos Antônio Alves

Inclui bibliografia

1. Radiação solar. 2. Proteção. 3. Projeto. 4. Arranjos. 5. Inversores. 6.
Economia.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

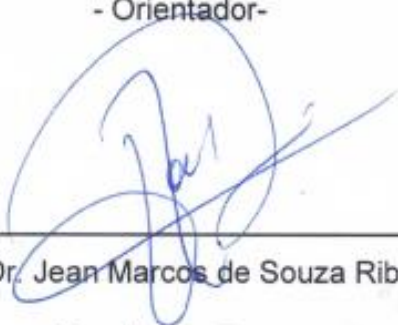
Aos doze dias do mês de abril do ano de dois mil e vinte e quatro, o discente Thiago Rissetti Roquette, matriculado sob o nº 221052615, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Carlos Antonio Alves*, o *Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro* e o *Doutorando Rodrigo Serra Daltin*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**PROJETO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA COMERCIAL CONECTADO A REDE**", obtendo a nota 9.0 (NOVE) e conceito APROVADO.



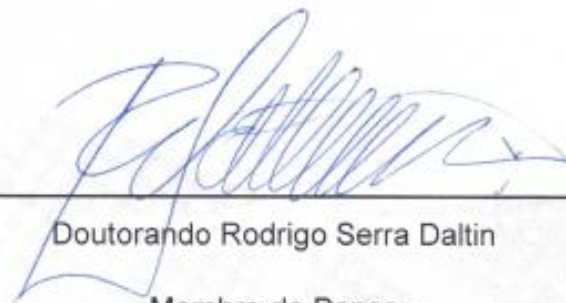
Prof. Dr. Carlos Antonio Alves
- Orientador -



Thiago Rissetti Roquette
- Discente -



Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro
- Membro da Banca -



Doutorando Rodrigo Serra Daltin
- Membro da Banca -

“Sábio é aquele que conhece os limites da própria ignorância”.

Sócrates.

RESUMO

Esse trabalho oferece uma visão abrangente, abordando desde os princípios teóricos até a aplicação prática de sistemas fotovoltaicos, destacando a viabilidade e os benefícios econômicos associados. É feita uma apresentação abrangente dos sistemas fotovoltaicos começando pela teoria da radiação solar e explorando o efeito fotovoltaico, que representa a conversão direta da luz solar em eletricidade por meio de materiais semicondutores. O estudo aprofunda-se nos tipos e composição dos painéis solares abordando tecnologias como policristalino, monocristalino e filme fino, além de examinar as características elétricas desses painéis. A discussão também engloba o comportamento dos painéis em ambientes sombreados ressaltando desafios e estratégias de mitigação. Os diferentes tipos de associação de módulos fotovoltaicos - série, paralela e mista - são analisados em termos de desempenho e flexibilidade. Aspectos relacionados aos componentes de proteção do sistema fotovoltaico e às estruturas de fixação são abordados para garantir durabilidade e segurança. O trabalho finaliza com a apresentação de um sistema fotovoltaico comercial em que é ressaltado a produção média estimada, com base em dados locais específicos, resulta em economia anual devido ao sistema.

Palavras-chave: Radiação solar, proteção, projeto, arranjos, inversores, economia.

ABSTRACT

This work provides a comprehensive overview, addressing both theoretical principles and the practical application of photovoltaic systems, emphasizing their feasibility and associated economic benefits. A comprehensive presentation of photovoltaic systems is made, starting with the theory of solar radiation and exploring the photovoltaic effect, which represents the direct conversion of sunlight into electricity through semiconductor materials. The study delves into the types and composition of solar panels, covering technologies such as polycrystalline, monocrystalline, and thin-film, while also examining the electrical characteristics of these panels. The discussion also encompasses the behavior of panels in shaded environments, highlighting challenges and mitigation strategies. Different types of photovoltaic module configurations - series, parallel, and mixed - are analyzed in terms of performance and flexibility. Aspects related to the protection components of the photovoltaic system and fixing structures are addressed to ensure durability and safety. The work ends with the presentation of a commercial photovoltaic system in which the estimated average production is highlighted, based on specific local data, resulting in annual savings due to the system.

.

Keywords: Solar radiation, protection, design, arrangements, inverters, economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Irradiação global horizontal	16
Figura 2- Irradiação horizontal no Brasil.....	18
Figura 3 – Onda eletromagnética que se propaga no vácuo.....	20
Figura 4 – Composição do Espectro da radiação Solar.	20
Figura 5 – Célula fotovoltaica.	21
Figura 6 – Associação de Placas Fotovoltaicas.	22
Figura 7 – Estrutura da célula fotovoltaica.	22
Figura 8 – Composição do Painel Solar.	25
Figura 9 – Conectores MC4 para Painéis Solares.	26
Figura 10 – Datasheet do módulo fotovoltaico.	27
Figura 11 – Dados de Teste do STC.....	29
Figura 12 – Curvas características Corrente x Tensão de acordo com a irradiância.....	31
Figura 13 – Curvas Características Corrente x Tensão de acordo com a temp.	31
Figura 14 – Características térmicas do módulo.	32
Figura 15 - Hotspots no painel causado devido ao sombreamento das células.....	34
Figura 16 – Comportamento do diodo de Bypass em célula não sombreada.	35
Figura 17 – Comportamento do diodo de Bypass em célula sombreada.	35
Figura 18 – Comportamento do Diodo bypass em um painel sombreado.....	36
Figura 19 – Ângulo Azimutal.	37
Figura 20 – Mapa de Ângulos de correção para encontrar o norte geográfico.	38
Figura 21 – Diferente trajetória do movimento aparente do Sol ao longo do ano.....	39
Figura 22 - Conexão série entre painéis por meio do conector MC4 Comum.	41
Figura 23 – ligação série entre 2 painéis de 12V e 5A.	42
Figura 24 – Conector MC4 Multibranch.....	43

Figura 25 – Conexão paralela por meio do conector MC4 Multibranch.....	43
Figura 26 – Ligação paralela entre 2 painéis de 12 V e 10 A.	44
Figura 27 – Ligação mista entre 6 painéis de 12 V e 10 A.	44
Figura 28 – Circuito eletrônico básico do inversor CC-CA.	46
Figura 29 – Funcionamento do inversor CC-CA.....	47
Figura 30 – Tensão alternada produzida na saída do inversor CC-CA.	48
Figura 31 – Exemplo de uma matriz ligada em um único inversor.	51
Figura 32 – Exemplo de uma matriz ligada com microinversores.	52
Figura 33 – Exemplo de ligação do DPS-CC na entrada do inversor.....	56
Figura 34 – Exemplo de ligação do DPS-CA na saída do inversor.	57
Figura 35 – Estrutura de Fixação para Paine Solar.....	60
Figura 36 – Diagrama indicando as Distâncias entre as fileiras dos painéis.	61
Figura 37 – Consumo Mensal do Estabelecimento em kWh.....	63
Figura 38 – Irradiação Solar Diária Média no município de Orlândia.	65
Figura 39 – Irradiação Solar Mensal Média em Orlândia com plano inclinado.....	66
Figura 40 – Temperaturas mínimas e máximas na cidade de Orlândia.	67
Figura 41 – Instalação dos Painéis sobre telhado inclinado.....	71
Figura 42 – Disposição final dos painéis.	72
Figura 43 – Instalação dos painéis sobre plataforma adicional de placas.....	73
Figura 44 – Conexão das placas aos Otimizadores de potência.....	74
Figura 45 — Economia gerada ao longo do tempo.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de Painéis Solares.....	24
Tabela 2 – Condições Padrão de Teste (STC).....	29
Tabela 3 – Temperatura Mínima e Máxima da cidade de São Paulo.....	29
Tabela 4 – Escolha do ângulo de inclinação do módulo.	40
Tabela 5 – Latitudes geográficas das capitais Brasileiras.	40
Tabela 6 – Consumo Mensal (kWh).	63

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. OBJETIVO	15
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
2.1. Radiação Solar	16
2.1.1. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil.....	17
2.2. Efeito Fotovoltaico	19
2.3. Células Fotovoltaicas.....	21
2.4. Tipos de Painéis Fotovoltaicos	23
2.5. Composição do Pannel Fotovoltaico.....	25
2.6. Característica Elétricas do Pannel	26
2.6.1. Perdas por Temperatura e por Sombreamento.	28
2.7. Inclinação do Módulo Voltaico	36
2.7.1. Ângulo Azimutal	37
2.7.2. Movimento da Terra.....	38
2.7.3. Escolha do ângulo de inclinação do módulo solar	39
2.8. Arranjo dos Módulos Fotovoltaicos.....	41
2.8.1. Associação em série.....	41
2.8.2. Associação em Paralelo	42
2.8.3. Associação Mista.....	44
2.9. Inversores de frequência	45
2.9.1. Princípio de Funcionamento	45
2.9.2. Inversores Isolados.....	48
2.9.3. Inversores Conectados	50
2.9.4. Microinversores	51
2.10. String Box de Sistemas Fotovoltaicos.....	52

2.10.1.	String Box CC	53
2.10.2.	String Box CA	53
2.11.	Dispositivo de Proteção contra Surto (DPS)	54
2.12.	Componentes de proteção.....	57
2.13.	Estruturas de fixação	58
2.13.1.	Estruturas de Suporte	59
2.13.2.	Trilhos.....	59
2.13.3.	Estrutura no solo.....	60
3.	PROJETO, montagem e perspectiva do sistema fotovoltaico.....	62
3.1.	Componentes e planejamento	62
3.2.	Componentes de proteção.....	70
3.3.	Transformador	70
3.4.	Medidor Bidirecional	70
3.5.	Instalação dos painéis.	71
4.	Conclusão.....	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia limpa e sustentável vem impulsionando o desenvolvimento e a adoção de tecnologias avançadas, como os painéis fotovoltaicos. Esses dispositivos desempenham um papel fundamental na geração de eletricidade a partir da luz solar, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a transição para uma matriz energética mais sustentável. A importância dos painéis fotovoltaicos é evidente não apenas em nível global, mas também no contexto específico do Brasil, um país que está avançando rapidamente em se tornar um grande utilizador de energia solar por meio desses painéis.

Nos últimos anos, avanços tecnológicos significativos levaram à diminuição do custo de produção dos painéis fotovoltaicos. Os avanços tecnológicos contribuem para tornar os painéis fotovoltaicos mais eficientes e acessíveis, permitindo uma maior disseminação dessa tecnologia tanto pelo governo quanto pela população em geral. Essa redução de custos foi impulsionada por melhorias nos materiais semicondutores, nos processos de fabricação e nas técnicas de integração de sistemas fotovoltaicos.

O Brasil, em particular, vem se destacando no aumento da utilização de energia solar por meio de painéis fotovoltaicos. O país possui um grande potencial solar devido ao seu clima favorável e vastas áreas disponíveis para a instalação de sistemas fotovoltaicos. Além disso, políticas governamentais têm incentivado investimentos em energia solar, promovendo a geração distribuída e estabelecendo metas ambiciosas para a incorporação de fontes renováveis na matriz energética nacional.

A motivação deste trabalho reside na crescente demanda por profissionais com conhecimento técnico em sistemas fotovoltaicos. A expansão da energia solar fotovoltaica requer uma força de trabalho qualificada capaz de projetar, instalar, operar e manter esses sistemas. Além disso, é importante promover a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias para aprimorar a eficiência e a durabilidade dos painéis fotovoltaicos.

Diante dessas considerações, este trabalho tem como objetivo analisar a importância dos sistemas fotovoltaicos como fonte de energia limpa e sustentável, destacando os avanços tecnológicos que contribuem para a redução dos custos de produção. Além disso, visa explorar o cenário atual do Brasil como um país em rápido

crescimento na utilização de energia solar fotovoltaica, tanto em nível governamental como na esfera da população em geral. Por fim, busca-se compreender as motivações e as demandas por profissionais qualificados nessa área em constante expansão.

1.1. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho de graduação é projetar e analisar um sistema fotovoltaico na cidade de Orlândia-SP, explorando o funcionamento dos painéis solares, das células fotovoltaicas e os cálculos necessários para a realização do projeto. Além disso, busca-se realizar um acompanhamento prático do projeto, desde a instalação dos painéis solares até a interligação adequada do sistema. Nesse contexto, também será abordado o conceito de aterramento como medida de segurança para evitar descargas elétricas em casos de falhas na rede elétrica.

O trabalho tem como objetivo principal demonstrar os conhecimentos necessários para a realização da instalação de um sistema fotovoltaico capaz de aproveitar a abundante radiação solar disponível na região, gerando energia limpa e renovável. Serão considerados aspectos de eficiência energética e viabilidade econômica, incluindo a análise do tempo de retorno do investimento. Dessa forma, o trabalho busca avaliar a viabilidade financeira do projeto e demonstrar os benefícios proporcionados pela utilização da energia solar.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

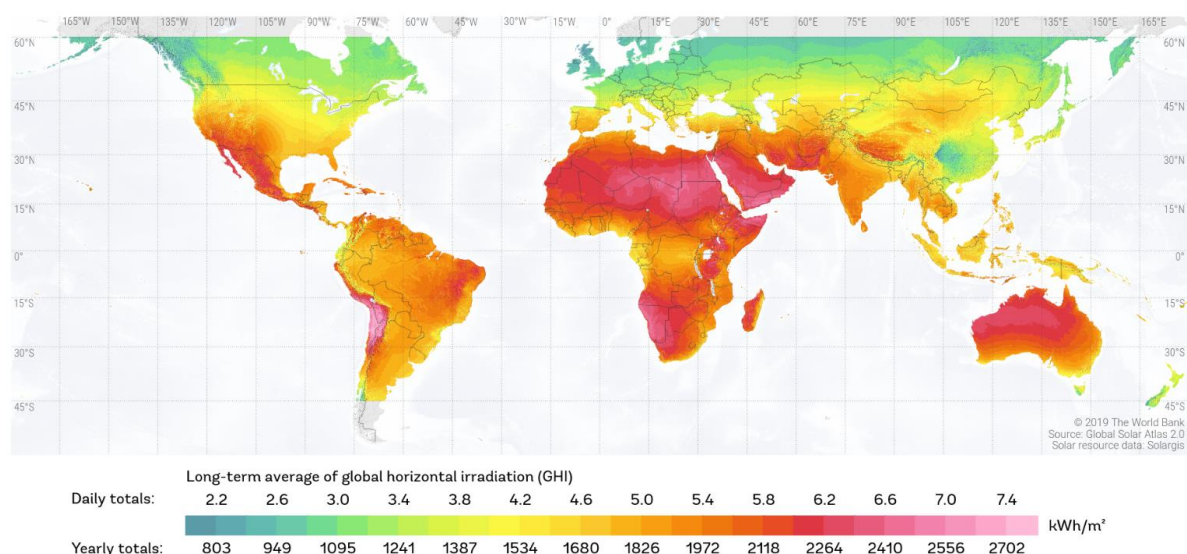
Neste capítulo são abordados os conceitos teóricos necessários para o entendimento e realização de um projeto, montagem e avaliação de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.

2.1. Radiação Solar

O Sol é uma fonte de energia inesgotável, limpa e renovável. Além de ser uma fonte de calor para o nosso planeta, é essencial para a realização da fotossíntese, mecanismo fundamental na produção do nosso oxigênio para a sobrevivência de muitos seres vivos, indispensável para a sobrevivência humana e manutenção de toda a vida na Terra.

O planeta Terra recebe no período de um ano cerca de $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia solar, isso corresponde a 10.000 vezes o consumo mundial de energia no mesmo ano. Ou seja, seria necessário apenas 0,01% dessa energia para suprir toda demanda global de energia elétrica (GUIMARÃES, 2004). A Figura 1 é uma ilustração gráfica de cores da potência de irradiação global horizontal e é possível notar que região com maiores potenciais de irradiação solar se encontram próximas da linha do equador.

Figura 1- Irradiação global horizontal



Fonte: (Global Solar Atlas, 2017).

De acordo com Abreu (2000), a Terra recebe uma enorme quantidade de radiação solar na zona superior da atmosfera, cerca de 174 petawatts. Cerca de 30% dessa radiação é refletida para o espaço, enquanto o restante é absorvido pela atmosfera, oceanos e massas terrestres. Esse processo de absorção aumenta a temperatura da Terra e desencadeia a circulação atmosférica e a formação de nuvens, resultando em fenômenos como vento e precipitação. A energia solar também é fundamental para a fotossíntese das plantas verdes, que converte a luz solar em energia química, produzindo alimentos, madeira e biomassa.

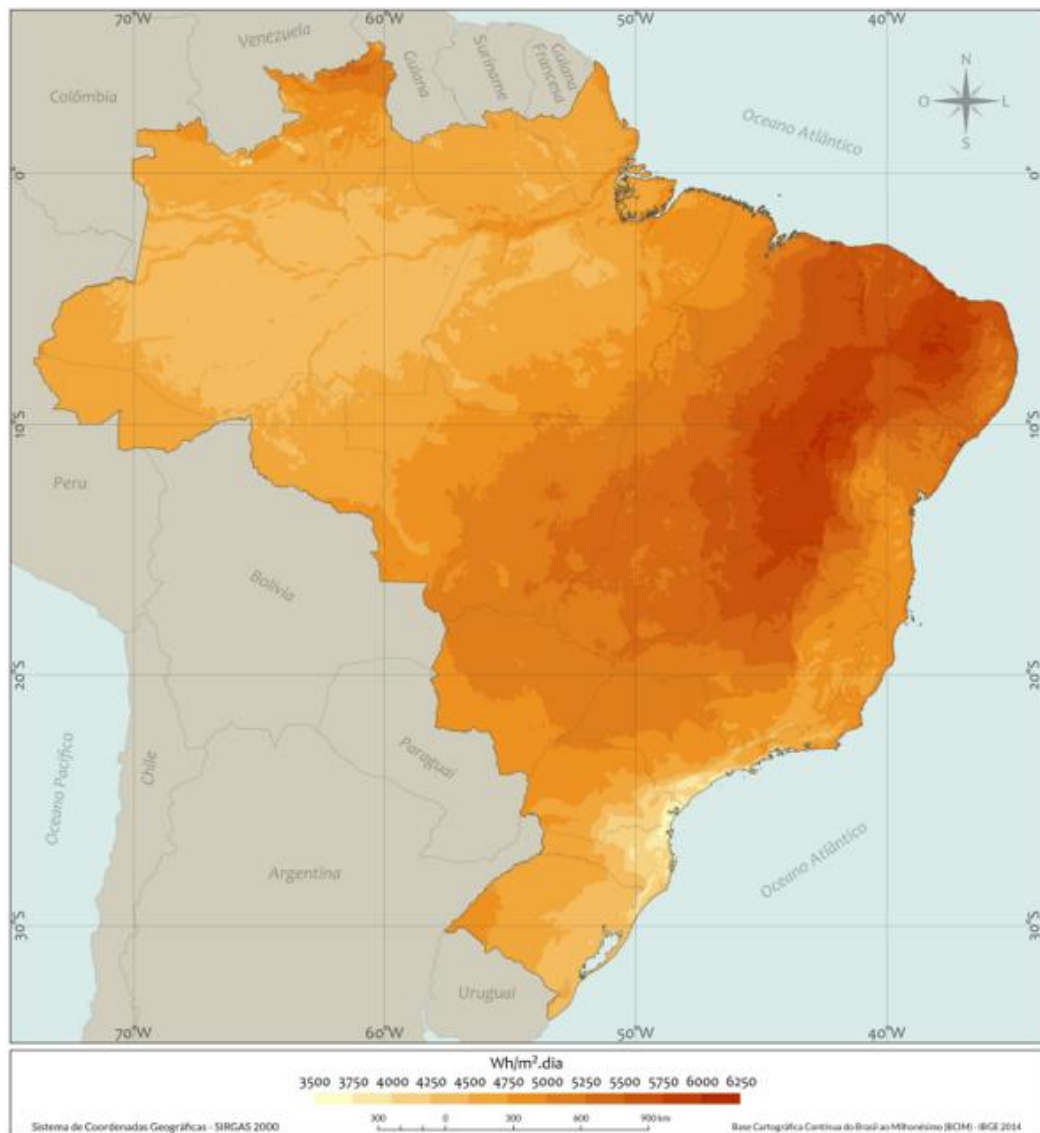
A energia solar é transmitida por meio de um fenômeno conhecido como radiação eletromagnética, seu comportamento pode ser simplificado como pequenos pacotes de energia que são transmitidos no formato de ondas, que saem do Sol e chegam até a Terra. Atualmente existem várias formas de aproveitamento dessa energia, uma delas é por meio de espelhos defletores que desviam os raios para um único ponto com a intenção de gerar calor. O calor acumulado é usado para aquecer um fluido e o vapor movimenta as turbinas, acionando o gerador e produzindo energia. Essa forma de produção é conhecida como heliotérmica.

Outra abordagem é a geração de energia elétrica fotovoltaica, uma das tecnologias mais amplamente utilizadas para aproveitar a energia solar. Nesse processo, a irradiação solar é convertida diretamente em energia elétrica, evitando a etapa térmica. No entanto, o foco deste trabalho de graduação será no Sistema Fotovoltaico.

2.1.1. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil

O Brasil tem um enorme potencial para energia solar devido a posição geográfica privilegiada no globo terrestre. Grande parte do território brasileiro se localiza logo abaixo da linha do equador, permitindo altos índices de radiação solar durante o dia. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, o Brasil recebe ao decorrer do ano mais de 3.000 horas de brilho do Sol, isso corresponde a uma incidência solar diária que pode ir de 4.500 a 6.300 Wh/m² como mostrado na Figura 2.

Figura 2- Irradiação horizontal no Brasil



Fonte: (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017).

Na figura 2 é claramente visível que as regiões centrais do Brasil, juntamente com o nordeste brasileiro, destacam-se como áreas de maior índice de irradiação solar horizontal anual. Essas regiões apresentam um potencial significativo de captação de energia solar ao longo do ano, tornando-as locais estratégicos para o desenvolvimento de projetos de energia solar. O alto nível de irradiação nessas áreas reforça o papel promissor da energia solar como fonte renovável e sustentável, capaz de impulsionar o suprimento de energia nessas regiões e contribuir para a transição energética do país.

2.2. Efeito Fotovoltaico

A energia fotovoltaica é obtida por meio da conversão direta da energia solar para energia elétrica. O primeiro relato desse fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico foi descoberto pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel, no ano de 1839.

Esse efeito acontece devido ao surgimento de uma diferença de potencial elétrico nas extremidades de uma estrutura de um semicondutor, causado devido à incidência de radiação solar. Com o avanço de novas tecnologias em microeletrônica, em 1956 foram construídas as primeiras células fotovoltaicas industriais (CARVALHO, 2021).

A energia que chega até as placas está associada à frequência da onda que a transmite, sendo que quanto maior a frequência, maior é a energia transmitida. Por outro lado, o comprimento de onda é inversamente proporcional à frequência, ou seja, quanto maior a frequência, menor o comprimento de onda.

A Equação (1) é conhecida como equação de Planck-Einstein e mostra a relação entre frequência e energia (VILLALVA, 2012).

$$E = h \cdot f \quad (1)$$

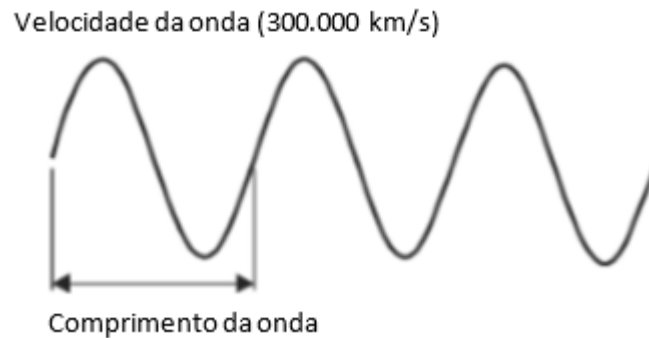
Sendo E a energia da onda expressa em joules [J] ou elétron-volt [eV], f é a frequência expressa em hertz [Hz], e por fim, h é uma constante física de proporcionalidade chamada de constante de Planck, que vale aproximadamente $6,636 \times 10^{-34}$ [Js].

A luz viaja pelo vácuo do espaço com velocidade constante de aproximadamente 300.000 km/s. A Equação (2) relaciona essa velocidade com o comprimento de onda e com a frequência.

$$c = \lambda \cdot f \quad (2)$$

E que c é a velocidade da luz no vácuo, λ é o comprimento de onda expresso em metros, e f é a frequência da onda em Hertz. Na Figura 3 ilustra-se uma onda eletromagnética.

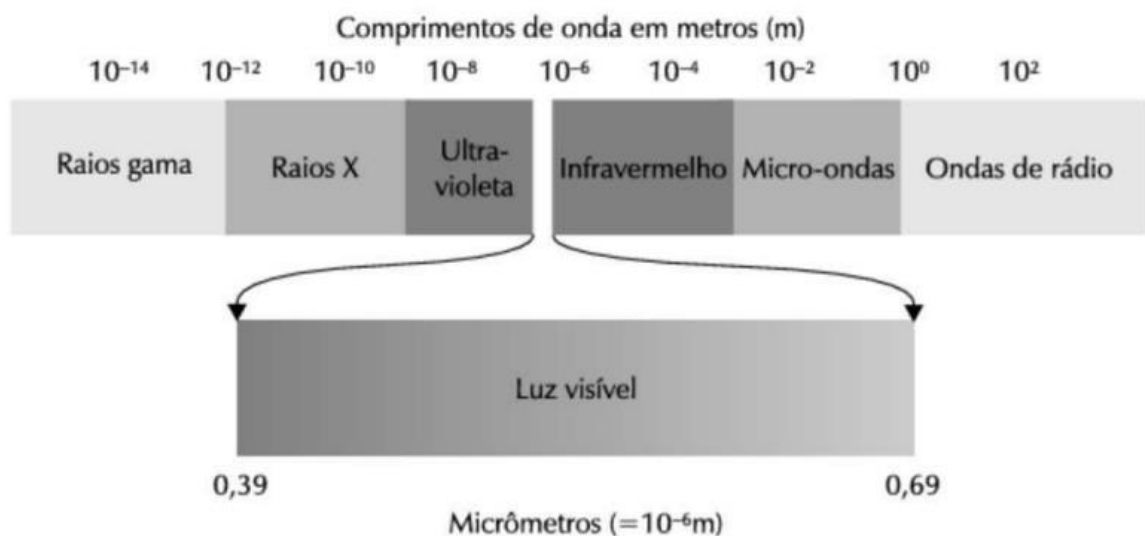
Figura 3 – Onda eletromagnética que se propaga no vácuo.



Fonte: (VILLALVA, 2012).

As ondas da radiação solar ainda apresentam um espectro que pode ser dividido em diversas frequências de ondas eletromagnéticas. Apenas uma pequena parte do espectro faz parte da luz visível, que é a faixa que o olho humano é capaz de enxergar. Porém, todo o espectro da luz é capaz de transportar energia incluindo as ondas invisíveis e as ondas visíveis, essa energia pode ser absorvida na forma de calor ou energia elétrica. Na Figura 4 demonstra-se a composição do espectro da radiação solar.

Figura 4 – Composição do Espectro da radiação Solar.



Fonte: (VILLALVA, 2012).

De maneira simples, o efeito fotovoltaico pode ser compreendido como uma interação da radiação do Sol com as placas solares. As células das placas são feitas em sua maioria por semicondutores de silício juntamente com boro ou fósforo. Esses semicondutores possuem elétrons que são excitados pela radiação solar e são capazes de realizar a conversão dessa radiação em energia elétrica, na forma de corrente contínua (CC).

2.3. Células Fotovoltaicas

A célula fotovoltaica é a principal componente do sistema fotovoltaico. Elas apresentam um potencial entre 1 e 5 Wp, uma tensão da faixa de 0,4 V e 0,5 V e conseguem produzir uma corrente de aproximadamente 1 A. Na Figura 5 representa-se uma célula de energia fotovoltaica.

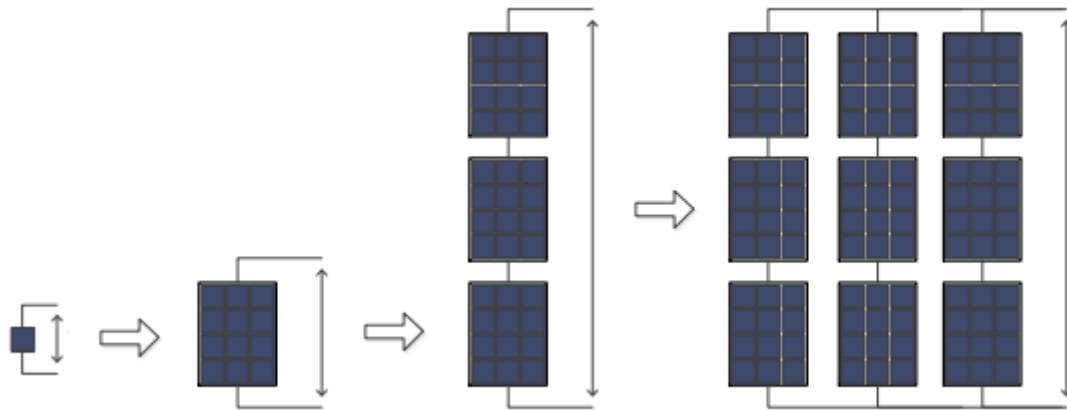
Figura 5 – Célula fotovoltaica.



Fonte: (CARVALHO, 2021).

Conforme Zilles (2012), as células produzem, em máxima potência, sob uma condição de 1000W/m^2 de sol e temperatura do componente de 25°C , uma densidade de corrente da magnitude de 32 mA/cm^2 . A Figura 6 mostra como o arranjo das células fotovoltaicas são agrupadas para formar um módulo ou placa solar e como esses módulos podem ser montados diferentes arranjos.

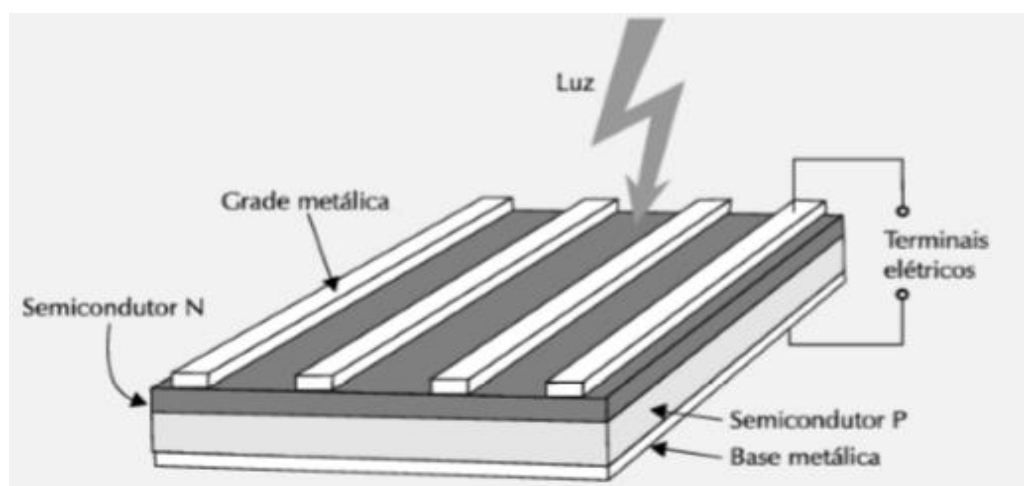
Figura 6 – Associação de Placas Fotovoltaicas.



Fonte: (Almeida, 2012).

Normalmente as células fotovoltaicas são formadas por uma grade superior e uma base metálica inferior que servem como terminais elétricos, e entre essas bases existem duas camadas de semicondutores, sendo uma P e uma N. A grade superior deve ser translúcida para não afetar a absorção de luz, enquanto a base inferior é feita de alumínio ou prata. Por fim, a célula é revestida de um material com antirreflexo para assim amplificar ainda mais a capacidade de absorção de raios de luz da célula. Na Figura 7 ilustra a estrutura da célula fotovoltaica.

Figura 7 – Estrutura da célula fotovoltaica.



Fonte: (VILLALVA, 2012).

O material mais comum utilizado na fabricação das placas é o silício. Primeiramente, por ser um dos elementos mais abundantes na superfície da terra, e

segundo, devido a suas propriedades físicas. Quando a estrutura química do silício é analisada, é possível observar que os átomos estão interligados, ou seja, os elétrons não possuem liberdade de movimento. Para contornar isso são injetados átomos de fósforo, com cinco elétrons na camada de valência, assim, um elétron é livre para se movimentar. Nessa estrutura, quando os elétrons ganham energia suficiente, eles podem se movimentar livremente. Essa injeção de átomos de fósforo no silício chama-se dopagem tipo N do material.

Semelhante a dopagem tipo N, se ao invés de fósforo for injetado boro com três elétrons na camada de valência haverá um “buraco” para cada átomo de boro (VILLALVA, 2012). Esse processo é chamado de dopagem tipo P.

2.4. Tipos de Painéis Fotovoltaicos

Atualmente, o mercado de energia solar oferece uma ampla variedade de opções em termos de painéis fotovoltaicos, com destaque para sete tipos distintos: silício monocristalino, silício policristalino, filme fino, silício amorfo, telureto de cádmio, seleneto de cobre índio e gálio, e células fotovoltaicas orgânicas. Cada uma dessas tecnologias possui suas próprias características e vantagens específicas, atendendo a diferentes necessidades e aplicações.

No entanto, é importante ressaltar que alguns desses tipos de painéis solares são mais amplamente reconhecidos pela sua eficiência e durabilidade. É o caso dos painéis de silício monocristalino e policristalino, que há anos dominam o mercado com sua comprovada eficácia e confiabilidade. Por outro lado, os painéis de filme fino e as células fotovoltaicas orgânicas têm ganhado destaque por sua versatilidade e potencial de baixo custo, além de apresentarem uma estética mais atraente e uma maior flexibilidade em termos de instalação.

A tabela contém informações cruciais sobre cada tipo de painel solar. Desde dados sobre eficiência e vida útil até detalhes sobre funcionalidades específicas e aplicações recomendadas, essa tabela proporciona um panorama completo do universo dos painéis solares.

Tabela 1 – Tipos de Painéis Solares

TIPO DE PAINEL	Silício Monocristalino	Silício Policristalino	Filme Fino	Silício Amorfo	Telureto de Cádmio	Seleneto de Cobre Índio e Gálio	Células Fotovoltaicas Orgânicas
Tecnologia	Monocristalina	Policristalina	Filme Fino	Silício Amorfo	Telureto de Cádmio	Seleneto de Cobre Índio e Gálio	Orgânica
Eficiência	Entre 15% e 22%	Entre 13% e 16%	Entre 6% e 12%	Entre 6% e 9%	Entre 9% e 16%	Entre 10% e 13%	Entre 2% e 6%
Aparência	Coloração uniforme, cantos arredondados	Formação múltipla dos cristais visível	Estética homogênea, base flexível	Coloração uniforme, cantos arredondados	Coloração uniforme, cantos arredondados	Coloração uniforme, cantos arredondados	Leves, semitransparentes, flexíveis
Vida útil	Superior a 30 anos	25 anos	Depende do fabricante	Superior a 20 anos	20 anos	20 anos	A ser determinado
Garantia	25 anos	25 anos	Depende do fabricante	10 a 15 anos	10 a 15 anos	10 a 15 anos	A ser determinado
Custo	Mais elevado comparado a outros tipos de painéis	Mais acessível comparado a painéis monocristalinos	Mais barato, mas custo adicional de estrutura	Custo elevado de produção	Competitivo com painéis de silício	Competitivo com painéis de silício	Potencialmente mais baixo
Toxicidade	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Alta (devido ao cádmio)	Média	Baixa
Utilização	Residencial, comercial	Comercial, industrial	Residencial, comercial	Comercial, industrial	Industrial	Industrial, comercial	Pesquisa e Desenvolvimento, Aplicações Especiais

Fonte: Elaborado pelo Autor.

2.5. Composição do Painel Fotovoltaico

Geralmente, os painéis são elaborados e montados em uma sequência específica de elementos. Essa disposição de montagem assegura o desempenho e a salvaguarda dos painéis, visto que eles estão sujeitos à exposição contínua ao ambiente. O painel é inicialmente composto por uma estrutura de alumínio que proporciona resistência mecânica e maior rigidez ao mesmo. Em seguida, o vidro é inserido para servir como proteção frontal do painel, seguido por uma película encapsulante que protege as células contra raios UV, variações de temperatura e umidade. Após a película encapsulante, encontram-se as próprias células solares. Por fim, outra película encapsulante é aplicada.

Na sequência, é colocado um fundo protetor conhecido como *backsheet* que é uma chapa metálica com a finalidade de servir como proteção da parte traseira do painel. Por fim, a caixa de junção que é usada para realizar as conexões elétricas entre a associação das células com o cabo externo, serve como conector para realização das conexões entre outros painéis. Na Figura 8 mostra-se a composição do painel solar.

Figura 8 – Composição do Painel Solar.



Fonte: (PORTAL SOLAR, 2019).

Os conectores desses cabos são robustos e blindados, e normalmente são de grau de proteção IP68, ou seja, são totalmente protegidos contra poeira e contra submersão. Além disso, os conectores oferecem proteção contra choques elétricos, pois quando o painel é exposto ao Sol a produção de energia é iniciada imediatamente, e nos conectores não há exposição de cabos nus. Na Figura 9 ilustra-se esse tipo de conectores.

Figura 9 – Conectores MC4 para Painéis Solares.



Fonte: (VILLALVA, 2019).

2.6. Característica Elétricas do Painel

É fundamental realizar uma análise minuciosa das características dos equipamentos antes de iniciar qualquer projeto. Compreender o significado de cada uma das especificações do produto é essencial para garantir o sucesso e a eficiência do empreendimento. Nesse sentido, a consulta detalhada aos dados técnicos torna-se imprescindível, fornecendo insights valiosos para a seleção do equipamento mais adequado às necessidades específicas do projeto em questão.

Um exemplo prático desse processo pode ser encontrado na Figura 10, que apresenta uma tabela detalhada com os parâmetros elétricos de um painel solar da marca JNG. Essa tabela não apenas lista informações como potência máxima, eficiência do módulo e tensão de circuito aberto, mas também fornece dados sobre corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto. Esses detalhes são cruciais para avaliar o desempenho do painel em diferentes condições e ambientes,

permitindo uma escolha informada e assertiva do equipamento mais adequado para o projeto em questão

Figura 10 – Datasheet do módulo fotovoltaico.

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

Parâmetros Elétricos em Condições de Testes Padrão

Módulo			UL-380M-72
Potência Max.	P_{max}	W	380
Tolerância de Potência	ΔP_{max}	W	0/+5W
Eficiência do Módulo	η_m	%	19.58
Tensão em Potência Max.	V_m	V	39.6
Corrente em Potência Max.	I_m	A	9.60
Tensão de Circuito Aberto	V_{oc}	V	48.5
Corrente de Curto-Circuito	I_{sc}	A	10.07

Fonte: (JNG Linha Solar, 2020).

No *datasheet* é possível verificar as seguintes informações:

- Módulo.

É o modelo do painel com o código do produto.

- Potência Max.

A potência Max, também chamada de potência de pico, é medida em Watts e representa a potência máxima extraída do módulo de acordo com o STC (Standard Test Conditions ou Condições Padrão de Teste). Essas condições são testes laboratoriais para verificar a capacidade de trabalho do módulo de acordo com diversos fatores para que se possa traçar um comparativo com outros painéis solares. Esses testes são, por exemplo, o funcionamento de acordo com a temperatura ambiente, massa de ar sobre o módulo, radiação solar entre outros.

- Tolerância de Potência.

Trata-se de uma variação também medida em Watts da potência do painel. Nesse exemplo, o painel pode ter uma variação de 5 Watts tanto para mais como para menos, portanto, sua potência varia entre 375 W e 385 W.

- Eficiência do módulo.

Neste painel a eficiência de é de 19,58%, o que significa que de toda radiação que chega ao painel é possível extrair para a conversão de energia elétrica 19,58%.

- Tensão em Potência Max.

É a tensão de saída do módulo quando ele atinge sua potência máxima, no caso deste modelo sua tensão máxima é de 39,6 Volts.

- Corrente em Potência Max.

Similar a tensão de potência máxima, esse valor é a corrente obtida quando o painel está operando em sua potência máxima. Neste caso seria de 9,6 Ampere.

- Tensão de Circuito Aberto.

É a tensão do módulo com o painel que está operando em vazio, ou seja, quando não existe nenhuma carga conectada aos seus terminais.

- Corrente de Curto-Circuito.

Esta é a corrente que o painel está fornecendo quando não há nenhuma carga ou resistência entre os polos de saída conectado ao painel.

2.6.1. Perdas por Temperatura e por Sombreamento.

Em sistemas fotovoltaicos, assim como todos os outros sistemas, existem perdas no processo de geração. No caso de sistemas solares as principais fontes de perdas ocorrem pelo sombreamento dos módulos e pela temperatura. Em relação a perda por temperatura é necessário verificar as especificações de STC. Esses parâmetros indicam que os painéis foram submetidos em testes laboratoriais para determinação dos valores de *Datasheet* e outras especificações. Na Tabela 2 são mostrados quais são as condições padrões de teste.

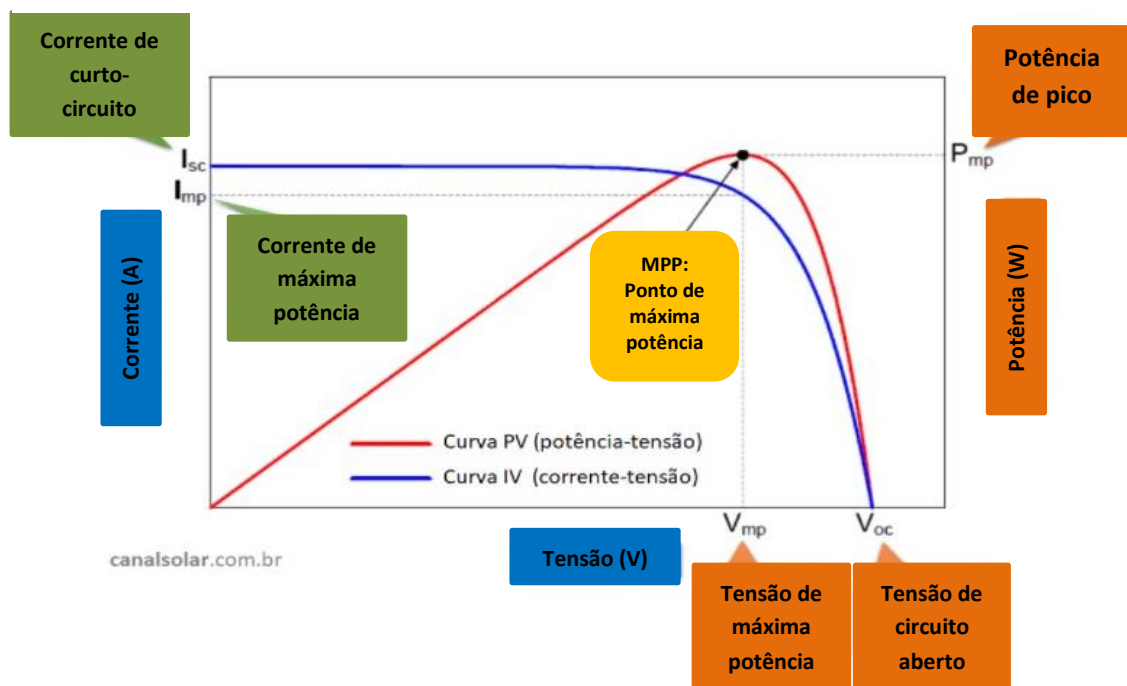
Tabela 2 – Condições Padrão de Teste (STC).

Parâmetros	STC
Irradiância	1.000 W/m ²
Massa de Ar	1,5 AM
Temperatura da Célula	25°C
Temperatura do Ar	0°C

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Através dos testes realizados são obtidos dados essenciais para a análise da relação entre corrente elétrica, tensão e potência. Na Figura 11 apresenta-se graficamente os resultados obtidos, onde é possível observar a curva de corrente em função da tensão, representada pelo traçado azul. Essa curva mostra como a corrente varia conforme a tensão aplicada ao circuito, fornecendo informações cruciais para o entendimento do comportamento elétrico do sistema estudado.

Figura 11 – Dados de Teste do STC



Fonte: (VINTURINI, 2019).

Além disso, a mesma figura exibe a curva de potência em relação à tensão, representada pela linha vermelha. Através dessa curva é possível compreender a relação entre a potência consumida no circuito e a tensão aplicada, permitindo

identificar os pontos de maior eficiência energética e as regiões onde há maior dissipação de energia.

Os resultados são de extrema importância para o projeto e análise de circuitos elétricos, pois permitem a seleção adequada de componentes. Portanto, a análise desses dados é fundamental para a eficiência e segurança das instalações elétricas de painéis solares que são utilizados no dia a dia.

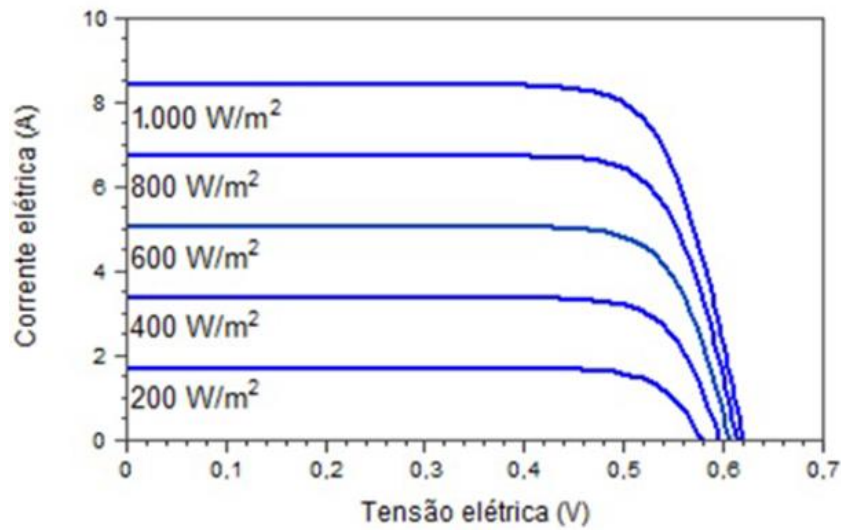
Através da análise das curvas características de corrente e tensão exibidas na Figura 12, é possível obter informações valiosas sobre o comportamento do painel solar sob diferentes níveis de irradiação solar. Esse gráfico ilustra de forma clara e precisa as variações de corrente e tensão que ocorrem quando o painel é submetido a diversos níveis de radiação, abrangendo uma faixa que vai de 200 W/m² a 1000 W/m².

A representação gráfica é essencial para compreender o fenômeno de perda por sombreamento dos módulos, revelando como o painel responde quando está exposto a diferentes intensidades de luz solar. A variação da irradiação tem um impacto direto no desempenho e eficiência do painel, e entender essas mudanças é fundamental para otimizar o aproveitamento da energia solar.

Por meio da análise minuciosa dessas curvas, é possível identificar o ponto de máxima potência do painel, ou seja, o ponto onde a potência elétrica gerada é a maior possível. Além disso, é possível observar como o painel se comporta em condições de baixa irradiação, onde a geração de energia é reduzida, assim como em situações de alta irradiação, em que o painel atinge seu pico de desempenho.

A investigação das características de corrente e tensão sob diferentes níveis de radiação solar é de extrema importância para o setor de energia solar fotovoltaica, pois permite aprimorar o projeto e dimensionamento de sistemas, além de fornecer subsídios para o desenvolvimento de estratégias que maximizem a eficiência energética dos painéis solares em diversas condições ambientais.

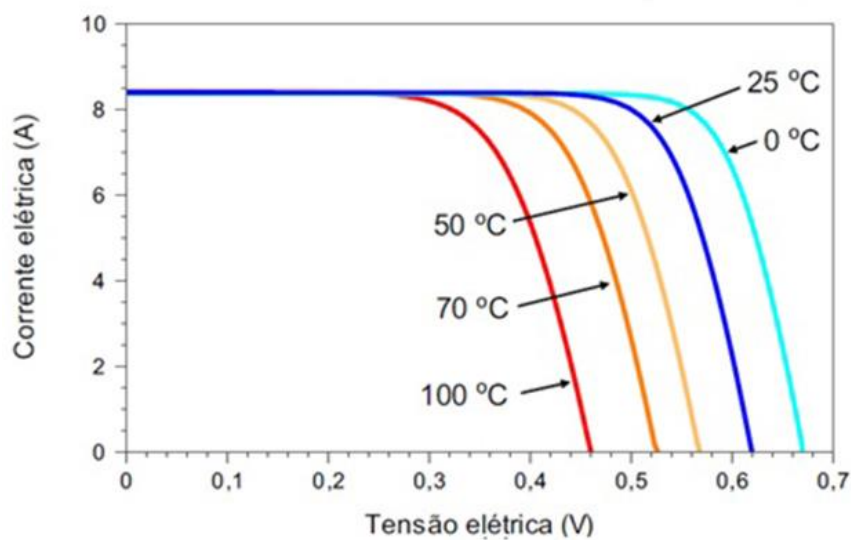
Figura 12 – Curvas características Corrente x Tensão de acordo com a irradiância.



Fonte: (Pinho e Galdino, 2014).

É possível observar que a tensão apresenta pouca variação, enquanto a corrente tem uma maior diferença entre seus valores o que afeta diretamente a potência gerada no rendimento dos módulos fotovoltaicos. Da mesma maneira o gráfico da Figura 13 representa as perdas por temperatura. É possível notar o contrário do que ocorre na figura anterior, ou seja, existe pouca variação de corrente e uma maior variação de temperatura.

Figura 13 – Curvas Características Corrente x Tensão de acordo com a temperatura.



Fonte: (Pinho e Galdino, 2014).

É comum que os fabricantes forneçam os dados de perdas do módulo para que possibilite a determinação da eficiência dos módulos em diferentes temperaturas. Como exemplo, na Figura 14 são demonstradas as características térmicas de um módulo específico da JNG.

Figura 14 – Características térmicas do módulo.

CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

Temperatura Nominal de Operação	NOCT	°C	45±2
Coeficiente de Temperatura de Pmax	γ	%/°C	-0.390
Coeficiente de Temperatura de Voc	β_{voc}	%/°C	-0.290
Coeficiente de Temperatura de Isc	α_{isc}	%/°C	+0.049

Fonte: (JNG Linha Solar, 2020).

Portanto, a determinação da temperatura média da região onde será instalado o painel é fundamental para uma melhor previsão da real eficiência do módulo. Como exemplo, a cidade de São Paulo apresenta a seguinte variação anual de temperatura demonstrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Temperatura Mínima e Máxima da cidade de São Paulo.

Mês	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Julho	12°	22°
Janeiro	19°	27°	Agosto	13°	23°
Fevereiro	19°	28°	Setembro	14°	24°
Março	19°	27°	Outubro	16°	25°
Abril	17°	25°	Novembro	17°	26°
Maio	14°	23°	Dezembro	18°	26°
Junho	13°	22°			

Fonte: (CLIMATEMPO, 2022).

A partir da Tabela 3 é possível verificar que a média anual da cidade de São Paulo é 20,37°C. Com esse dado e com o auxílio do *datasheet* do fabricante é possível fazer a correção climática e determinar a real eficiência do módulo nesse local.

Utilizando os dados das Figuras (10 e 14) como exemplo é possível encontrar as seguintes informações:

- Potência máxima do módulo: 380 W.
- Coeficiente de Correção (Potência): -0,390 %/°C.
- Temperatura anual média: 20,375°C.

A perda percentual é dada pela Equação (3):

$$P\% = Tam \cdot Coef\% \quad (3)$$

$$P\% = 20,37^{\circ}C \cdot \frac{-0,390\%}{^{\circ}C} = -7,94\%$$

De 100% da eficiência do módulo há uma perda climática de 7,94%, restando uma potência corrigida de 92,053%, no qual o painel é capaz de fornecer:

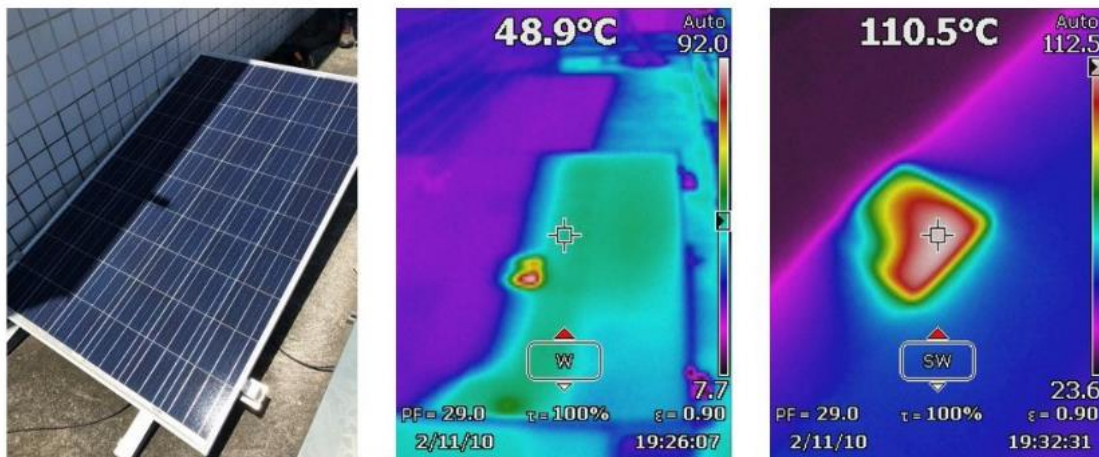
$$\text{Potência corrigida} = 0,92053 \cdot 380 = 349,80 \text{ W.}$$

As perdas por sombreamento representam uma preocupação significativa nos sistemas de energia solar fotovoltaica. Quando células do painel são cobertas por sombras, elas deixam de gerar energia e se tornam uma carga para o painel, resultando em sobreaquecimento do sistema. Essas áreas sombreadas são conhecidas como *hotspots* ou pontos quentes, e podem levar à danificação do painel comprometendo seu funcionamento originalmente projetado. Os *hotspots* são identificados através do uso de uma câmera térmica conforme ilustrado na Figura 15, permitindo a detecção dessas regiões com temperaturas elevadas.

Para evitar danos causados por *hotspots*, é empregado um dispositivo chamado diodo *bypass*. O diodo *bypass* atua permitindo que a energia gerada pelas células que produzem eletricidade flua diretamente para a saída do painel, sem ser afetada pelas células sombreadas que não estão gerando energia no momento. Essa estratégia visa garantir que o painel opere de maneira eficiente, maximizando a geração de energia e prevenindo o sobreaquecimento causado pelas áreas sombreadas.

Em geral, um painel com células em série a cada 18 células é equipado com 2 diodos de *bypass*, proporcionando a proteção adequada contra *hotspots*. A abordagem de instalar diodos de *bypass* é fundamental para o bom desempenho e a longevidade dos painéis solares, evitando danos potenciais e garantindo que o sistema opere de forma segura e eficiente ao longo do tempo.

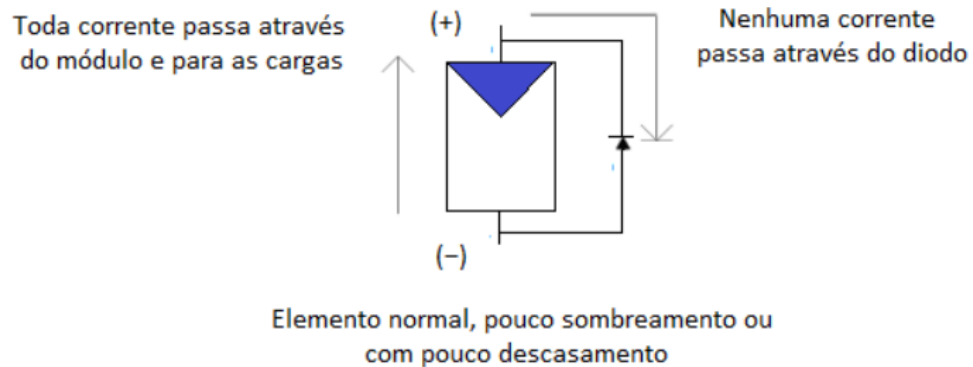
Figura 15 - Hotspots no painel causado devido ao sombreamento das células.



Fonte: (VINTURINI, 2019).

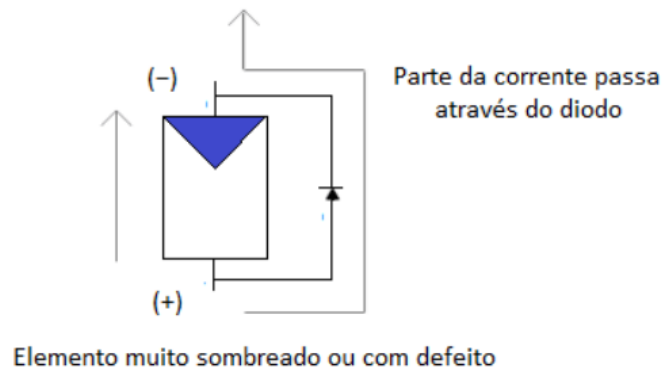
Na Figura 16 ilustra-se o funcionamento do diodo ligado em paralelo à célula quando ela está produzindo energia normalmente e não se comporta como uma carga. Na Figura 17 é ilustrada a mesma célula, porém agora sombreada, ou seja, com o comportamento de uma carga. O diodo atua fazendo com que a corrente que vem das células anteriores possa seguir com mais facilidade, de forma a evitar o superaquecimento do painel e perdas nesse processo.

Figura 16 – Comportamento do diodo de Bypass em célula não sombreada.



Fonte: (Pinho e Galdino, 2014).

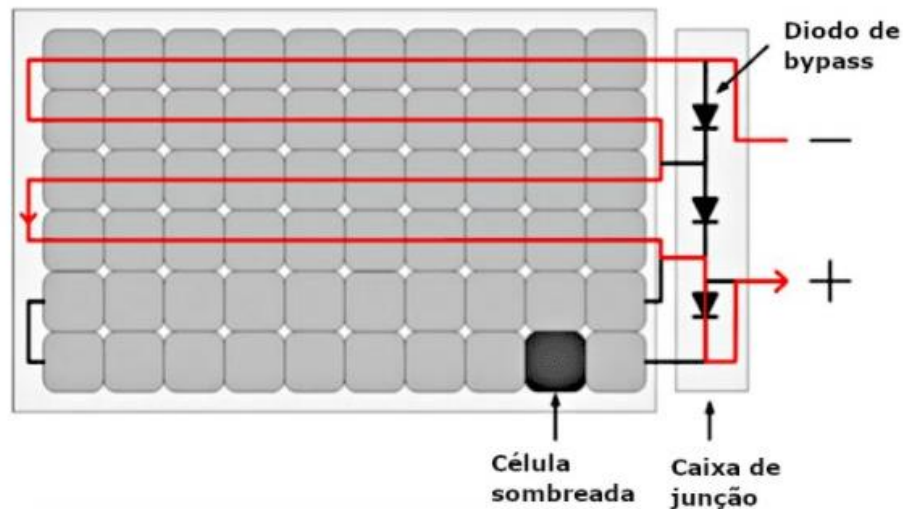
Figura 17 – Comportamento do diodo de Bypass em célula sombreada.



Fonte: (Pinho e Galdino, 2014).

O funcionamento dos diodos de *bypass* é uma medida estratégica para proteger os painéis solares contra perdas por sombreamento. Ao contrário do que se poderia imaginar, os diodos não são instalados individualmente em cada célula sombreada, mas sim na caixa de junção do painel. Cada diodo é responsável por proteger um grupo de aproximadamente 18 a 20 células do painel, conforme ilustrado na Figura 18. Essa configuração permite que mesmo com uma das células sombreadas, a corrente elétrica consiga percorrer o circuito até o final, evitando que a energia gerada pelas células não sombreadas seja comprometida.

Figura 18 – Comportamento do Diodo bypass em um painel sombreado.



Fonte: (VINTURINI, 2019).

Considere um painel de 60 células que possui 3 diodos de *bypass*. Mesmo que uma célula fique sombreada, o painel consegue canalizar a corrente elétrica através dos diodos e permite que ela chegue até o final do circuito. No entanto, é importante ressaltar que essa situação resulta em uma perda de cerca de 1/3 da geração das células do painel. Mesmo com a eficiente proteção dos diodos, a energia gerada pelas células sombreadas não pode ser recuperada, causando um decréscimo na produção total de energia do painel.

Ainda assim, a presença dos diodos de *bypass* é fundamental para o desempenho geral do sistema fotovoltaico, pois eles evitam danos e superaquecimento nas células sombreadas, além de garantir que a produção de energia se mantenha relativamente estável mesmo sob condições de sombreamento parcial. A eficácia dos diodos permite que o painel solar continue operando de forma eficiente, aproveitando ao máximo a energia disponível e minimizando os efeitos adversos causados pelas áreas sombreadas.

2.7. Inclinação do Módulo Voltaico

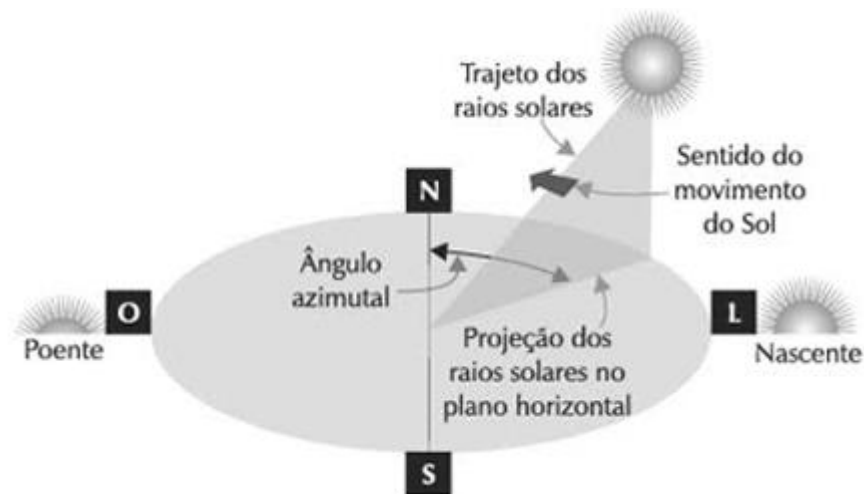
Ao cruzar a atmosfera os raios solares acabam sofrendo um espalhamento também conhecido como difusão. Esse espalhamento por sua vez faz com que os raios sejam desviados em todas as direções, mas, em sua maior parte, eles continuam

com uma trajetória em linha reta. Devido ao formato do nosso planeta e seu comportamento junto ao Sol existem diferentes ângulos de incidência em diferentes partes da Terra, e essa incidência também varia de acordo com os dias e meses do ano. Dessa forma, é necessário que os painéis sejam instalados de maneira a maximizar a absorção da radiação solar direta, permitindo-lhes alcançar um melhor desempenho na captura de energia solar.

2.7.1. Ângulo Azimutal

O ângulo azimutal é o ângulo de orientação dos raios solares com relação ao norte geográfico, como demonstrado na Figura 19.

Figura 19 – Ângulo Azimutal.

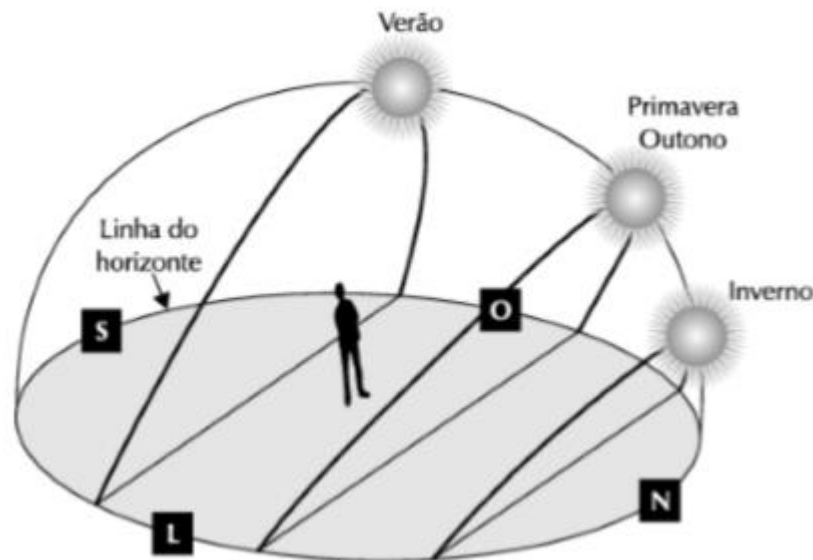


Fonte: (VILLALVA, 2012)

O ângulo azimutal é um dos fatores que se deve levar em consideração no momento da instalação dos painéis. Normalmente os painéis que são instalados no hemisfério sul devem ser instalados apontados para o norte geográfico. Em locais acima da linha do equador os painéis devem apontar para o sul geográfico, entretanto, os telhados das casas que apresentam o ângulo de inclinação azimutal com um desvio ou para o norte-oeste ou o norte-leste, apresentam desvios azimutais que afetarão a capacidade de produção de energia do sistema.

Além disso, a altura do Sol também é alterada durante o ano, devido a existência da declinação do ângulo solar. Essa diferença é ilustrada na Figura 21.

Figura 21 – Diferente trajetória do movimento aparente do Sol ao longo do ano.



Fonte: (VILLALVA, 2012).

Dessa forma, todos esses fatores devem ser levados em consideração para a escolha do ângulo de inclinação dos módulos, pois a maioria deles são instalados com um ângulo fixo e devem ser posicionados de maneira que possam captar mais energia solar durante todo o dia independente do período do ano.

2.7.3. Escolha do ângulo de inclinação do módulo solar

Apesar da maioria dos fatores responsáveis pela variação de captação de energia dos módulos ser conhecida, não existe uma maneira exata e eficaz para a escolha do ângulo. No momento, o que existe é um consenso geral para a escolha da posição que o módulo deve ser instalado.

Através da latitude geográfica do local onde será instalado os módulos é possível descobrir qual deve ser seu ângulo de inclinação (α). Esse método é utilizado vastamente por fabricantes de módulos fotovoltaicos. Na Tabela 4 são demonstrados

os diferentes ângulos de inclinação recomendados durante a instalação de acordo com a latitude geográfica do local.

Tabela 4 – Escolha do ângulo de inclinação do módulo.

Latitude geográfica do local	Ângulo de inclinação recomendado
0° a 10°	$\alpha = 10^\circ$
11° a 20°	$\alpha = \text{latitude}$
21° a 30°	$\alpha = \text{latitude} + 5^\circ$
31° a 40°	$\alpha = \text{latitude} + 10^\circ$
41° ou mais	$\alpha = \text{latitude} + 15^\circ$

Fonte: (RINNOVABILE SISTEMAS DE ENERGIA, 2023)

Como referência, na Tabela 5 são apresentadas as latitudes geográficas das capitais brasileiras que podem ser obtidas de qualquer localidade com o auxílio da ferramenta de mapas do Google (maps.google.com).

Tabela 5 – Latitudes geográficas das capitais Brasileiras.

Capital	UF	Latitude
Aracaju	SE	10° S
Belém	PA	01° S
Belo Horizonte	MG	19° S
Boa Vista	RR	02° N
Brasília	DF	15° S
Campo Grande	MS	20° S
Cuiabá	MT	15° S
Curitiba	PR	25° S
Florianópolis	SC	27° S
Fortaleza	CE	03° S
Goiânia	GO	16° S
João Pessoa	PB	07° S
Macapá	AP	00° S

Maceió	AL	09° S
Manaus	AM	03° S
Natal	RN	05° S
Palmas	TO	10° S
Porto Alegre	RS	30° S
Porto Velho	RO	08° S
Recife	PE	08° S
Rio Branco	AC	09° S
Rio de Janeiro	RJ	22° S
Salvador	BA	12° S
São Luís	MA	02° S
São Paulo	SP	23° S
Teresina	PI	05° S
Vitória	ES	20° S

Fonte: (VILLALVA ,2012)

2.8. Arranjo dos Módulos Fotovoltaicos

Existem basicamente três maneiras de fazer a associação dos painéis: associação em série, associação em paralelo e associação mista. Quando feita de maneira correta e bem estruturada a associação garante o funcionamento correto e permite a geração mais eficiente dos painéis além de garantir uma melhor vida útil de todo o sistema.

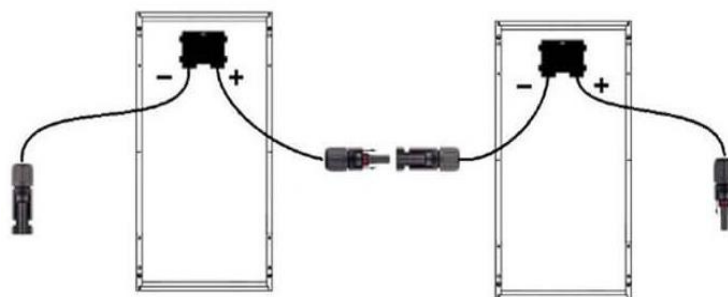
Os painéis fotovoltaicos, como dito anteriormente, são formados por células fotovoltaicas e todas elas são ligadas em série dentro do painel. Cada uma das células tem uma pequena tensão, que quando associadas em série, produzem uma tensão final característica do módulo como um todo.

Para conseguir suprir a demanda de todo um sistema ou instalação, um único painel não será suficiente, sendo necessário a associação de vários painéis, de forma que o somatório da potência gerada desses painéis possa atender a demanda de consumo energético da residência, comércio ou instalação.

2.8.1. Associação em série

A conexão em série dos painéis é feita por meio dos conectores MC4 Comum. Esses conectores vêm de fábrica fixados nos terminais positivo e negativo do gerador de energia solar. Assim, para realizar a conexão em série entre os painéis, é necessário a ligação do conector macho ao conector fêmea de outro painel como mostra a Figura 22.

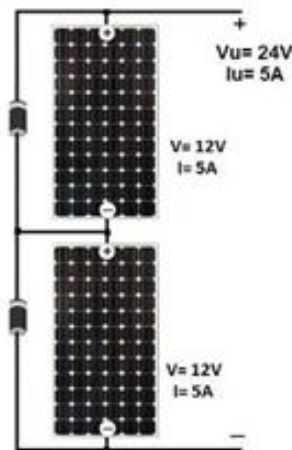
Figura 22 - Conexão série entre painéis por meio do conector MC4 Comum.



Fonte: (ZANI, 2018).

Na associação em série a tensão dos painéis são somadas enquanto a corrente dos painéis permanece a mesma. Na Figura 23 exemplifica-se essa situação, nela os dois painéis com uma tensão de 12 V apresentam uma corrente de 5 A cada um. Após a associação em série a tensão resultante é de 24 V e sua corrente permanece de 5 A na saída da associação.

Figura 23 – ligação série entre 2 painéis de 12V e 5A.



Fonte: adaptado de (MPPTSolar, 2011).

2.8.2. Associação em Paralelo

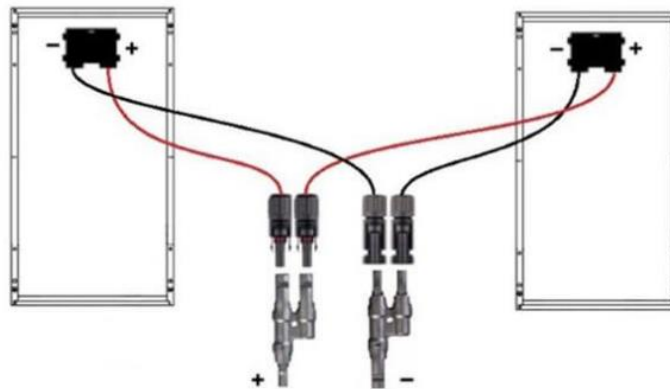
A conexão em paralelo dos painéis é feita por meio de conectores MC4 Multibranch. Diferente do conector MC4 comum esse conector não vem de fábrica junto com o painel fotovoltaico. Na Figura 24 mostra-se o conector utilizado para as ligações em paralelo e na Figura 25 ilustra-se a conexão feita entre os painéis utilizando esse conector.

Figura 24 – Conector MC4 Multibranch.



Fonte: (ZANI, 2018).

Figura 25 – Conexão paralela por meio do conector MC4 Multibranch.



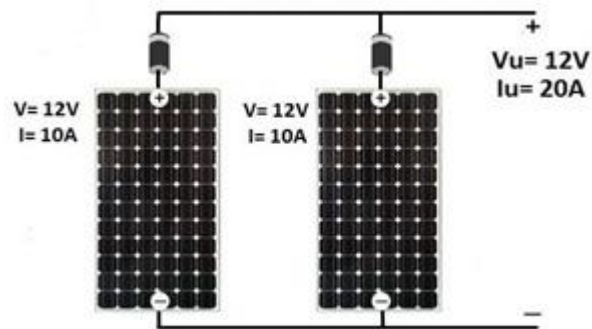
Fonte: (ZANI, 2018).

Ao contrário da associação em série, na qual a tensão se soma enquanto a corrente permanece constante, a associação em paralelo apresenta um comportamento elétrico diferente. Nesse tipo de configuração ocorre um somatório dos valores de corrente, enquanto a tensão dos painéis permanece a mesma. Por exemplo, se dois painéis de 12 V e 10 A cada forem associados em paralelo, o resultado na saída dos conectores será uma tensão de 12 V e uma corrente de 20 A, como ilustrado na Figura 26.

Essa configuração em paralelo é frequentemente utilizada para aumentar a capacidade de corrente disponível no circuito, o que é especialmente útil quando se deseja alimentar cargas que requerem uma corrente maior do que a fornecida por um único painel. A associação em paralelo também proporciona maior flexibilidade no dimensionamento do sistema, permitindo a adição de mais painéis conforme a

necessidade de aumento da corrente, mantendo a tensão de saída constante. No entanto, é importante considerar as especificações técnicas dos painéis e garantir que eles sejam compatíveis ao serem conectados em paralelo para obter um funcionamento adequado e eficiente do sistema.

Figura 26 – Ligação paralela entre 2 painéis de 12 V e 10 A.

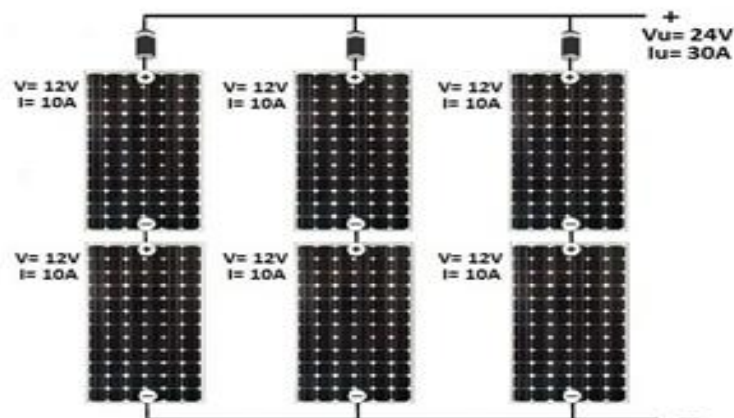


Fonte: adaptado de (MPPTSolar, 2011).

2.8.3. Associação Mista

A associação mista é caracterizada pela utilização das duas formas de conexão dos painéis no mesmo circuito. A Figura 27 exemplifica a associação mista de seis painéis de 12 V e 10 A cada. Dessa forma, a saída do circuito apresenta uma tensão de 24 V e 30 A.

Figura 27 – Ligação mista entre 6 painéis de 12 V e 10 A.



Fonte: adaptado de (MPPTSolar, 2011).

Vale ressaltar que é recomendado a utilização de módulos de mesma potência e do mesmo fabricante. Isso garante uma maior estabilidade do sistema para os painéis, e também para os demais componentes do sistema.

2.9. Inversores de frequência

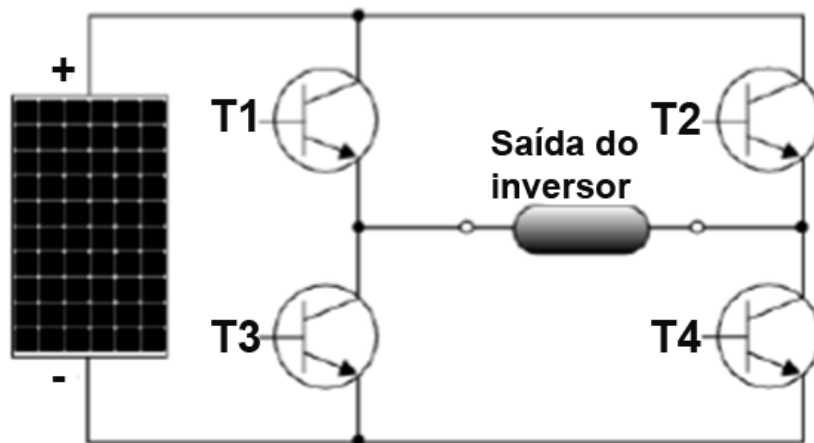
Os módulos fotovoltaicos geram energia no regime permanente, portanto, é necessário que essa energia seja transformada em corrente alternada para ser utilizada e ligada a rede de distribuição no caso de sistemas On-grid. O principal responsável por essa função é o inversor de frequência utilizado para fazer a conversão com a melhor eficiência possível, evitando assim a perda da energia produzida e aproveitando a máxima potência dos módulos. Outra função importante é a proteção do sistema e gerenciamento de todo o sistema fotovoltaico, protegendo as placas e as baterias em casos de sistemas isolados.

O inversor deve ser escolhido adequadamente para cada caso, considerando o tamanho do sistema e da quantidade de componentes. A maioria dos aparelhos de uma residência são feitos para trabalhar na tensão de 127 V ou 220 V e com frequência de 60 Hz.

2.9.1. Princípio de Funcionamento

A Figura 28 mostra o circuito eletrônico base de funcionamento do inversor. Nele quatro transistores, chamados de T1, T2, T3 e T4, são abertos ou fechados para permitir a transferência da corrente da fonte de tensão contínua e a tensão para os terminais de saída do inversor. Os transistores funcionam como chaves eletrônicas que podem ou não permitir a passagem de corrente elétrica dependendo se está no estado ligado ou desligado.

Figura 28 – Circuito eletrônico básico do inversor CC-CA.

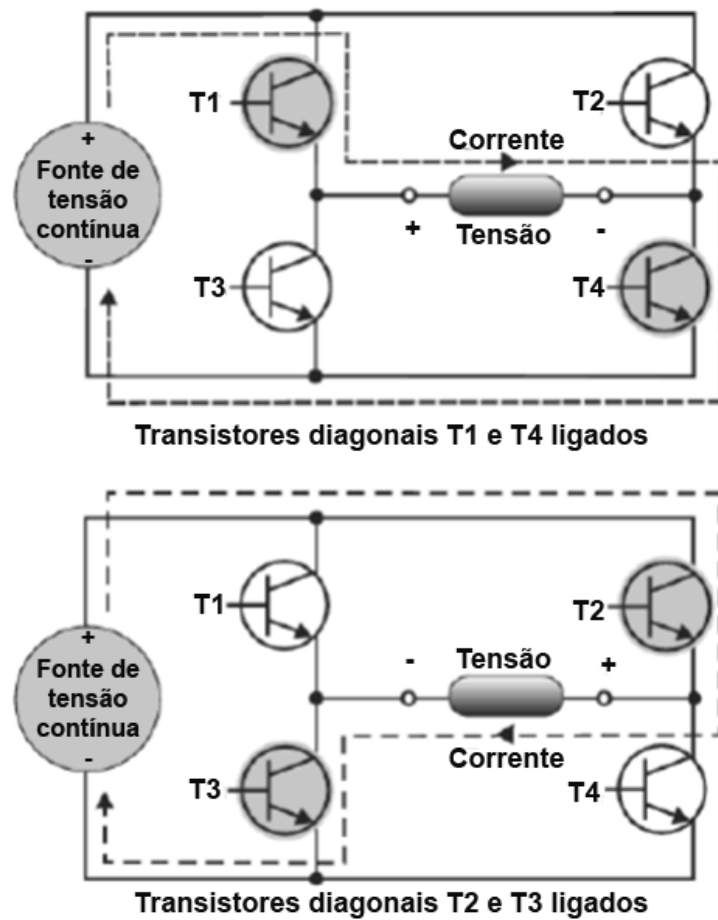


Fonte: (VILLALVA, 2012)

No circuito, o módulo fotovoltaico desempenha o papel de fonte de tensão contínua e está conectado aos transistores. O processo de inversão de corrente é realizado através da operação sequencial dos transistores T1, T2, T3 e T4. Primeiramente, os transistores T1 e T4 são ligados, permitindo a passagem da corrente, enquanto T3 e T2 são desligados, interrompendo a passagem da corrente. Em seguida, ocorre a mudança de estado, onde T1 e T4 são desligados e T3 e T2 são ligados, permitindo que a corrente flua no sentido oposto. Esse processo resulta em uma tensão invertida, porém de mesma corrente, na saída do inversor, conforme mostrado na Figura 29.

Esse mecanismo de inversão de corrente é fundamental para a conversão da energia contínua fornecida pelo módulo fotovoltaico em uma forma de energia alternada, pronta para ser utilizada em sistemas de alimentação elétrica. A operação cuidadosamente coordenada dos transistores permite a criação de uma onda alternada que se adequa aos padrões de energia elétrica usados em residências e indústrias.

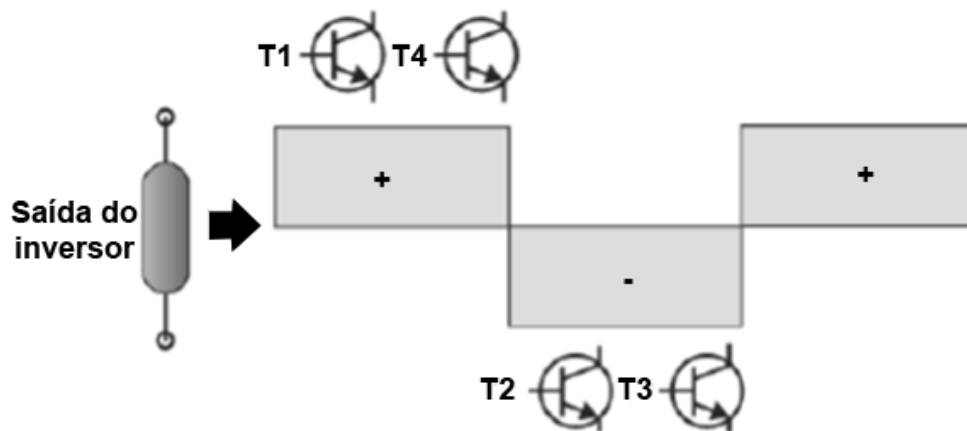
Figura 29 – Funcionamento do inversor CC-CA.



Fonte: (VILLALVA, 2012)

O acionamento dos transistores é feito alternadamente com uma frequência fixa, obtendo assim uma onda quadrada de tensão alternada como pode ser observado na Figura 30. Os inversores comerciais são mais complexos e apresentam um maior número de componentes eletrônicos para um melhor resultado na forma de onda, porém o princípio de funcionamento é o mesmo.

Figura 30 – Tensão alternada produzida na saída do inversor CC-CA.



Fonte: (VILLALVA, 2012)

2.9.2. Inversores Isolados

Existem alguns fatores que devem ser analisados quando se trata de inversores isolados. A geração, armazenamento e disponibilização da eletricidade no sistema fotovoltaico é sempre em corrente contínua. Para utilizar a energia gerada em aparelhos de uma residência ou outra instalação que utilizam a energia em corrente alternada é necessário um conversor para realizar essa conversão de corrente contínua que normalmente deve estar entre tensões de 12 a 48 V, e converte em corrente alternada em tensões de 127, 220 ou 240 V.

Em sistemas fotovoltaicos autônomos ou sistemas isolados os inversores são conectados diretamente nas baterias. Desde que se possua um sistema de conexão de baixa tensão (no caso as baterias) os inversores serão monofásicos geralmente com tensão de 110 até 127 V e com frequência de 60 Hz. A tensão de entrada dos inversores se dá em torno de 12 a 48 V, mas com uma grande variedade de potências com uma faixa que se dá entre 500 W até 5 kW.

Os inversores vão influenciar diretamente na tensão nominal dos sistemas. Portanto, é necessário que a escolha do inversor seja feita de acordo com os arranjos dos painéis e proporcional à potência da instalação. A Equação (4) serve para encontrar o valor da potência nominal do inversor com base nas potências das cargas da instalação.

$$P_l = \sum W_{AC} \cdot F_s \quad (4)$$

Onde na equação cada item representa o seguinte:

- P_l = Potência Nominal do inversor.
- W_{AC} = Potência das cargas CA do sistema.
- F_s = Fator de Segurança.

Porém, mesmo os sistemas residenciais podem se beneficiar do uso de mais de um inversor diluindo as cargas de acordo com os equipamentos ou de acordo com o período de uso. Por exemplo, em uma residência podem ser utilizados três inversores para a conversão de corrente. Neste caso, todos os circuitos de iluminação da residência serão concentrados em um único inversor de menor capacidade, enquanto que os aparelhos eletrônicos como televisão, rádios, *home theater* são ligados em outro inversor, e os equipamentos eletrônicos maiores com uma maior demanda como geladeira serão conectados em um inversor mais robusto.

Assim é possível segregar a instalação fazendo com que em alguns casos seja mais econômico conseguir inversores com potências menores do que um único inversor capaz de atender toda a demanda da casa. Esse arranjo permite mais segurança pois torna o sistema mais redundante já que em casos onde se tem apenas um inversor para toda a instalação, e caso ocorra o mal funcionamento do inversor, todos os equipamentos ficam sem energia. Enquanto um sistema com mais inversores apenas os equipamentos dependentes daquele inversor defeituoso ficam desenergizados.

Ao se fazer a escolha do inversor é importante buscar características desejáveis como:

- Boa eficiência na conversão elétrica;
- Alta capacidade de sobrecarga;
- Tolerância para flutuações de tensão das baterias;
- Baixo autoconsumo;
- Proteção contra curto-circuito na saída CA;

- Alta proteção eletromagnética;
- Baixa distorção harmônica;
- Proteção contra surtos;

2.9.3. Inversores Conectados

Os inversores são conectados à rede de distribuição local da concessionária. Isso faz com que a saída do sistema seja sincronizada de maneira eficaz e segura. Assim, é possível injetar a potência gerada pelo sistema fotovoltaico na rede para que outros consumidores possam também fazer uso dela.

Nos casos de inversores para sistemas *On-grid* a instalação não está necessariamente consumindo a energia produzida pelos painéis, mas sim a energia que vem da concessionária, por esse motivo deve existir um medidor de energia bilateral para que se possa fazer o abatimento da fatura entre energia consumida e energia gerada mensalmente.

Para inversores de potência de até 10 kW é obrigatório que eles tenham o registro no Inmetro caso contrário não é possível a sua utilização, nem sua homologação. Em casos de inversores maiores que 10 kW é necessário que se tenha um certificado de qualidade emitido por qualquer outro laboratório credenciado, não necessariamente o Inmetro (VILLALVA, 2020)

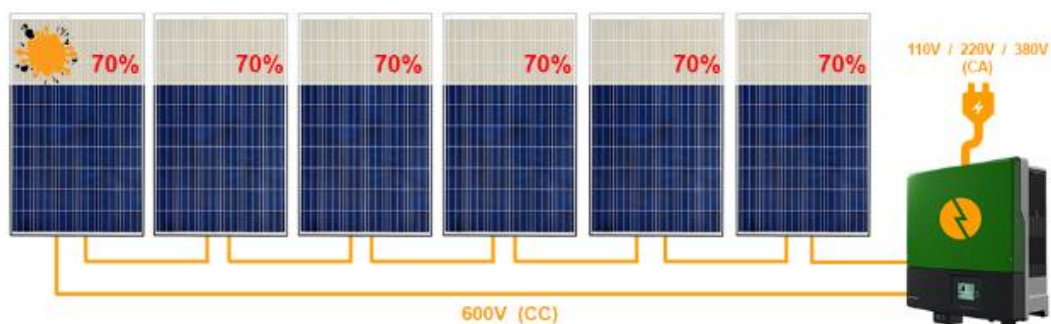
O teste mais importante para a utilização desse tipo de inversor é o teste de anti-ilhamento. Nesse teste o inversor deve ser capaz de distinguir a presença ou não de energia proveniente da concessionária. Pois em casos de manutenção da rede elétrica a concessionária interrompe a distribuição de energia no local para que o eletricitista possa realizar a manutenção. Portanto o inversor deve distinguir que não haverá mais uma energia fornecida pela concessionária naquele momento. Posteriormente, será realizado o corte automático para que a geração dos painéis não interfira na rede e não gere risco de vida para esse operador, e ou até mesmo aos outros eletrodomésticos da vizinhança uma vez que o próprio operador pode gerar um curto circuito em diferentes situações.

2.9.4. Microinversores

Os microinversores são equipamentos que vêm revolucionando o mercado de energia, pois possibilitam maior aproveitamento da instalação e maior ganho de eficiência. Esses equipamentos são conhecidos como MLPE (*Module Level Power Electronics*) ou Eletrônicos de Potência a Nível de Módulo. Trata-se de pequenos módulos que compõe os sistemas de potência e sistemas de geração. Atualmente, os sistemas fotovoltaicos MLPE são representados principalmente pelos otimizadores de potência e microinversores (KOURO, 2015).

Sua principal vantagem se dá no seguinte caso: considere uma matriz de 6 painéis solares ligados em série a um inversor convencional, porém, um dos painéis está parcialmente coberto ou sombreado fazendo com que ocorra uma perda de 30% na geração desse painel. Entretanto, como todos os painéis estão conectados em série, automaticamente a produção de todos esses painéis também é reduzida em 30%, ou seja, toda a geração do sistema é prejudicada em decorrência de apenas um único painel. A Figura 31 ilustra essa situação (PORTAL SOLAR, 2021).

Figura 31 – Exemplo de uma matriz ligada em um único inversor.



Fonte: (Portal Solar, 2021).

No caso de cada um dos painéis dessa matriz estiver ligado ao seu próprio microinversor apenas o painel sombreado sofrerá a perda na geração, enquanto os demais ainda são capazes de gerar 100% de sua potência. A Figura 32 exemplifica essa situação.

Figura 32 – Exemplo de uma matriz ligada com microinversores.



Fonte: (Portal Solar, 2021).

Esse tipo de instalação serve para melhorar a redundância no sistema uma vez que se um dos inversores é danificado o sistema ainda consegue operar parcialmente, diferentemente do sistema com um único inversor onde todo o sistema é prejudicado. Outra vantagem dessa instalação é que por meio das interfaces de monitoramento a identificação de problemas em um parque de geração de energia é facilitada, já que é possível identificar a geração individual de cada um dos painéis. Por fim, outra vantagem é que eles possibilitam expansão do projeto aos poucos, já que não precisa de um número mínimo de módulos para seu funcionamento como os inversores de string.

Os microinversores são recomendados para as seguintes situações:

- Quando o local de instalação tem muito sombreamento;
- Quando existe a necessidade de utilizar painéis em diferentes orientações;
- Quando a instalação do sistema for menor que 1,5 kWp;
- Quando existe pretensão de escalar o sistema aos poucos.

2.10. String Box de Sistemas Fotovoltaicos

A *string box* se trata de um componente de proteção do sistema fotovoltaico, e consiste em um painel conjunto com os dispositivos elétricos de proteção e seccionamento. As *stringboxes* são instaladas na entrada e na saída do sistema, sendo que na entrada deve haver uma string box do tipo CC e na saída sempre uma string box do tipo CA para a proteção do inversor.

2.10.1. String Box CC

As *stringboxes* CC são determinadas de acordo com alguns parâmetros de dimensionamento do sistema. Como, por exemplo, a tensão de entrada, corrente de circulação dos módulos, o modelo do inversor e quantidade de entradas que serão utilizadas.

As conexões do painel solar até a string box CC é feita por meio de cabos especiais. Esses cabos são específicos para esse tipo de aplicação, uma vez que normalmente os painéis são instalados em telhados e existe um trecho exposto até se chegar até a string box. É necessário que essas conexões apresentem algumas características como resistência ao Sol e maior capacidade de tensão pois chegam até 1.800 V de tensão enquanto em cabos comuns a capacidade pode chegar a 750 V. Esses cabos também apresentam maior faixa de funcionamento em altas temperaturas e proteção contra raios UV. Além disso, no caso de incêndio os cabos solares não emitem gás tóxico e tem um melhor encordoamento do que os cabos comuns, permitindo melhor adaptação às passagens do cabo.

Por fim, no caso de exposição dos cabos os seus fios são estanhados prevenindo assim sua oxidação. A única desvantagem desse tipo de cabo é com relação ao seu custo, uma vez que tem seu preço elevado quando comparado com os demais cabos. Porém, é necessário esse tipo de cabo pelo menos no trecho que conecta os painéis até a *string box* para garantir a segurança tanto do sistema quanto das pessoas.

2.10.2. String Box CA

Similar às *stringboxes* CC, as *stringboxes* CA também apresentam algumas variáveis de dimensionamento que devem ser levadas em consideração ao realizar a sua escolha. Entre elas estão a potência de saída, quantidade de inversores, tensão de saída e tipo de rede elétrica (monofásica, bifásica ou trifásica). A conexão da parte CA pode ser feita por meio de cabos convencionais CA com isolamento de PVC sem maiores problemas, uma vez que os inversores estão localizados em locais abrigados longe da exposição ao tempo ou ao Sol.

2.11. Dispositivo de Proteção contra Surto (DPS)

Os surtos elétricos podem ocorrer em um sistema por diferentes razões. Seja por descargas elétricas provenientes de raios na rede ou entorno da instalação, ou até mesmo por manobras realizadas pela concessionária nas redes de distribuição local. O sistema fotovoltaico assim como os demais eletrodomésticos de uma residência não está isento desse risco e, portanto, é importante proteger não só pela robustez, mas também pela proteção do investimento em decorrência do alto custo do sistema fotovoltaico.

Os surtos elétricos são ondas transitórias de tensão ou de potência que podem variar em grande intensidade em um curto período de tempo e se propagam ao longo das redes de distribuição causando danos nas redes de distribuição e nas instalações elétricas dentro das residências, fábricas ou empresas.

Esses surtos podem ser causados por:

- Descargas atmosféricas.
- Manobras de rede.
- Partida brusca de máquinas de grande porte.

As descargas atmosféricas são as formas mais comuns de causar um surto em rede e podem ocorrer de maneira direta ou indireta. A descarga direta ocorre quando o raio cai diretamente sobre uma instalação elétrica enquanto a descarga indireta é caracterizada pelos raios que caem nas proximidades da instalação. Porém, mesmo distante esse raio promove o surgimento de um campo eletromagnético que induz uma energia nas instalações adjacentes podendo gerar surtos ou descargas indesejáveis que podem danificar outros equipamentos.

Nos casos de manobras de rede pode vir ocorrer em casos de uma concessionária de energia pode vir a fazer um chaveamento ou manobras de rede. Portanto, acaba desligando parte do sistema e quando é religado ou reintegrado a rede esse chaveamento no momento da religação do sistema pode vir a causar pequenos surtos de tensão momentâneos que podem causar danos ou componentes do sistema.

Por fim no caso de partidas bruscas de motores ou máquinas de grande porte, ocorre durante a ligação desses motores que podem vir a gerar essas sobretensões

transitórias que são também por um curto espaço de tempo, mas que também podem danificar outros equipamentos. Isso não ocorre somente em grandes indústrias, mas pode ocorrer mesmo em áreas residenciais com o uso de máquinas indutivas como máquinas de lavar, ar-condicionado e até elevadores de prédios residenciais ou comerciais.

Existem alguns pontos que devem ser levados em conta ao se fazer a escolha do DPS. São eles a classe, a tensão e a corrente. A classe é dividida em três tipos (classe 1, classe 2 e classe 3). A classe é escolhida de acordo com o local de instalação e com o tempo de resposta após a detecção do surto.

O DPS classe 1 protege o sistema contra efeitos de descargas atmosféricas e normalmente são instalados em sistemas que já apresentam sistemas de proteção contra descargas elétricas, também conhecido como SPDA. São testados com uma corrente de forma de onda com um período de atuação de 10 a 350 μ s (FERGÜTZ, 2019).

O DPS classe 2 protege o sistema contra efeitos indiretos causados pelas descargas atmosféricas e são testados com um tempo de resposta que se dá entre 8 e 20 μ s de atuação. Ou seja, é um equipamento mais utilizado para instalação de uma residência que não possui o sistema de SPDA (FERGÜTZ, 2019).

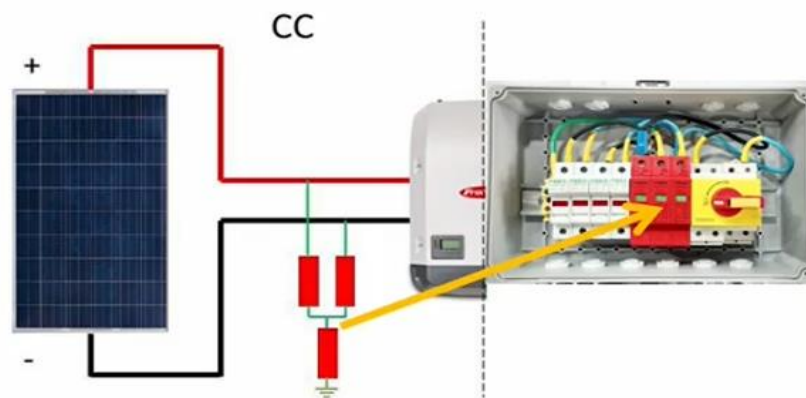
O DPS classe 3 é um equipamento que possui uma proteção mais refinada e pode ser utilizado para proteger equipamentos específicos como um televisor ou computador. Possui uma atuação motorizada mais afinada e possui os dois tempos de resposta tanto de 12 a 50 μ s e um segundo modo de operação de 8 a 20 μ s (FERGÜTZ, 2019).

O DPS também deve ser definido pelas suas características elétricas como tensão e corrente de descarga. Com relação a tensão é importante a escolha com base na tensão nominal, tensão máxima de operação e tensão residual. A tensão nominal nada mais é do que a tensão para o funcionamento correto do DPS. A Tensão máxima residual se trata da máxima tensão que o dispositivo suporta antes de entrar em operação normalmente é 10% maior que sua tensão nominal. E a tensão residual é o valor de tensão que permanece nos terminais do DPS mesmo durante sua operação, ou seja, quanto menor esse valor melhor a qualidade do equipamento.

Por fim, com relação a corrente deve se atentar no valor da corrente nominal que similar a tensão nominal é o valor da corrente de funcionamento correto do equipamento. Outro valor de corrente é a corrente máxima, é valor da corrente que DPS vai atuar após sua detecção para a proteção dos equipamentos. Mesmo que leve a degradação do próprio dispositivo de proteção.

No caso de sistemas fotovoltaicos deve-se utilizar dois tipos de DPS. O DPS de corrente contínua e o DPS de corrente alternada. O DPS de corrente contínua é utilizado para proteger a entrada do inversor que está em corrente contínua e também serve como proteção das strings dos painéis como mostrado na Figura 33.

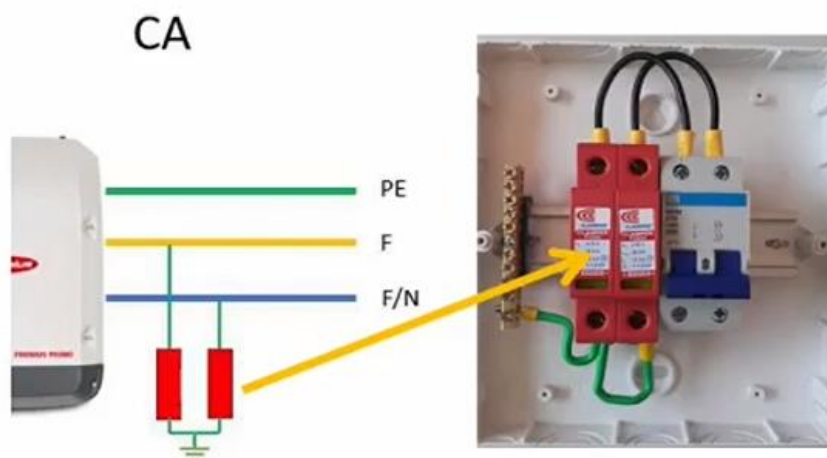
Figura 33 – Exemplo de ligação do DPS-CC na entrada do inversor.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para o DPS de corrente alternada este é ligado na saída do inversor para proteção do próprio inversor e vai estar ligado nos conectores de fase e neutro deste inversor, como ilustrado na Figura 34.

Figura 34 – Exemplo de ligação do DPS-CA na saída do inversor.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

2.12. Componentes de proteção

Assim como qualquer equipamento eletrônico tanto residencial como industrial é necessário que haja a devida proteção desse sistema. Isso não é diferente para o sistema fotovoltaico uma vez que a devida montagem desses componentes no sistema garante a tanto a proteção das pessoas como a proteção do sistema garantindo assim seu funcionamento como uma maior garantia de proteção sobre o investimento. Os principais e mais importantes componentes de proteção são os disjuntores, as chaves seccionadoras e os fusíveis de proteção.

A funcionalidade do disjuntor é proteger o circuito de anomalias elétricas, seja por sobrecarga ou curto-circuito, no caso de disjuntores de corrente alternada existem diferentes modelos que se apresentam na forma monopolar, bipolar, tripolar ou tetrapolar.

A chave seccionadora é um dispositivo normalmente conectado na seção de corrente contínua do sistema fotovoltaico e sua principal função é o seccionamento seguro do sistema, para que não ocorra risco de incêndio causado por faíscas derivadas de arcos fotovoltaicos e nem riscos de choques elétricos ao operador do sistema. Sempre se deve fazer o uso das chaves seccionadoras junto dos disjuntores uma vez que eles não são dispositivos de manobras e sim dispositivos de proteção.

Hoje em dia é comum encontrar inversores já com a chave seccionadora integrada ao seu funcionamento o que torna o uso da chave na string box dispensável.

No caso dos fusíveis, esses também são considerados dispositivos de proteção como os disjuntores e não dispositivos de manobra como as chaves seccionadoras. Sua principal função é proteger o sistema de sobrecorrentes e de curto-circuito. Para sistemas fotovoltaicos é indicado o uso de fusíveis do tipo GPV. Esses fusíveis têm a capacidade de operar em corrente contínua e sua principal função se dá com relação a corrente reversa. A corrente reversa é a corrente que circula no sentido contrário ao sentido normal do sistema, ou seja, ao invés da corrente sair dos módulos fotovoltaicos essa corrente vai em direção a eles. De fábrica, os painéis já apresentam uma certa tolerância a esse tipo de corrente (no máximo entre 15 e 20 A) porém caso essa tolerância seja excedida por um longo período de tempo isso pode levar a danificação completa do painel.

2.13. Estruturas de fixação

As estruturas de fixação do sistema solar representam a menor parte do investimento quando comparado aos demais itens, mas, são responsáveis por garantir a segurança da parte mecânica da instalação e viabilizam a instalação dos painéis em diferentes cenários.

Assim como os painéis as estruturas metálicas estão expostas ao tempo, logo a escolha desses materiais não deve ser negligenciada uma vez que estarão sobre constantes exposição ao Sol, chuva, vento e em casos extremos granizo.

O melhor local para instalação dos painéis são os telhados planos já que neles existe a facilidade na escolha do ângulo de inclinação e do posicionamento dos painéis para que a geração de energia seja privilegiada. Ainda em casos de telhados planos existe a possibilidade de não ser possível a furação do telhado ou laje para a fixação das estruturas metálicas.

Uma das formas de contornar essa situação é a utilização de bases de concreto, porém, é necessário um telhado robusto para aguentar essa nova carga uma vez que as bases de concreto possuem um peso elevado.

No caso de telhados inclinados a fixação e posição dos painéis devem obedecer necessariamente à orientação e a angulação do telhado. A vantagem é que terá um aproveitamento da própria estrutura do telhado para fixação dos painéis, porém, não é garantido o maior aproveitamento energético possível já que haverá algumas perdas pelo posicionamento dos painéis.

2.13.1. Estruturas de Suporte

O principal alicerce da estrutura de fixação nos telhados são os suportes e existem diferentes formatos para diferentes tipos de telhas. Um dos principais tipos de suportes para telhados de cerâmica fixados no caibro são os suportes em formato de Z.

Para telhas de fibrocimento é utilizado um suporte com um parafuso maior com um revestimento de borracha na sua base de contato para suportar o atrito entre os painéis e as telhas de fibrocimento.

Por fim, o suporte para telhas metálicas onduladas normalmente é feito em L com um parafuso que transpassa a telha e com uma borracha de proteção para evitar o atrito das telhas com o fixador.

2.13.2. Trilhos

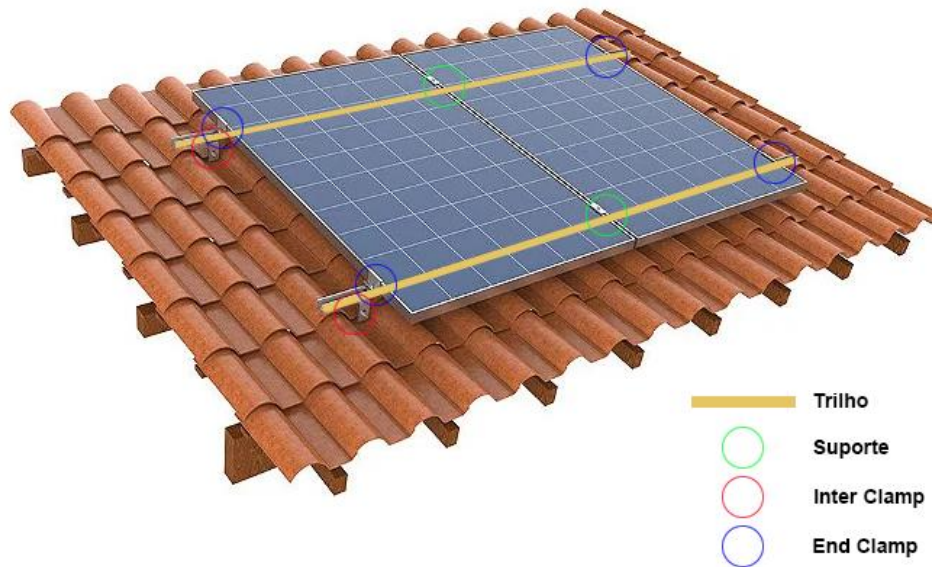
Os trilhos são estruturas metálicas que são fixadas no suporte com a função de servir como base dos painéis fotovoltaicos. Eles podem ser emendados com diferentes tipos de conexões para atender ao layout do telhado e dos painéis.

Os painéis são fixados por meio de presilhas ou também conhecidas como *Clamps*. Podem ser divididas em *End Clamps* ou presilhas de extremidades que são utilizadas em qualquer extremidade tanto superior como inferior ou nas laterais. E as *Inter Clamps* ou presilhas de junção, são as presilhas que são utilizadas entre os painéis e todas essas presilhas são fixadas por meio de parafusos no trilho.

A Figura 35 mostra um exemplo de como é a disposição desses elementos sobre um telhado de cerâmica. Vale lembrar que no caso de estruturas metálicas é muito importante fazer a escolha correta do tipo e material a ser escolhido para evitar

por exemplo a corrosão galvânica que é um processo no qual um metal acaba corroendo o outro.

Figura 35 – Estrutura de Fixação para Painel Solar.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

2.13.3. Estrutura no solo

Esse tipo de estrutura é mais comum ser utilizado em usinas de geração e assim como no caso de telhados planos, nesse tipo de disposição permite uma maior liberdade na escolha do ângulo e do posicionamento dos painéis. Nas usinas a distribuição dos painéis é construída em fileiras de módulos e colocadas uma atrás da outra. Porém, é necessário que seja calculada a distância entre as fileiras para que não haja o sombreamento causado pelos módulos da fileira da frente. Existem duas maneiras de fazer esse cálculo, a primeira é maximizar a eficiência do sistema, evitando o sombreamento entre os painéis, esse método é utilizado quando se possui uma área vasta e sem uma maior preocupação da área ocupada.

Para maximizar a eficiência do sistema evitando o sombreamento usa-se a Equação (5) (VILLALVA, 2012).

$$d = 3,5 \cdot z \quad (5)$$

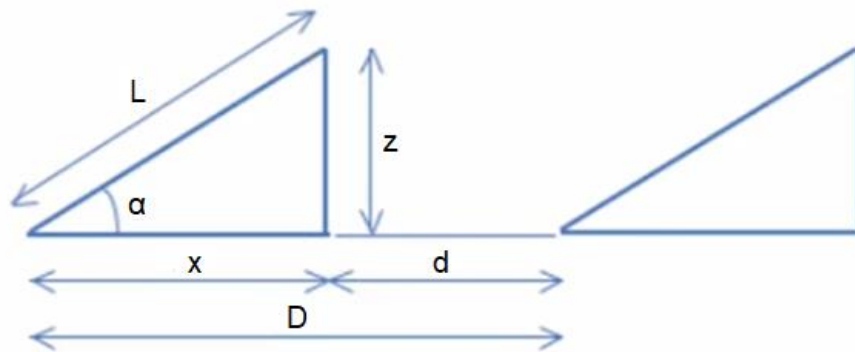
A segunda maximiza o aproveitamento da área, mesmo com alguma perda de eficiência, esse método é utilizado quando a área é limitada mesmo com algumas perdas por sombreamento

Para maximizar o aproveitamento da área mesmo com alguma perda de eficiência usa-se a Equação (6) (VILLALVA ,2012).

$$D = 2,25 \cdot L \quad (6)$$

Utilizando a Figura 36 para facilitar a indicação das medidas para os cálculos das equações.

Figura 36 – Diagrama indicando as Distâncias entre as fileiras dos painéis.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

L = Largura do módulo solar;
 Z = Altura da haste de fixação;
 d = Espaçamento entre fileiras;
 α = Ângulo de inclinação do módulo.

3. PROJETO, MONTAGEM E PERSPECTIVA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Este capítulo aborda as informações necessárias para a realização do projeto fotovoltaico conectado à rede que será utilizado como estudo.

3.1. Componentes e planejamento

Os principais componentes necessários para a instalação e dimensionamento do sistema conectado à rede.

- 1 – Paine Solar;
- 2 – Inversor Interativo;
- 3 – Dispositivo de proteção contra surtos (DPS);
- 4 – Chave Seccionadora ou Disjuntor termomagnético (DC);
- 5 – Fusíveis de efeito retardado ou rápido;
- 6 – Medidor Bidirecional.

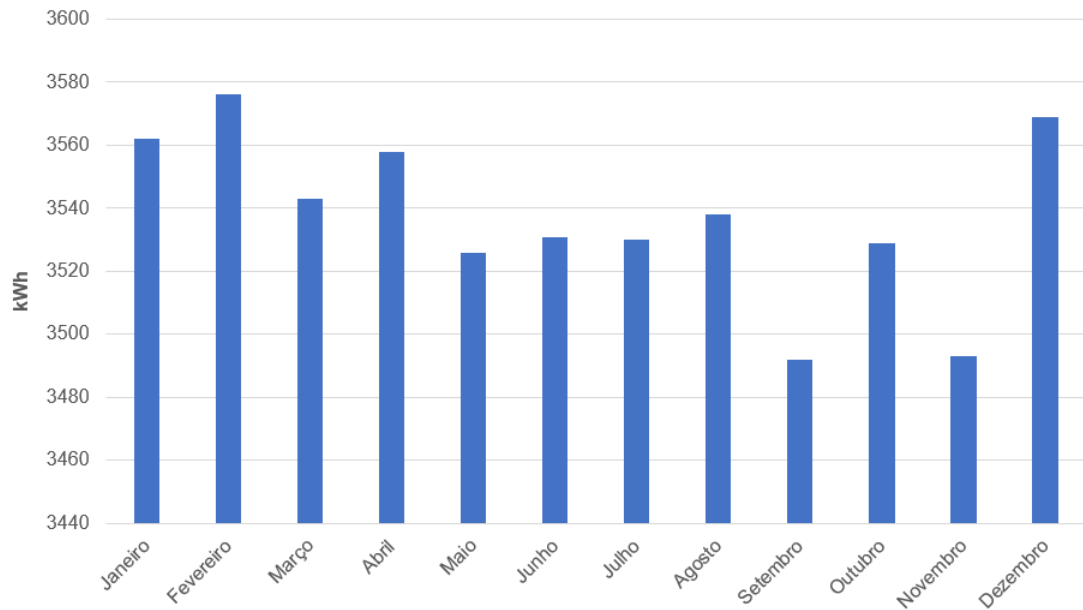
Inicialmente para se realizar o planejamento do projeto é necessário ter em mãos as seguintes informações básicas:

- Incidência de irradiação solar na região;
- Estudos de sombreamento;
- Consumo em (kWh) da instalação;
- Informações técnicas de equipamentos e dispositivos do sistema fotovoltaico;
- Norma técnica ou manual técnico da concessionária de energia local.

Por fim, é importante saber a viabilidade do sistema a ser projetado. Uma vez que esse deve garantir que o sistema será capaz de operar e atender a demanda de produção de energia na área em que será instalado. Já que em edificações mais verticais oferecem um maior desafio devido a restrição do espaço de utilização dos painéis. E sempre garantindo o melhor custo benefício.

Para se obter a média mensal de consumo do estabelecimento foi feita a coleta de dados do consumo mensal no período de um ano, como mostrado na Figura 37.

Figura 37 – Consumo Mensal do Estabelecimento em kWh.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

E com esses dados em mãos é possível montar a Tabela 6 e obter a média que será o valor base para cálculo da quantidade de materiais necessários.

Tabela 6 – Consumo Mensal (kWh).

MÊS	CONSUMO (kWh)
Janeiro	3562
Fevereiro	3576
Março	3543
Abril	3558
Maio	3526
Junho	3531
Julho	3530
Agosto	3538
Setembro	3492
Outubro	3529
Novembro	3493
Dezembro	3569
Consumo Anual Total	42447
MÉDIA	3537,25

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Portanto, com o valor da média mensal consumida calcula-se o EMD que é a Energia Média Diária que nada mais é que a Energia Média Mensal ou EMM dividido pelo número de dias no mês. A Equação (7) calcula o EMD.

$$EMD = \frac{EMM}{30} = \frac{3537,25}{30} = 117,90 \text{ kWh/dia} \quad (7)$$

Esse é o valor que o sistema fotovoltaico deve ser capaz de produzir por dia para que haja o abatimento total da conta de luz.

Para saber qual a quantidade de irradiação solar na cidade utiliza-se a coordenada geografia do local onde será instalado os painéis. Para buscar esses valores pode-se utilizar o banco de dados da CRESESB (Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Brito)

Na Figura 38 indica-se a irradiação solar diária média na cidade de Orlândia no plano horizontal e a Figura 39 indica a comparação da irradiação solar diária média na cidade de Orlândia no plano inclinado com relação ao plano horizontal. Esses dados foram obtidos diretamente desse banco de dados ao utilizar as coordenadas do local de instalação dos painéis: -20.71654 Latitude (Sul) e -47.86220 Longitude (Oeste).

Figura 38 – Irradiação Solar Diária Média no município de Orlândia.

Localidades próximas

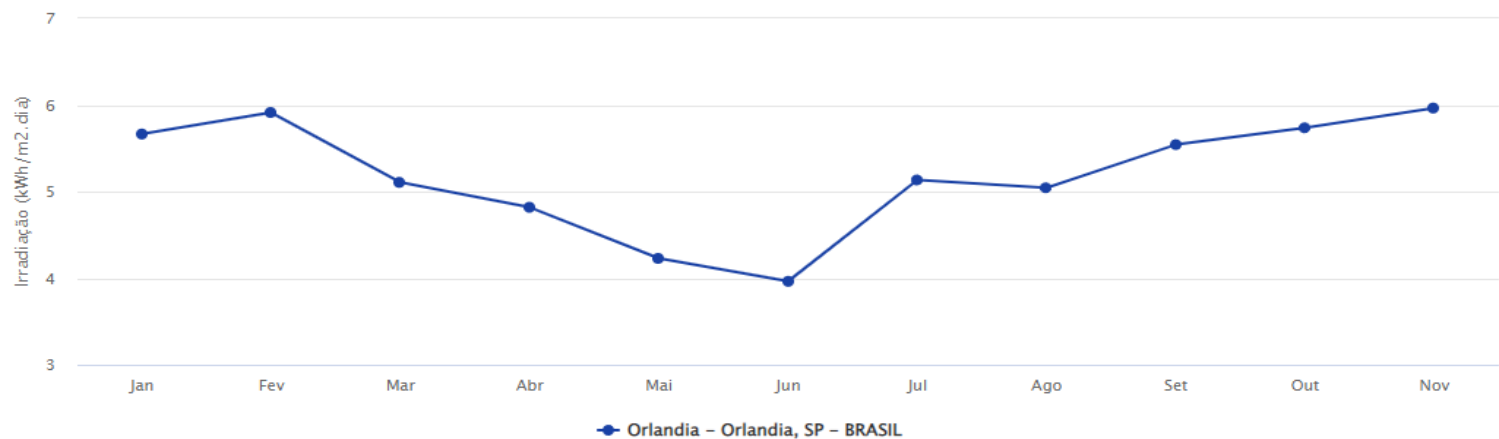
Latitude: 20,71654° S

Longitude: 47,8622° O

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]																
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
☒	Orlândia	Orlândia	SP	BRASIL	20,701° S	47,849° O	2,2	5,66	5,91	5,11	4,82	4,23	3,96	4,20	5,13	5,04	5,54	5,74	5,96	5,11	2,00
☐	Orlândia	Orlândia	SP	BRASIL	20,701° S	47,949° O	9,2	5,74	5,95	5,14	4,85	4,23	3,97	4,18	5,13	5,05	5,52	5,78	6,07	5,13	2,11
☐	Sales Oliveira	Sales Oliveira	SP	BRASIL	20,801° S	47,849° O	9,5	5,69	5,87	5,08	4,81	4,21	3,95	4,18	5,09	5,06	5,54	5,73	5,97	5,10	2,02

Irradiação Solar no Plano Horizontal para Localidades próximas

20,71654° S; 47,8622° O



Highcharts.com

Fonte: (CRESESB, 2023).

Figura 39 – Irradiação Solar Mensal Média em Orlândia com plano inclinado.

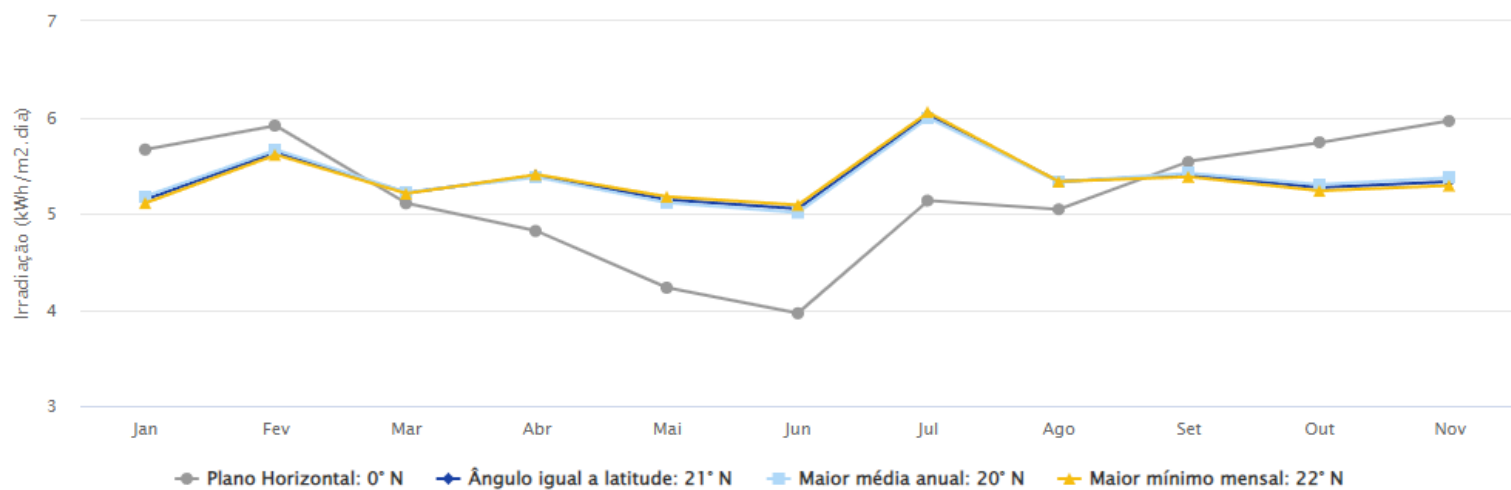
Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Orlândia
Município: Orlândia, SP - BRASIL
Latitude: 20,701° S
Longitude: 47,849° O
Distância do ponto de ref. (20,71654° S; 47,8622° O) :2,2 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	5,66	5,91	5,11	4,82	4,23	3,96	4,20	5,13	5,04	5,54	5,74	5,96	5,11	2,00
✓	Ângulo igual a latitude	21° N	5,14	5,64	5,22	5,39	5,14	5,05	5,27	6,02	5,33	5,40	5,27	5,33	5,35	,97
✓	Maior média anual	20° N	5,18	5,66	5,22	5,38	5,11	5,01	5,23	5,99	5,33	5,42	5,30	5,37	5,35	,99
✓	Maior mínimo mensal	22° N	5,11	5,61	5,21	5,40	5,17	5,09	5,30	6,05	5,33	5,38	5,24	5,29	5,35	,96

Irradiação Solar no Plano Inclinado –Orlândia–Orlândia, SP-BRASIL

20,701° S; 47,849° O



Highcharts.com

Fonte: (CRESESB, 2023).

Pelas figuras pode-se notar que a maior média de irradiação solar é dada por planos inclinados com uma média de irradiação de 5,35 kWh/m².dia. Agora é possível calcular a potência de pico do nosso sistema fotovoltaico pela Equação (8) onde HSP ou Hora Sol pico é o valor médio da irradiação solar obtida pelos gráficos e EMD é a Irradiação Média Diária calculada anteriormente:

$$P_{pico} = \frac{EMD}{HSP} = \frac{117,90}{5,35} = 22,037 \text{ kW/Pico} \quad (8)$$

Com esse valor pode-se calcular o número de módulos (NM) necessários para suprir o sistema. Dividindo o valor da Potência Pico pelo valor da potência dos módulos utilizados já corrigidos pela temperatura e pelo posicionamento angulado dos painéis.

Nesse projeto será utilizado painéis de 410 W de potência com uma perda por temperatura de 0,37 %/°C. A média da temperatura anual na cidade de Orlândia é calculada utilizando dados do site ClimaTempo (Figura 40).

Figura 40 – Temperaturas mínimas e máximas na cidade de Orlândia.

Mês	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Precipitação (mm)
Janeiro	21°	29°	268
Fevereiro	21°	30°	182
Março	20°	29°	166
Abril	19°	29°	70
Maio	16°	27°	50
Junho	15°	26°	27
Julho	15°	27°	19
Agosto	17°	29°	24
Setembro	19°	30°	70
Outubro	20°	31°	130
Novembro	20°	30°	161
Dezembro	21°	29°	258

Fonte: (CLIMA TEMPO, 2022).

A tabela apresenta uma média de temperatura anual de 23,75°C e as perdas no painel devido a temperatura é calculada na Equação (9):

$$Perda\ por\ temp. = 23,75^{\circ}C \cdot \frac{0,37\%}{^{\circ}C} = 8,7875\% \quad (9)$$

Levando em conta que não será possível fazer a instalação de todos os painéis com a melhor angulação uma vez que o telhado é irregular. Será acrescentado uma perda de 6% na potência dos painéis, somando uma perda total de 14,78% na sua geração. Com a Equação (10) calcula-se a potência gerada com as perdas e na Equação (11) o número necessário de módulos para atender essa demanda.

$$\begin{aligned} Pot. com\ perdas &= P_{painel} \cdot 0,85 = 410W \cdot 0,85 \\ Pot. com\ perdas &= 348,5\ W \end{aligned} \quad (10)$$

$$NM = \frac{P_{pico}}{PM} = \frac{22,037kW}{0,3485kW} = 63,23\ módulos \quad (11)$$

Portanto, serão necessários 64 módulos para atender a demanda consumida diariamente.

Para o dimensionamento do inversor deve-se lembrar que existe uma diferença fundamental entre os inversores off-grid e inversores on-grid.

Inversores em sistemas off-grid fornecem tensão elétrica em seus terminais de saída, em regime alternado, senoidal e pura ou onda modificada, enquanto os inversores “on-grid” fornecem tensão elétrica em seus terminais de saída, em regime alternado, senoidal e pura, e **somente operam nas circunstâncias em que estão conectados à rede elétrica** por questões de segurança.

Para se fazer a escolha do inversor, utiliza-se como base a potência pico do sistema que, nesse caso, deve ser de 22,037 kWp. Seria interessante buscar no mercado inversores com essa potência no mínimo ou maior para garantir que o inversor possa trabalhar com folga. Porém não foi possível encontrar um inversor que atendesse essas especificações no momento da compra dos materiais. Foi utilizado o inversor que mais se aproximava desse valor, no caso foi escolhido o inversor de 20,1 k – 380 V da SOLAREEDGE.

Deve-se utilizar otimizadores de potência que irão funcionar como se fossem um microinversor para cada dois painéis assim garantindo que cada *string* de dois painéis seja independente entre si e haja uma menor perda na produção de energia em casos de sombreamento como já foi explicado anteriormente. Como são 64 painéis, será utilizado 32 otimizadores de potência P850 também da SOLAREEDGE ligados em série e, por fim, são conectados ao inversor.

Agora é possível calcular a quantidade mínima e máxima de módulos ligados em **série** em uma mesma string que será ligado ao inversor. Para isso são usadas as fórmulas na Equação (12) e (13):

$$N^{\circ}min = \frac{TN}{TM} = \frac{300V}{39.1V} = 7,67 \cong 8 \text{ módulos} \quad (12)$$

$$N^{\circ}max = \frac{MTO}{TM} = \frac{437V}{39.1V} = 11,17 \cong 11 \text{ módulos} \quad (13)$$

Sendo TN é a tensão nominal do inversor, MTO é a máxima tensão de operação do inversor e TM é a tensão em potência máxima do painel. Similarmente calcula-se a quantidade mínima e máxima de painéis que devem ser ligados em **paralelo** mostrado na Equação (14). Esse inversor, porém, apresenta apenas a corrente máxima de operação em suas entradas.

Cmax = corrente máxima de operação do inversor.

CPm = Corrente em potência máxima do painel.

$$N^{\circ}max = \frac{Cmax}{CPm} = \frac{30,45A}{10,49A} = 2,9 \cong 2 \text{ módulos} \quad (14)$$

É possível planejar o arranjo dos painéis, já sabendo que esse inversor apresenta 4 pares de entradas MC4 para 64 módulos, ou seja, 16 módulos por entrada. Utilizando 8 módulos em série com 2 módulos em paralelo

3.2. Componentes de proteção

Primeiramente calcula-se as proteções do lado CC, mostrado na Equação (15). Para isso utiliza-se a corrente de curto circuito do painel, que no caso é de 11,06 A e multiplica-se pelo fator de 20 % garantindo uma maior segurança para o sistema.

$$C_{fusivel} = 11,06 \cdot 1,2 = 13,272 \cong 13A \quad (15)$$

Como são 4 entradas cada uma com um polo positivo e negativo, serão necessários 8 fusíveis de 13 A.

Para proteção do lado CA utiliza-se a corrente de saída do inversor que no caso é de 30,45 A e multiplica-se esse valor por um fator de 20% como mostrado na Equação (16).

$$C_{disjuntor} = 30,45 \cdot 1,2 = 36,54 \cong 37 A \quad (16)$$

Foi utilizado um disjuntor tripolar de 40 A e um DPS (tripolar + neutro).

3.3. Transformador

Normalmente, para garantir uma conexão adequada entre o sistema de geração e o sistema de distribuição, quando a alimentação da concessionária de energia é de 220 V trifásico e o inversor utilizado no projeto é de 380 V trifásico, seria necessário adquirir um transformador abaixador. A função desse transformador seria reduzir a tensão de entrada de 380 V para a tensão de saída de 220 V, possibilitando assim a compatibilidade entre os dois sistemas. Contudo, o inversor empregado no projeto possui capacidade para realizar essa transformação sem a necessidade do transformador, tornando a compra deste último desnecessária.

3.4. Medidor Bidirecional

O medidor bidirecional é um componente essencial presente nos sistemas On-grid. Em contraste aos medidores convencionais utilizados em residências, esse dispositivo tem a capacidade de registrar tanto o consumo de energia como também

a quantidade de energia injetada na rede. Em outras palavras, é capaz de mensurar a energia gerada pelos painéis solares e direcionada à rede elétrica. Essa energia injetada é convertida em créditos, os quais serão posteriormente descontados da fatura de energia. Geralmente, a instalação desse medidor é realizada pela concessionária de energia, que também assume a responsabilidade em caso de falhas ou mau funcionamento do aparelho.

3.5. Instalação dos painéis.

Neste projeto, os painéis solares da Figura 41 foram instalados diretamente sobre o telhado, sem a necessidade de estruturas de suporte de elevação adicionais. A integração foi feita utilizando apenas as estruturas de fixação adequadas, garantindo segurança e estética. Essa abordagem reduziu custos de instalação, maximizou a exposição solar e contribuiu para um sistema eficiente.

Figura 41 – Instalação dos Painéis sobre telhado inclinado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os painéis solares da Figura 42 foram estrategicamente instalados sobre suportes inclinados, uma vez que esse lado específico do telhado era plano e capaz

de sustentar as estruturas necessárias. Essa decisão foi tomada com base na otimização da captação solar e na maximização da eficiência do sistema.

Ao utilizar suportes inclinados, isso garante que os painéis estejam posicionados de forma ideal para receber a luz solar durante todo o dia. Isso resulta em uma maior exposição aos raios solares, aumentando significativamente a produção de energia ao longo do tempo. Além disso, essa configuração permite que os painéis sejam instalados em ângulos que favoreçam a dissipação da água da chuva e a limpeza natural das superfícies, contribuindo para a manutenção do desempenho do sistema.

Figura 42 – Disposição final dos painéis.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Neste projeto um desafio significativo foi o espaço limitado no telhado para a instalação de painéis solares adicionais. Para superar essa limitação e otimizar a geração de energia, foi desenvolvida uma estrutura metálica personalizada, permitindo a instalação dos 12 painéis extras, conforme mostrado na Figura 43. Com essa solução, alcançou-se um sistema fotovoltaico de alto desempenho, capaz de suprir uma maior demanda de energia e contribuir para um futuro mais sustentável e consciente em relação ao meio ambiente.

Figura 43 – Instalação dos painéis sobre plataforma adicional de placas.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 44, é possível observar o método de ligação dos otimizadores de potência conectados aos painéis solares. É importante ressaltar que esses otimizadores foram instalados em todos os painéis do sistema, e a figura representa apenas um exemplo do procedimento adotado.

A utilização de otimizadores de potência é uma estratégia inteligente para otimizar o desempenho geral do sistema fotovoltaico. Cada otimizador é responsável por maximizar a produção de energia de seu respectivo painel, levando em consideração as particularidades e condições de cada módulo solar.

Essa abordagem de instalação garante uma melhor gestão e controle da energia gerada, tornando o sistema mais eficiente e resiliente diante de variações de sombreamento ou outros fatores que possam afetar o rendimento dos painéis individuais.

Figura 44 – Conexão das placas aos Otimizadores de potência.



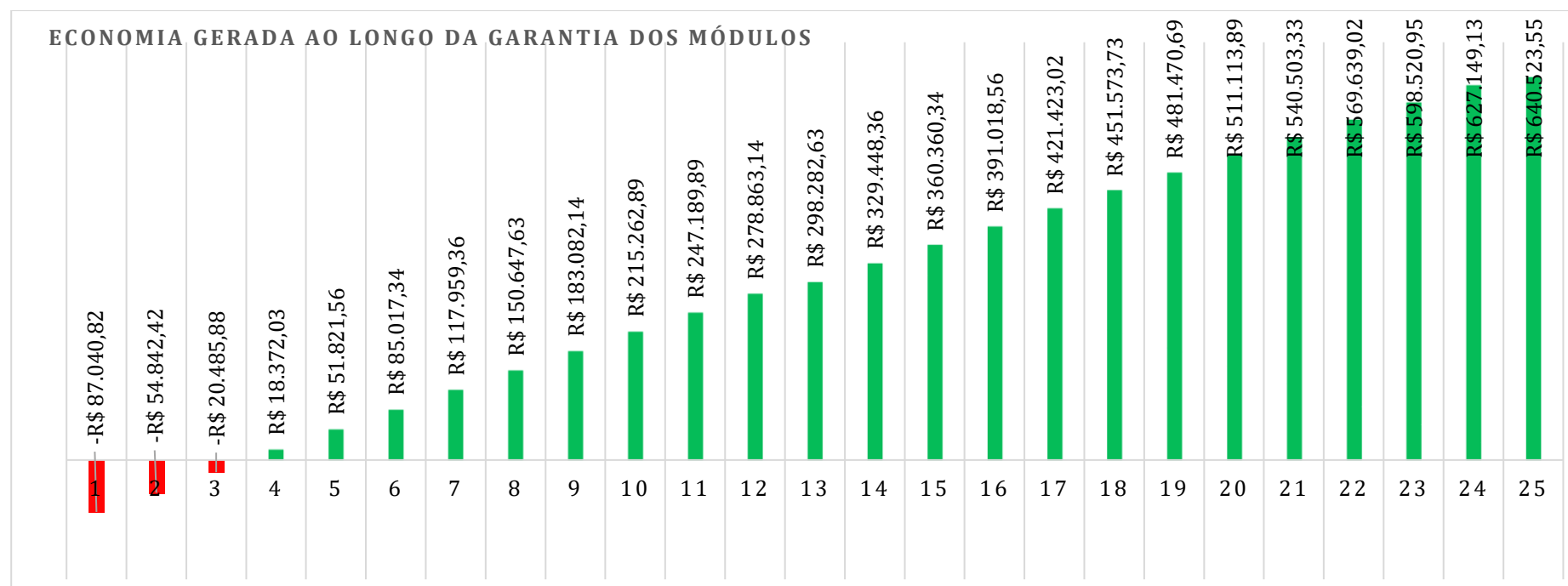
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Através da análise mensal detalhada da geração de energia pelos painéis solares, foram obtidos dados concretos essenciais para a elaboração da Figura 45, a qual exibe o retorno financeiro ao longo do tempo.

Figura 45 — Economia gerada ao longo do tempo.

DADOS DA INSTALAÇÃO		CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA	
Conexão:	Trifásico	Potência:	26,24 kWp
Consumo Médio:	3.538 kWh/mês	Placas Fotovoltaicas:	64 Módulos Canadian 410W
Taxa de Disponibilidade:	100 kWh	Otimizadores Solar Edge:	32 Otimizadores de Potência
Porcentagem abatida na conta:	100%	Inversor Solar Edge:	1 x SE20.1k - 380 V
Consumo Médio/Mês	3.538 kWh / Mês	Produção Média (Ano 1)	42.648 kWh/ Ano
Consumo Médio/ano	42.456 kWh/ Ano	Economia média anual (Ano 1)	R\$ 32.198,40
Tarifa de Energia 2020:	R\$ 0,80/kWh	Área ocupada	160,00 m ²

Garantias:	
Eficiência das Placas:	25 Anos
Otimizadores de Potência:	25 Anos
Inversor Solar Edge	12 Anos



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na representação gráfica exibida na figura 45, delineia-se a trajetória da economia anual gerada por um projeto fotovoltaico ao longo de 25 anos, proporcionando uma visão reveladora do seu desempenho financeiro e impacto ambiental.

O ponto de partida deste projeto, registrado em 2020, demandou um aporte inicial de R\$ 87.040,82. As tarifas de disponibilidade TU e TE, com um custo de 100kWh mensal (dado que se trata de um sistema trifásico), foram elementos cruciais na configuração dos custos operacionais. O dispêndio mensal referente a essas tarifas, componente essencial no panorama financeiro, variou de R\$ 160,00 em 2020 a R\$ 170,00 em 2023, incorporando os ajustes de preços anuais.

O preço inicial do kWh, estabelecido em R\$ 0,80 em 2020, sofreu incrementos nos anos subsequentes, alcançando R\$ 0,86 em 2021, R\$ 0,98 em 2022 e seguido de uma queda em 2023 para R\$ 0,85, mantendo esse valor para os anos subsequentes para elaboração do gráfico.

A produção média anual dos módulos fotovoltaicos foi calculada em 42.648 kWh/ano, equivalente a 3.554 kWh/mês. Em contrapartida, o consumo mensal do estabelecimento atingiu 3.538 kWh/mês ou 42.456 kWh/ano. Vale ressaltar que o desenho do projeto foi concebido com o propósito de alcançar a redução integral na conta de luz.

Anualmente, os painéis solares sofrem uma redução de eficiência de 0,7% na potência de geração. Essa depreciação acumulativa ao longo dos 25 anos resulta em uma diminuição total de 16,8% na capacidade de geração de energia, evidenciando a necessária consideração desse fator ao avaliar a eficácia do sistema ao longo do tempo. Ao término do período estipulado, os painéis solares revelarão uma eficiência notável de 83,2%. Este indicativo sublinha não apenas a durabilidade, mas também a consistência de desempenho ao longo do extenso intervalo temporal.

O ponto de equilíbrio financeiro, onde os ganhos equiparam-se aos custos, é alcançado em 3 anos e 7 meses. Importa destacar que, ao longo das duas décadas e meia, está previsto um custo adicional para manutenção no inversor solar a cada 10 ou 12 anos, assegurando a perpetuidade do desempenho do sistema.

Ao ponderar os custos de manutenção, as flutuações nas tarifas e a perda anual de eficiência dos módulos, a economia total ao final do período de garantia é estimada

em expressivos R\$ 640.523,55. Esta projeção não apenas corrobora a viabilidade econômica do projeto, mas também ressalta a relevância estratégica da energia solar como fonte sustentável e economicamente eficiente. A transição para fontes renováveis representa não apenas um investimento consciente no presente, mas também uma herança duradoura para as gerações vindouras.

Adicionalmente, é pertinente notar que o cálculo dessa economia foi restrito ao valor adicional que seria despendido na conta de luz. A possibilidade de realocar esse montante mensalmente em distintos investimentos, potencialmente amplificando os rendimentos ao longo do tempo, é uma consideração relevante para o proprietário atento às oportunidades financeiras.

4. CONCLUSÃO

Com base nos conhecimentos adquiridos neste trabalho, foi possível realizar um acompanhamento completo da instalação dos painéis solares, utilizando todos os componentes essenciais para o funcionamento eficiente do sistema. Desde os conectores e cabos até os inversores, dispositivos de proteção, estruturas de fixação, string box e medidor bidirecional, todos os elementos foram cuidadosamente selecionados e instalados de acordo com as melhores práticas e normas técnicas.

Esses resultados da economia gerada pelos painéis confirmam a importância e o potencial da energia solar como uma alternativa sustentável e economicamente viável. Através da análise do gráfico da economia gerada ao longo do tempo, fica evidente o impacto positivo tanto para o meio ambiente quanto para o bolso do consumidor. A energia solar se destaca como uma solução energética responsável e eficiente, proporcionando benefícios tangíveis a longo prazo.

Conclui-se, portanto, que é possível realizar uma instalação eficiente de painéis solares, utilizando todos os componentes necessários e adotando medidas de segurança adequadas. Além disso, a análise da geração de energia ao longo do tempo permite visualizar de forma tangível o retorno financeiro obtido com a utilização dessa fonte renovável, reforçando sua viabilidade e atratividade como uma solução energética sustentável.

Ao observar os valores gastos neste projeto, a quantidade de energia produzida e o tempo de retorno do investimento, fica comprovado que a energia solar é uma escolha inteligente para promover um futuro mais sustentável e economicamente vantajoso, beneficiando tanto o meio ambiente quanto aos consumidores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINNE, 2012. Proposta para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira. 174 p.

ABREU, S. L., Utilização da Energia Solar em Substituição a Chuveiros Elétricos, Fontes Não-Convencionais de Energia – As Tecnologias Solar, Eólica e de Biomassa, Laboratório de Energia Solar, UFSC, Florianópolis, Brasil, 2000.

Atlas Brasileiro de Energia Solar / Enio Bueno Pereira; Fernando Ramos Martins; André Rodrigues Gonçalves; Rodrigo Santos Costa; Francisco J. Lopes de Lima; Ricardo Rüther; Samuel Luna de Abreu; Gerson Máximo Tiepolo; Silvia Vitorino Pereira; Jefferson Gonçalves de Souza -- 2. ed. -- São José dos Campos: INPE, 2017.

CARVALHO, JOÃO VITOR, Sistema Fotovoltaico Personalizado Guia Completo de Energia Solar, OAKENERGIA, 2021. Disponível em: <https://oakenergia.com.br/sistema-fotovoltaico-guia-completo-energia-solar/>. Acesso em 15 de maio de 2022.

CLIMATOLOGIA E HISTÓRICO DE PREVISÃO DO TEMPO EM ORLÂNDIA BR - CLIMATEMPO. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/498/orlandia-sp>. Acesso em 27 de novembro de 2022.

CLIMATOLOGIA E HISTÓRICO DE PREVISÃO DO TEMPO EM SÃO PAULO BR – CLIMATEMPO Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/558/saopaulo-sp>. Acesso em 27 de novembro de 2022.

CRESESB. Banco de dados Potencial Solar – SunData v 3.0. S/D. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em 30 de dezembro de 2022.

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. RINNOVABILE Sistemas de Energia. S/D. Disponível em: <https://www.rinnovabile.com.br/energiafotovoltaica>. Acesso em 20 de julho de 2023.

FERGÜTZ, Marcos, Proteção contra sobretensões, dispositivos de proteção contra surtos, 2019. 24 p.

GALDINO, Janis. Et al. Caracterização de Módulos Fotovoltaicos orgânicos. Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS 2018

Global Solar Atlas. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/download>. Acesso em: 23 jul. 2023.

GUIMARÃES, Ana Paula, C. et al. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. CRESESB-CEPEL. Rio de Janeiro, 2004. 207p. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2004.Pdf. Acesso em: 19 de junho. 2022.

JNG Linha Solar. Catálogo de produtos JNG, 2020. 15 p.
KOURO, J. I. Leon, D. Vinnikov, L. G. Franquelo, "Grid-Connected Photovoltaic Systems: An Overview of Recent Research and Emerging PV Converter Technology", IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 9, no. 1, pp. 47-61, março 2015.

LIGAÇÃO EM SÉRIE DE MAIS PAINÉIS SOLARES. MPPTSolar. S/D. Disponível em: <https://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-serie.html> Acesso em 20 dezembro de 2022.

NERIS, Alessandra, O QUE SÃO PAINÉIS MONOCRISTALINOS E QUAIS SÃO SUA VANTAGENS, Aldoblog, 2021. Disponível em: <https://www.aldo.com.br/blog/o-que-sao-paineis-monocristalinos-e-qualis-sao-suas-vantagens/>. Acesso em 05 de dezembro de 2023

PORTAL SOLAR, PAINEL SOLAR.S/D. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/painel-solar>. Acesso em 05 de dezembro de 2023.

PORTAL SOLAR, MICROINVERSOR SOLAR GRID-TIE. S/D. Disponível em <https://www.portalsolar.com.br/micro-inversor-solar-grid-tie.html>. Acesso em 23 de dezembro de 2022.

PORTAL SOLAR, PASSO A PASSO DA FABRICAÇÃO DO PAINEL SOLAR. S/D. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html#ancora3>. Acesso em 09 de outubro de 2022.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (org.). Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL/ CRESESB, 2014. 530 p.

SANCHES, CELSO BERTON, Energia Solar. UNESP, 2015. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/eco2/fontes-de-energia/solar/>. Acesso em 05 de novembro de 2023.

SOUZA, João Paulo, Silício mono ou policristalino: quem vence o duelo. Canal Solar, 2019, Disponível em: <https://canalsolar.com.br/silicio-mono-ou-policristalino-quem-vence-o-duelo/>. Acesso em 26 de setembro de 2022.

VILLALVA, Marcelo Gradella, Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações/ Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli – 2.ed. – São Paulo: Érica 2012.

VILLALVA, Marcelo, é possível soldar os conectores MC4. Canal Solar, 2019, Disponível em: <https://canalsolar.com.br/e-possivel-soldar-os-conectores-mc4/>. Acesso em 09 de outubro de 2022.

VILLALVA, Marcelo, Como são homologados os inversores fotovoltaicos no Brasil. Canal Solar, 2020, Disponível em: <https://canalsolar.com.br/como-sao-homologados-os-inversores-fotovoltaicos-no-brasil/>. Acesso em 15 de dezembro de 2023.

VINTURINI, MATEUS, DIODOS DE BY-PASS E HOTSPOTS DOS MÓDULOS VOLTAICOS. Canal Solar, 11 de outubro de 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/diodos-de-bypass-e-hot-spots-dos-modulos-fotovoltaicos/>. Acesso em 11 de dezembro de 2022.

ZANI, VICTOR, PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO: O GERADOR DE ENERGIA SOLAR. E4 Energia Renováveis. 23 de outubro de 2018. Disponível em: <https://www.e4energiasrenovaveis.com.br/artigos/painel-solar-fotovoltaico>. Acesso em 20 de dezembro de 2022.

ZILLES, R.; MACEDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F., 2012. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à rede Elétrica. 1. Ed. São Paulo: Oficina de Textos. v.1. 208 p.