

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**Guilherme Barbosa de Souza
Lucas Cruz**

**Energia Solar Fotovoltaica: Geração, Dimensionamento e
Estudo de Caso**

São Carlos

2024

**Guilherme Barbosa de Souza
Lucas Cruz**

Energia Solar Fotovoltaica: Geração, Dimensionamento e Estudo de Caso

Monografia apresentada ao Curso de Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Rogerio Andrade Flauzino

**São Carlos
2024**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C955e Cruz Fialho de Freitas, Lucas
Energia Solar Fotovoltaica: Geração,
Dimensionamento e Estudo de Caso / Lucas Cruz Fialho
de Freitas; orientador Rogério Andrade Flauzino. São
Carlos, 2024.

- Programa de e Área de Concentração em --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2024.

1. energia solar. 2. sistemas fotovoltaicos. 3.
dimensionamento. 4. eficiência energética. 5.
homologação. I. Título.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

B238e Barbosa de Sousa, Guilherme
 Energia Solar Fotovoltaica: Geração,
Dimensionamento e Estudo de Caso / Guilherme Barbosa de
Sousa; orientador Rogério Andrade Flauzino. São Carlos,
2024.

 - Programa de e Área de Concentração em --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2024.

 1. energia solar. 2. sistemas fotovoltaicos. 3.
dimensionamento. 4. eficiência energética. 5.
homologação. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Guilherme Barbosa de Souza

Título: “Energia Solar Fotovoltaica: Geração, Dimensionamento e Estudo de Caso”

**Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 06 / 12 / 2024,**

**com NOTA 7,0 (Sete , Zero), pela Comissão
Julgadora:**

**Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino - Orientador
SEL/EESC/USP**

Mestre Daniel Carrijo Polonio Araujo - Doutorando EESC/USP

Mestre Gabriel de Souza Pereira Gomes - Doutorando EESC/USP

**Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Professor Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Lucas Cruz Fialho de Freitas

Título: “Energia Solar Fotovoltaica: Geração, Dimensionamento e Estudo de Caso”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 06 / 12 / 2024 ,

com NOTA 7,0 (sete , zero) , **pela Comissão**
Julgadora:

Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino - Orientador
SEL/EESC/USP

Mestre Daniel Carrijo Polonio Araujo - Doutorando EESC/USP

Mestre Gabriel de Souza Pereira Gomes - Doutorando EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Professor Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior

*“O estudo, a busca da verdade e da beleza são domínios
em que nos é consentido sermos crianças por toda a vida.”*

Albert Einstein

RESUMO

Souza, G. B., Cruz, L. **Energia Solar Fotovoltaica: Geração, Dimensionamento e Estudo de Caso.** 2024. 95p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Este trabalho aborda a energia solar desde suas origens históricas até sua evolução no Brasil e no mundo, destacando sua importância no cenário atual de geração de energia sustentável. O objetivo principal é desenvolver o dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica para reduzir o consumo de energia do consumidor, abrangendo o cálculo de geração dos módulos fotovoltaicos, a potência do inversor, a montagem do kit e o processo de homologação junto à concessionária. A metodologia consiste em uma análise teórica para dimensionamento do sistema, complementada pelo estudo de um caso real, permitindo uma comparação entre o projeto idealizado e as condições práticas observadas. Os resultados discutem os fatores que influenciam diretamente a geração de energia, como condições climáticas, orientação e eficiência dos componentes, além das diferenças entre os cenários propostos. Este estudo reforça a relevância do planejamento adequado de sistemas fotovoltaicos para maximizar sua eficiência e viabilidade técnica.

Palavras-chave: energia solar, sistemas fotovoltaicos, dimensionamento, eficiência energética, homologação.

ABSTRACT

Souza, G. B., Cruz, L. **Photovoltaic Solar Energy: Generation, Dimensioning and Study of Case.** 2024. 95p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

This paper addresses solar energy from its historical origins to its evolution in Brazil and worldwide, highlighting its importance in the current scenario of sustainable energy generation. The main objective is to develop the dimensioning of a photovoltaic system connected to the electrical grid to reduce consumer energy consumption, covering the design of photovoltaic module generation, inverter power, kit assembly and the approval process with the specification. The methodology consists of a theoretical analysis for system dimensioning, complemented by the study of a real case, allowing a comparison between the idealized project and the observed practices. The results discuss the factors that directly influence energy generation, such as climatic conditions, orientation and efficiency of components, in addition to the differences between the proposed solutions. This study reinforces the relevance of adequate planning of photovoltaic systems to maximize their efficiency and technical options.

Keywords: solar energy, photovoltaic systems, sizing, energy efficiency

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – CAPACIDADE ANUAL SOLAR FV INSTALADA 2000-2021	23
Figura 2 – Matriz energética brasileira em 2023. Fontes: (ABSOLAR, 2024)	25
Figura 3 – Exemplo de um cristal de silício dopado com átomos de fósforo. Fonte: (CONNOR, 2020)	29
Figura 4 – Exemplo de um cristal de silício dopado com átomos de fósforo. Fonte: (CONNOR, 2020)	30
Figura 5 – Formação da região de depleção na junção PN. Fonte: (FILHO, 2012) .	30
Figura 6 – Representação da junção PN numa célula fotovoltaica. Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014)	31
Figura 7 – Células monocristalinas e policristalinas. Fonte: (SOLAR, 2019)	32
Figura 8 – Célula de Silício amorfo (a-Si). Fonte: (SOLAR, 2020b)	33
Figura 9 – Célula de telureto de cádmio (CdTe). Fonte: (SOLAR, 2020a)	33
Figura 10 – Célula de disseleneto de cobre índio gálio (CIGS). Fonte: (KARAGIOR- GIS, 2014)	34
Figura 11 – Representação da célula de nanotubos. Fonte: (KARAGIORGIS, 2014)	35
Figura 12 – Representação da células concentradas. Fonte: (TRIBUNE, 2011) . . .	36
Figura 13 – Exemplo de estrutura de fixação. Fonte: (MASTER, 2021)	44
Figura 14 – Exemplo de um quadro de proteção. Fonte: (MASTER, 2021)	45
Figura 15 – Histórico de consumo	50
Figura 16 – Irradiância	52
Figura 17 – Irradiância sobre o plano horizontal	52
Figura 18 – Direção e inclinação da instalação	53
Figura 19 – Temperatura Média em Janeiro para a cidade de Piracicaba	55
Figura 20 – Croqui de instalação dos módulos fotovoltaico	60
Figura 21 – Posicionamento dos módulos segundo o fabricante	61
Figura 22 – Estrutura de fixação para instalação dos módulos fotovoltaicos	62
Figura 23 – Histórico de consumo do cliente	67
Figura 24 – Vista aérea do local da instalação	68
Figura 25 – Planta do posicionamento dos painéis no telhado	68
Figura 26 – Diagrama Unifilar da Instalação do Pannel Solar Fotovoltaico	69
Figura 27 – Local de instalação das Placas	69
Figura 28 – Local de instalação do inversor	70
Figura 29 – Local de instalação do circuito de proteção do inversor	70
Figura 30 – Potência máxima de saída	71
Figura 31 – Tensão de entrada do sistema fotovoltaico	71
Figura 32 – Corrente de entrada do sistema fotovoltaico	72

Figura 33 – Geração de energia elétrica registrada no dia 73

Figura 34 – Geração acumulada no ano de 2023 73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Temperatura de operação do módulo fotovoltaico	55
Tabela 2 – Energia gerada por 1 módulo fotovoltaico	56
Tabela 3 – Materiais utilizados para estrutura de fixação e suas quantidades . . .	61
Tabela 4 – Componentes do sistema fotovoltaico instalado e suas quantidades . . .	63
Tabela 5 – Geração de energia por mês do cliente	74

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	19
2.1	Mundo	19
2.2	Brasil	24
3	CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA	29
3.1	Tipos de Células Fotovoltaicas	31
3.1.1	Silício Cristalino	31
3.1.2	Filmes Fino	32
3.1.3	Emergentes	34
3.1.4	Nanotecnologia	34
3.1.5	Células Fotovoltaicas de Concentração (CPV)	35
4	INVERSORES	37
4.1	Central ou String	38
4.2	Microinversor	39
5	SISTEMA FOTOVOLTAICO	43
5.1	Módulos Fotovoltaico	43
5.2	Inversor	43
5.3	Estruturas de Montagem	43
5.4	Cabos	44
5.5	Dispositivos de Proteção (Fusíveis e Disjuntores)	44
5.6	Sistema de Monitoramento	45
6	PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE	47
6.1	Etapas preliminares de projeto de um sistema fotovoltaico	47
6.1.1	Estudo do recurso Solar	47
6.1.2	Localização	48
6.1.3	Escolha da configuração	49
6.1.4	Levantamento da Demanda	50
6.2	Dimensionamento de sistema fotovoltaico conectado à rede	51
6.2.1	Local da Instalação	51
6.2.2	Cálculo de geração do módulo fotovoltaico	53
6.2.3	Escolha do inversor	56
6.2.4	Montagem do kit	59

6.2.5	Homologação	64
7	ANÁLISE DE CASO REAL	67
8	FATORES QUE INFLUENCIAM A GERAÇÃO E PERDA DE EFI- CIÊNCIA	75
8.1	Direção e Inclinação	75
8.1.1	Cálculo do Ângulo de Incidência	75
8.1.2	Correção da Radiação Solar Efetiva	76
8.1.3	Correção da equação de geração	76
8.1.4	Eficiência do inversor	77
8.1.5	Sombreamento	77
8.1.6	Mismatching	78
8.1.7	Outras Perdas	79
9	CONCLUSÃO	83
	REFERÊNCIAS	85
	ANEXOS	87
	ANEXO A – DATASHEET MÓDULO RISEN 445WP	89
	ANEXO B – SIW300H M020 / M030 / M040 / M050 / M060 L1	93

1 INTRODUÇÃO

Ao se abordar a questão do desenvolvimento e do crescimento econômico, observa-se uma mudança significativa na necessidade e na demanda por energia elétrica. Essas condições resultarão em uma demanda constante e ininterrupta por eletricidade. Atualmente, o mundo começa a enfrentar o esgotamento dos recursos naturais utilizados para geração de eletricidade. Dessa forma, o aumento no uso de dispositivos que consomem eletricidade terá um duplo efeito: o excesso de eletricidade e a intensificação do processo de produção. Ademais, o ciclo de desenvolvimento contribui para o aumento da poluição do ar: historicamente, o crescimento econômico era considerado inseparável da poluição atmosférica (KNIRSCH, 2012).

Esta era é caracterizada pela fusão de tecnologias físicas, digitais e biológicas. A discussão sobre a sustentabilidade e o impacto das novas tecnologias no meio ambiente tornou-se central. Países ao redor do mundo estão reconhecendo a necessidade urgente de reduzir as emissões de carbono e mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Iniciativas como o Acordo de Paris exemplificam o compromisso internacional com a redução de gases de efeito estufa e a promoção de práticas sustentáveis. O conceito de "indústria 4.0" enfatiza a importância de tecnologias que podem reduzir as emissões e promover práticas mais sustentáveis (SCHWAB, 2016). O trabalho procura explorar os conceitos sobre a energia solar fotovoltaica, as tecnologias associadas a ela, mostrar o panorama desse mercado no Brasil e no mundo, por fim, fazer um estudo de caso de um sistema de geração fotovoltaica.

Primeiramente, visando contextualizar o surgimento do setor de energia fotovoltaica, foram discutidos tópicos relativos à descoberta do efeito fotovoltaico e ao desenvolvimento inicial das placas de silício, que começaram a alcançar uma eficiência relevante até chegarmos as placas atualmente disponíveis no mercado.

Ao investigar a temática da geração de energia solar, buscou-se examinar a estrutura do mercado global de energia solar, com ênfase na evolução histórica deste mercado, identificando os países que o lideram e suas principais políticas de incentivo. No que tange ao Brasil, procedeu-se à comparação entre as matrizes energéticas do país e do mundo, explorou-se o potencial para aumentar a porcentagem de geração de eletricidade por meio de painéis solares, bem como as oportunidades e desafios do setor, além das políticas públicas que contribuíram para alcançar o atual patamar de geração atual.

No desenvolvimento deste trabalho, será abordado o processo de dimensionamento de um projeto fotovoltaico conectado à rede elétrica, com foco na montagem de um kit completo e na explicação detalhada dos passos necessários para a sua homologação e conexão à rede da CPFL Paulista. O objetivo é fornecer uma compreensão prática e teórica

sobre como projetar um sistema fotovoltaico eficiente, considerando todos os componentes envolvidos, desde a seleção dos módulos e inversores até a formalização da conexão com a concessionária de energia. Será discutido também o processo de homologação junto à CPFL Paulista, com a apresentação das etapas burocráticas e técnicas exigidas para a implementação do sistema.

Além disso, será realizada a análise de um caso real de instalação de um sistema fotovoltaico na cidade de Campinas, com o intuito de comparar o desempenho prático do sistema com as estimativas realizadas durante o dimensionamento teórico. Neste caso, serão observados os fatores que impactam a geração de energia, como sombreamento, eficiência do inversor e condições climáticas, e será feita uma análise das perdas que afetam o rendimento do sistema. A comparação entre o desempenho real e o projetado permitirá entender as variações e os desafios enfrentados na prática, contribuindo para um melhor planejamento e otimização de futuras instalações fotovoltaicas.

2 A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica tem suas origens em uma série de descobertas científicas e avanços tecnológicos que remontam ao século XIX. Desde então, suas aplicações vêm trazendo grandes benefícios para a sociedade, por se tratar de uma fonte de energia limpa e renovável. Embora hoje esteja em expansão e seja vista como uma das principais fontes de energia do futuro, é essencial voltar ao século XIX para entender o início dessa trajetória.

O ponto de partida para a energia solar fotovoltaica foi a descoberta do efeito fotovoltaico pelo físico francês Edmond Becquerel em 1839. Edmond Becquerel estava investigando o comportamento da luz e sua interação com a matéria em um experimento conduzido no laboratório de seu pai, Antoine César Becquerel, que também era um cientista renomado. Ele realizou um experimento com uma célula eletrolítica composta de dois eletrodos metálicos (platinados) submersos em uma solução condutora (um eletrólito). Durante o experimento, ele notou que, ao expor essa célula à luz solar, a corrente elétrica gerada aumentava. Este foi o primeiro registro do que mais tarde seria chamado de efeito fotovoltaico, ou seja, a capacidade de certos materiais de gerar eletricidade quando expostos à luz (FRAAS, 2010).

O efeito fotovoltaico descrito por Becquerel ocorre quando os fótons da luz solar interagem com os átomos de um material, excitando os elétrons e fazendo com que eles se movimentem, gerando uma corrente elétrica. No experimento de Becquerel, a luz aumentou a energia dos elétrons no eletrodo, o que resultou na formação de uma corrente elétrica através da célula. Embora Becquerel tenha observado e documentado o fenômeno, a tecnologia e o conhecimento disponíveis no século XIX não eram suficientes para aplicar a descoberta de maneira prática. As primeiras células solares desenvolvidas com base nessa descoberta tinham uma eficiência extremamente baixa. Além disso, naquela época, não havia uma grande necessidade de fontes alternativas de energia, já que a eletricidade ainda não era amplamente utilizada. A descoberta de Becquerel abriu o caminho para o desenvolvimento das células solares modernas.

2.1 Mundo

A energia solar fotovoltaica tem suas origens em uma série de descobertas científicas e avanços tecnológicos que remontam ao século XIX. Desde então, suas aplicações vêm trazendo grandes benefícios para a sociedade, por se tratar de uma fonte de energia limpa e renovável. Embora hoje esteja em expansão e seja vista por visionários como Elon Musk como a principal fonte de energia do futuro, é essencial voltar ao século XIX para entender o início dessa trajetória.

O ponto de partida para a energia solar fotovoltaica foi a descoberta do efeito fotovoltaico pelo físico francês Edmond Becquerel em 1839. Edmond Becquerel estava investigando o comportamento da luz e sua interação com a matéria em um experimento conduzido no laboratório de seu pai, Antoine César Becquerel, que também era um cientista renomado. Ele realizou um experimento com uma célula eletrolítica composta de dois eletrodos metálicos (platinados) submersos em uma solução condutora (um eletrólito). Durante o experimento, ele notou que, ao expor essa célula à luz solar, a corrente elétrica gerada aumentava. Este foi o primeiro registro do que mais tarde seria chamado de efeito fotovoltaico, ou seja, a capacidade de certos materiais de gerar eletricidade quando expostos à luz.

O efeito fotovoltaico descrito por Becquerel ocorre quando os fótons da luz solar interagem com os átomos de um material, excitando os elétrons e fazendo com que eles se movimentem, gerando uma corrente elétrica. No experimento de Becquerel, a luz aumentou a energia dos elétrons no eletrodo, o que resultou na formação de uma corrente elétrica através da célula. Embora Becquerel tenha observado e documentado o fenômeno, a tecnologia e o conhecimento disponíveis no século XIX não eram suficientes para aplicar a descoberta de maneira prática. As primeiras células solares desenvolvidas com base nessa descoberta tinham uma eficiência extremamente baixa. Além disso, naquela época, não havia uma grande necessidade de fontes alternativas de energia, já que a eletricidade ainda não era amplamente utilizada. A descoberta de Becquerel abriu o caminho para o desenvolvimento das células solares modernas.

Após a descoberta de Becquerel, entre 1870 e 1950, as primeiras células fotovoltaicas passaram por uma série de descobertas experimentais e avanços teóricos que pavimentaram o caminho para as tecnologias modernas de energia solar. Em 1873, o engenheiro britânico Willoughby Smith descobriu que o selênio tinha propriedades fotocondutivas, ou seja, a condutividade elétrica do material aumentava quando exposto à luz. Esse fenômeno, embora não diretamente ligado ao efeito fotovoltaico, foi um passo importante para entender como a luz poderia interagir com materiais para gerar eletricidade. Poucos anos depois, em 1876, William Grylls Adams e Richard Evans Day deram um grande passo ao demonstrar que o selênio poderia gerar eletricidade diretamente a partir da luz, sem a necessidade de calor. Eles observaram que o selênio produzia uma corrente elétrica quando exposto à luz solar, comprovando a existência do efeito fotovoltaico em um material sólido. Essa foi a primeira célula fotovoltaica reconhecida, embora sua eficiência fosse extremamente baixa (menos de 1%), mesmo com essa baixa eficiência, o experimento demonstrou que a conversão direta de luz em eletricidade era possível.

Já em 1883, o inventor norte-americano Charles Fritts construiu a primeira célula solar usando uma fina camada de selênio revestida com ouro. Ele colocou o selênio entre dois contatos metálicos, permitindo que uma corrente fluísse quando a luz atingia o dispositivo,

A célula solar de Fritts, assim como a de Adams e Day, tinha uma eficiência muito baixa, cerca de 1%. Ainda assim, foi uma das primeiras tentativas de usar a energia solar para alimentar dispositivos elétricos, e é vista como a precursora das células fotovoltaicas modernas, Fritts previu que, no futuro, a energia solar seria uma alternativa às fontes tradicionais, como o carvão, embora as limitações tecnológicas da época impedissem essa visão de se concretizar no curto prazo.

No final do século XIX e início do século XX, o selênio continuou sendo o principal material de estudo no campo das células fotovoltaicas. Mesmo com suas limitações de eficiência, ele foi amplamente utilizado em fotômetros, dispositivos que mediam a intensidade da luz, durante esse período, os cientistas começaram a compreender melhor as propriedades dos semicondutores e o comportamento dos elétrons em resposta à luz, estabelecendo as bases para os futuros avanços em materiais fotovoltaicos.

Eis que chegamos no ano de 1905 e a descoberta do efeito fotoelétrico por Einstein, esse estudo apresentou um dos avanços teóricos mais significativos para a compreensão da energia fotovoltaica. O efeito fotoelétrico ocorre quando a luz, que consiste em pequenas partículas chamadas fótons, incide sobre um material, normalmente um semicondutor. Cada fóton carrega uma quantidade de energia proporcional à sua frequência de luz. Se um fóton tiver energia suficiente, ele pode "bater" em um elétron na superfície de um átomo no material e, assim, "liberá-lo" de sua órbita ao redor do átomo. Esse elétron "libertado" pode, então, ser movido através do material, criando uma corrente elétrica. No contexto de uma célula solar, essa corrente elétrica gerada pelos elétrons liberados é capturada por condutores, criando eletricidade.

Outro grande avanço na energia solar fotovoltaica ocorreu em 1954, quando os cientistas Gerald Pearson, Daryl Chapin, e Calvin Fuller dos Laboratórios Bell nos EUA desenvolveram a primeira célula solar prática, feita de silício. Essa célula tinha uma eficiência de cerca de 6% e era capaz de gerar eletricidade suficiente para alimentar pequenos dispositivos. Esse desenvolvimento foi um marco, pois o silício, um material abundante e eficiente, permitiu que as células fotovoltaicas começassem a ser vistas como uma possível fonte de energia.

A primeira grande aplicação prática da energia solar fotovoltaica foi no setor aeroespacial. Em 1958, o satélite Vanguard 1 da NASA foi lançado, usando células solares fotovoltaicas para alimentar seus sistemas. Vanguard I utilizou pequenas células solares de silício, que tinham eficiência entre 6% e 10%, para fornecer energia ao seu transmissor de rádio, o satélite operou por quase 7 anos, superando todas as expectativas, e demonstrou que as células solares podiam funcionar em condições adversas, como o ambiente de radiação e a ausência de manutenção no espaço. Após o sucesso do Vanguard I, a NASA e outras agências espaciais adotaram rapidamente células solares de silício para a alimentação de satélites. A tecnologia se tornou a principal fonte de energia para missões espaciais, uma

vez que era confiável, leve e não exigia combustível. Durante a década de 1960, as células solares foram usadas em uma série de satélites, como o Explorer 6 e o Telstar, ambos equipados com células solares de silício para garantir operação contínua de seus sistemas eletrônicos e de comunicação. A confiabilidade e a leveza dos painéis solares tornaram a tecnologia ideal para o uso em satélites e estações espaciais.

Outro marco histórico que impulsionou o crescimento da energia solar e de outras fontes renováveis foi a crise dos combustíveis fósseis na década de 1970, em especial a crise do petróleo de 1973. A crise começou em outubro de 1973, quando membros da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), principalmente os países árabes, impuseram um embargo de petróleo como retaliação ao apoio dos Estados Unidos e outros países ocidentais a Israel durante a Guerra do Yom Kippur. O embargo resultou em uma drástica redução no fornecimento de petróleo para muitos países, levando a aumentos substanciais nos preços globais. Os preços do barril de petróleo dispararam, quadruplicando em questão de meses. Isso gerou uma forte desaceleração econômica nos países mais dependentes de petróleo importado, como os Estados Unidos e grande parte da Europa. Além disso, houve escassez de combustíveis, filas em postos de gasolina, racionamento de energia e aumento generalizado dos custos de transporte e produção industrial. A crise expôs a vulnerabilidade dos países ocidentais em relação ao fornecimento de petróleo e a necessidade urgente de diversificar suas fontes de energia. Isso desencadeou um movimento para buscar fontes alternativas e mais seguras de energia, menos suscetíveis a crises geopolíticas.

Durante a década de 1970, o impacto da crise do petróleo impulsionou pesquisas em fontes de energia renovável, com destaque para a energia solar fotovoltaica. Até então, a energia solar tinha aplicação limitada, principalmente em satélites e em áreas remotas, pois os custos de produção dos painéis solares eram extremamente altos. No entanto, a crise de petróleo forçou governos e pesquisadores a reconsiderar o potencial da energia solar e de outras fontes renováveis. Em resposta à crise, países como os Estados Unidos começaram a investir em programas de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias renováveis. A administração do presidente Jimmy Carter, por exemplo, lançou o National Energy Act em 1978, que incluiu incentivos para o desenvolvimento de energias renováveis, incluindo a solar. Carter até instalou painéis solares na Casa Branca como um gesto simbólico de apoio à energia solar. A necessidade de encontrar alternativas aos combustíveis fósseis levou a um aumento significativo em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias solares, isso resultou em melhorias na eficiência das células fotovoltaicas e na redução gradual dos custos de produção.

Na década de 1980, as células solares começaram a ser usadas em aplicações comerciais e residenciais, especialmente em locais isolados onde a conexão à rede elétrica era difícil ou impossível. A eficiência das células solares tem avançado continuamente, ultrapassando a marca de 20% nos dias atuais, enquanto os custos de produção têm

diminuído de forma gradual, tornando a tecnologia cada vez mais acessível e competitiva.

Desde então, o mercado ganhou reconhecimento e força no cenário global, sendo responsável por uma mudança significativa na matriz energética de alguns países, como o Brasil. Abaixo podemos ver o crescimento da capacidade instalada de energia solar em todo o planeta de 2000 a 2021, os dados fazem parte do "Global Market Outlook for Solar Power 2022-2026", relatório de referência para os avanços do mercado de energia solar no mundo e projeções de crescimento.

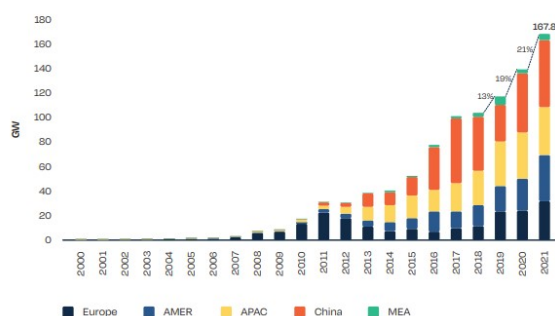


Figura 1 – CAPACIDADE ANUAL SOLAR FV INSTALADA 2000-2021

A pesquisa contínua tem levado ao desenvolvimento de novas tecnologias, como células solares de perovskita, essas células são um dos avanços mais promissores na tecnologia fotovoltaica. A perovskita é um material que tem demonstrado alta eficiência na conversão de luz solar em eletricidade, e sua produção é mais barata e flexível em comparação com as células de silício tradicionais. Atualmente, as células de perovskita atingem eficiência acima de 25% em laboratório e continuam a melhorar. A combinação dessas células com silício em configurações tandem também tem potencial para ultrapassar a barreira dos 30% de eficiência. Além disso, os painéis solares bifaciais têm a capacidade de captar luz solar em ambos os lados do módulo, o que maximiza a quantidade de energia gerada sem a necessidade de ampliar a área ocupada. O lado traseiro do painel aproveita a luz refletida pelo solo, contribuindo para um aumento significativo na eficiência global do sistema.

Atualmente, uma das principais inovações no campo da energia solar é a implementação de sistemas híbridos, que combinam a geração de energia solar com sistemas de armazenamento em baterias. O avanço das baterias de íon-lítio tem contribuído significativamente para a redução dos custos e o aumento da eficiência desses sistemas, possibilitando o armazenamento da energia solar gerada durante o dia para uso noturno ou em dias nublados. Além disso, novas tecnologias de armazenamento, como as baterias de estado sólido e as baterias de fluxo, estão em desenvolvimento, visando aprimorar a capacidade e a segurança do armazenamento de energia. Essas inovações representam um passo importante para a viabilidade e a confiabilidade dos sistemas de energia solar,

ampliando sua aplicabilidade e integração na matriz energética futura.

2.2 Brasil

Uma vez que a questão do desenvolvimento e do crescimento econômico seja abordada, a necessidade e a demanda por energia elétrica vão mudar significativamente. Tais condições levarão a uma demanda incessante e ininterrupta por eletricidade. No momento, o mundo começa a se deparar com o fato de esgotamento dos recursos naturais que são usados para gerar eletricidade. Assim, o crescente uso de equipamentos que requerem eletricidade terá um efeito duplo: a eletricidade estará disponível em excesso e o processo de produção se intensificará. O ciclo de desenvolvimento também aumenta a poluição do ar: o crescimento econômico é impensável sem poluição do ar (Knirsch, 2012)(KNIRSCH, 2012).

A trajetória global rumo à sustentabilidade tem-se intensificado nas últimas décadas, com uma ênfase crescente em soluções energéticas renováveis. Países ao redor do mundo estão reconhecendo a necessidade urgente de reduzir as emissões de carbono e mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Iniciativas como o Acordo de Paris exemplificam o compromisso internacional com a redução de gases de efeito estufa e a promoção de práticas sustentáveis.

O Brasil, sendo um dos maiores países do mundo em extensão territorial, possui uma abundância de recursos minerais, hídricos e um grande potencial para a exploração de energias renováveis, sendo assim, a matriz energética brasileira se destaca por sua grande dependência de fontes renováveis, especialmente a energia hidrelétrica. Cerca de 60% da eletricidade gerada no Brasil provém de hidrelétricas, que aproveitam os vastos recursos hídricos do país (EPE, 2021). Em contrapartida, as fontes fósseis, como o petróleo e o gás natural, têm uma participação menor na matriz energética brasileira, embora ainda sejam importantes para a oferta total de energia tendo como ano base de 2020, como mostra a Figura 2.

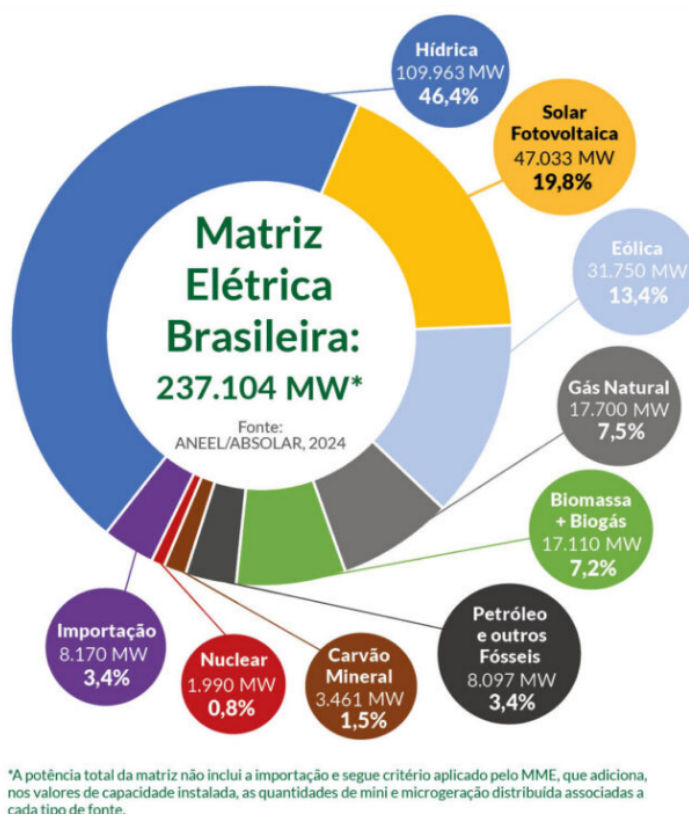


Figura 2 – Matriz energética brasileira em 2023. Fontes: (ABSOLAR, 2024)

Um ponto de comparação importante é a emissão de gases de efeito estufa. Devido à predominância de fontes renováveis, o Brasil apresenta níveis de emissão per capita relativamente baixos em comparação com grandes economias globais que dependem mais fortemente de combustíveis fósseis. Entretanto, a construção de grandes hidrelétricas no Brasil também traz impactos ambientais, como o desmatamento e a mudança de curso de rios.

No Brasil, a trajetória da energia solar fotovoltaica segundo (FRG, 2022) começa a ganhar visibilidade, na década de 90, com a criação do Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios - PRODEM. Esse marco inicial foi seguido por um ponto de inflexão nos anos 90, durante o governo de Itamar Franco, com o programa de desenvolvimento energético de estados e municípios, elevando a capacidade para 5 MW.

Ainda na década de 90, em Brasília, foi elaborado um plano de ação com 14 metas definidas, abrangendo políticas públicas e associações atuantes na área de renováveis. Em 1992, a Eletrobras CEPEL criou um grupo de trabalho que resultou no primeiro manual de engenharia para instalações fotovoltaicas.

Em 1995, o primeiro sistema conectado à rede do país foi instalado em Natal, local de lançamentos de foguetes, com 10 kWp, posteriormente transferido para a CHESF. Módulos e inversores foram fabricados no Brasil. Em 1997, outro sistema foi instalado na

UFSC e, em 1998, no IEE-USP (FRG, 2022).

Em 1998, ocorreu uma reunião em Recife com representantes do IEE-USP, ANEEL e MME no Fórum Permanente de Energias Renováveis, dedicando-se aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. O objetivo foi discutir formas de incentivar esses sistemas para criar um mercado robusto, reduzindo preços e atendendo a demanda rural.

Em 2004, a ANEEL publicou a resolução nº 83, que regulamentou os Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI) para eletrificação rural, com instalações realizadas pela NeoEnergia, na época conhecida como Coelba.

Um marco inicial para o desenvolvimento da energia solar no Brasil foi a Resolução Normativa nº 482, publicada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 2012. Essa norma estabeleceu o sistema de compensação de energia elétrica, permitindo que consumidores com sistemas de micro e minigeração de energia renovável injetassem energia excedente na rede elétrica e recebessem créditos para abater em suas contas futuras. Essa medida foi fundamental para popularizar a energia solar conectada à rede, tornando o investimento mais atrativo para consumidores residenciais, comerciais e industriais.

Com o avanço da tecnologia, a redução dos custos dos equipamentos e a conscientização ambiental crescente, o mercado de energia solar no Brasil experimentou um crescimento exponencial. Em 2015, a Resolução Normativa nº 687 aprimorou as regras para micro e minigeração, expandindo os limites de potência e permitindo o uso de modalidades como geração compartilhada e autoconsumo remoto. Essas mudanças ampliaram as possibilidades de adesão, trazendo novos investidores para o setor.

Nos últimos anos, o Brasil alcançou posições de destaque no cenário mundial da energia solar. Em 2020, o país ultrapassou a marca de 7 GW de capacidade instalada, e desde então, esse número só tem crescido. A energia solar passou a ser uma das principais fontes renováveis na matriz elétrica nacional, com papel estratégico para a segurança energética e a diversificação das fontes de energia.

Um marco legislativo recente foi a aprovação da Lei nº 14.300, sancionada em 2022, que instituiu o Marco Legal da Geração Distribuída. Essa lei estabeleceu regras claras para a expansão da geração distribuída no Brasil, garantindo maior segurança jurídica para investidores e consumidores. A lei também definiu um período de transição para a cobrança gradual do uso da rede elétrica, equilibrando os interesses dos consumidores e das distribuidoras. Com isso, o setor ganhou previsibilidade e atratividade, assegurando o crescimento sustentável da energia solar no país (SECRETARIA-GERAL, 2022).

Em suma, a trajetória da energia solar no Brasil reflete um exemplo de como políticas públicas bem estruturadas, aliadas à inovação tecnológica e ao engajamento da sociedade, podem transformar o cenário energético. De um mercado limitado e de alto

custo, a energia solar se tornou um pilar fundamental na transição energética do país, com perspectivas promissoras para o futuro.

3 CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA

A célula fotovoltaica, a unidade básica de um módulo fotovoltaico, consiste em um material semicondutor, tal como o silício (o material mais amplamente utilizado para esse propósito), que transforma a luz solar diretamente em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. O silício possui quatro elétrons em sua camada de valência, os quais formam ligações covalentes com átomos adjacentes, estabelecendo uma estrutura cristalina. Para viabilizar sua aplicação em uma célula fotovoltaica, o silício é dopado com impurezas. A dopagem implica a inserção de átomos de diferentes elementos na matriz de silício, resultando em duas regiões distintas na célula: uma do tipo N e outra do tipo P. A região tipo N é dopada com elementos como o fósforo, o qual possui cinco elétrons de valência, conforme ilustrado na Figura 3. O elétron adicional do fósforo fica livre para se mover, conferindo à região uma abundância de elétrons.

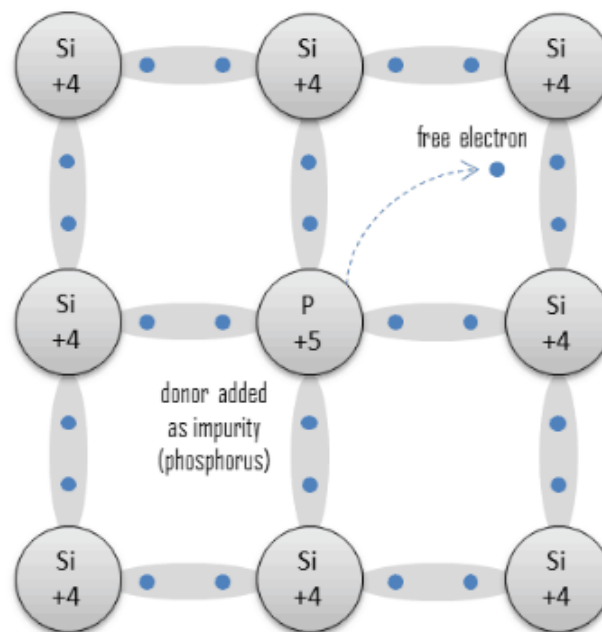


Figura 3 – Exemplo de um cristal de silício dopado com átomos de fósforo. Fonte: (CON-NOR, 2020)

Por outro lado, a região tipo P é dopada com elementos como o boro, que possui três elétrons de valência. A ausência de um elétron cria uma "lacuna" que pode ser preenchida por um elétron de um átomo vizinho, fazendo com que a região tenha uma grande concentração de lacunas, como demonstrado na Figura 4.

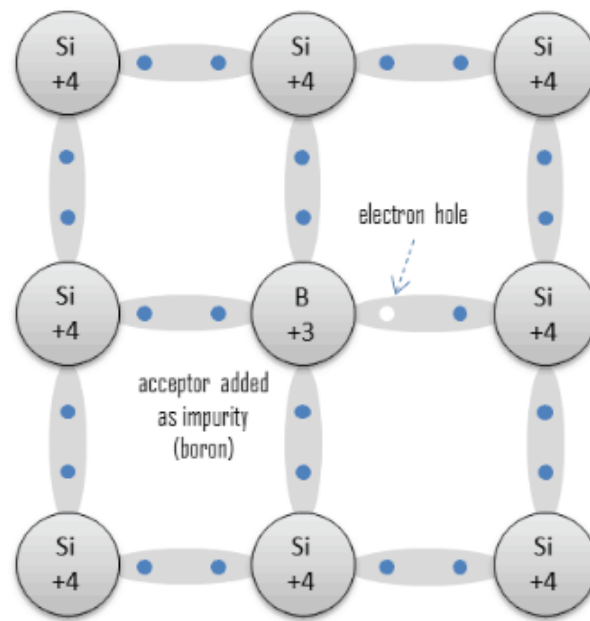


Figura 4 – Exemplo de um cristal de silício dopado com átomos de fósforo. Fonte: (CON-NOR, 2020)

Quando as regiões tipo N e P são conectadas, uma junção PN é formada. Nesta junção, os elétrons livres da região N difundem-se para a região P, preenchendo as lacunas. Esse processo de difusão estabelece uma região de depleção na junção, caracterizada por uma diferença de potencial elétrico que impede o fluxo adicional de elétrons, conforme ilustrado na Figura 5.

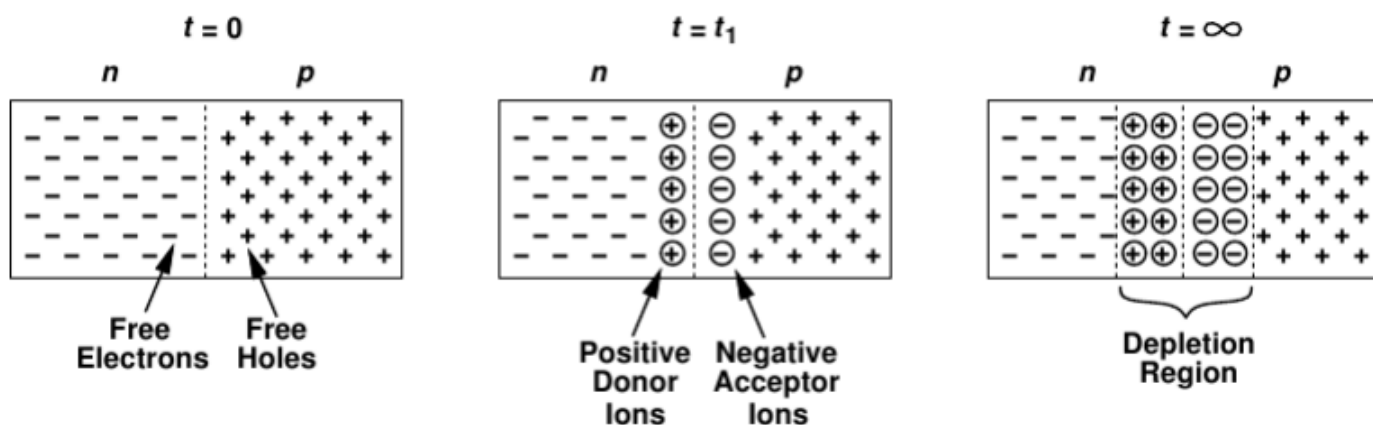


Figura 5 – Formação da região de depleção na junção PN. Fonte: (FILHO, 2012)

Quando a luz solar incide sobre uma célula fotovoltaica, os fótons que possuem energia suficiente têm a capacidade de excitar os elétrons presentes na região de depleção.

Ao estabelecer uma conexão com uma carga, ocorre um fluxo de elétrons através do circuito externo, o que resulta na geração de energia elétrica.

A estrutura de uma célula fotovoltaica pode ser representada pela Figura 6

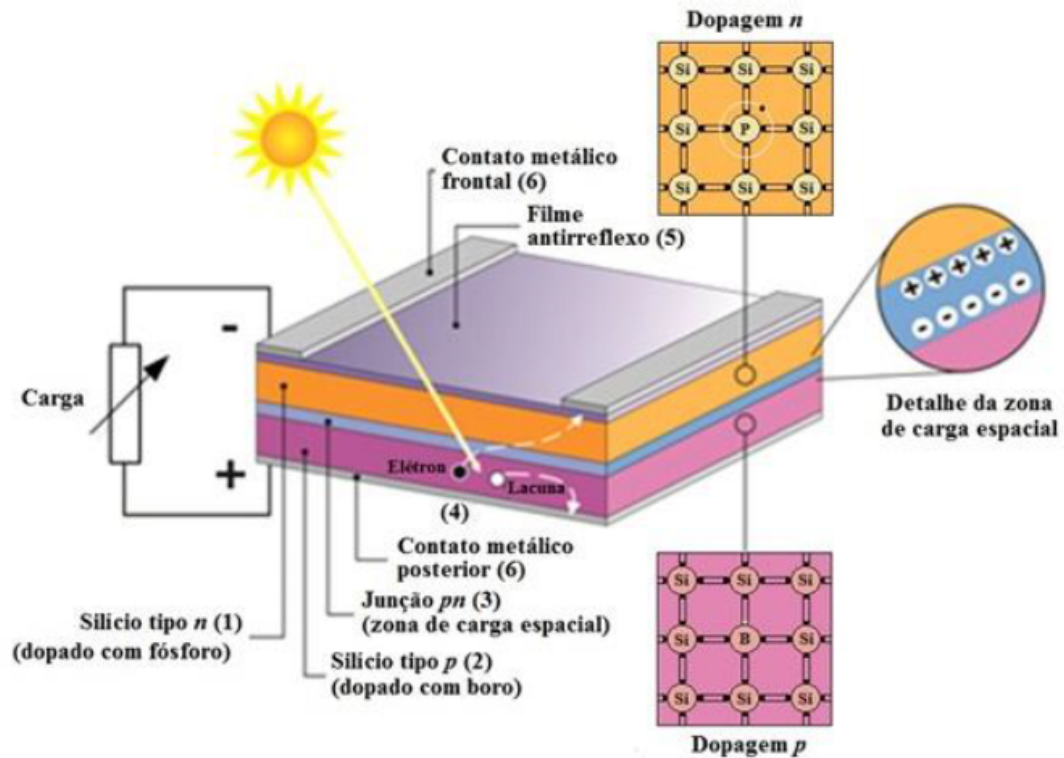


Figura 6 – Representação da junção PN numa célula fotovoltaica. Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014)

Diversos fenômenos podem ocorrer quando a luz incide sobre a célula: o fóton pode não possuir energia suficiente para gerar um par de elétrons-lacunas; o fóton pode ser refletido na superfície; e a energia do fóton pode ser absorvida pelo material, resultando na geração de energia elétrica. Nesse contexto, é importante destacar que a composição da célula inclui um filme antirreflexo, projetado especificamente para minimizar a reflexão da luz, permitindo que o máximo possível de luz seja transmitido e absorvido.

3.1 Tipos de Células Fotovoltaicas

3.1.1 Silício Cristalino

No âmbito comercial, essas células são classificadas em dois tipos distintos:

- Monocristalino: Apresentam alta eficiência de conversão. Essa alta eficiência se deve à estrutura cristalina uniforme do silício monocristalino. Segundo (KARAGIORGIS,

2014) chegando até 23% em escala de laboratório. A desvantagem é o alto custo de produção devido à necessidade de silício de alta pureza e processos de fabricação complexos.

- **Policristalino:** Devido a necessidade de toda indústria de aumentar a produção e diminuir os custos de um produto, e a indústria solar não é uma exceção, surgiu as células policristalinas cuja a diferença está em seu processo de fabricação. O silício derretido é despejado em um molde e deixado esfriar, formando um bloco de silício policristalino. Esse processo concede ao policristalino menor custo de produção em comparação com as células monocristalinas devido ao processo de fabricação mais simples com uma eficiência razoável de 15%. (KARAGIORGIS, 2014)

Observa-se as células de silício monocristalino e policristalino na Figura 7

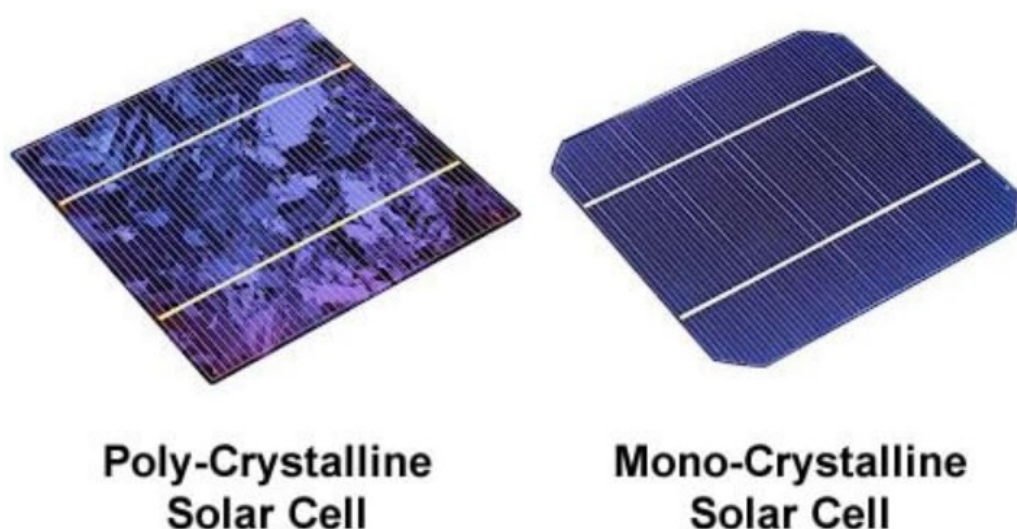


Figura 7 – Células monocristalinas e policristalinas. Fonte: (SOLAR, 2019)

3.1.2 Filmes Fino

O processo de fabricação dessas células fotovoltaicas envolve a deposição de materiais semicondutores em substratos como vidro, metal ou plástico. Essas células apresentam um menor custo de produção em comparação com as células de silício cristalino, além de oferecer versatilidade em termos de forma e tamanho, o que permite sua aplicação em diversas superfícies com um consumo reduzido de material semicondutor. Contudo, apresentam uma eficiência inferior, em torno de 15%, e menor durabilidade em relação às células de silício cristalino. Os materiais empregados incluem silício amorfo (a-Si) conforme ilustrado na Figura 8, telureto de cádmio (CdTe) na Figura 9, e disseleneto de cobre índio gálio (CIGS) na Figura 10, entre outros.



Figura 8 – Célula de Silício amorfo (a-Si). Fonte: (SOLAR, 2020b)

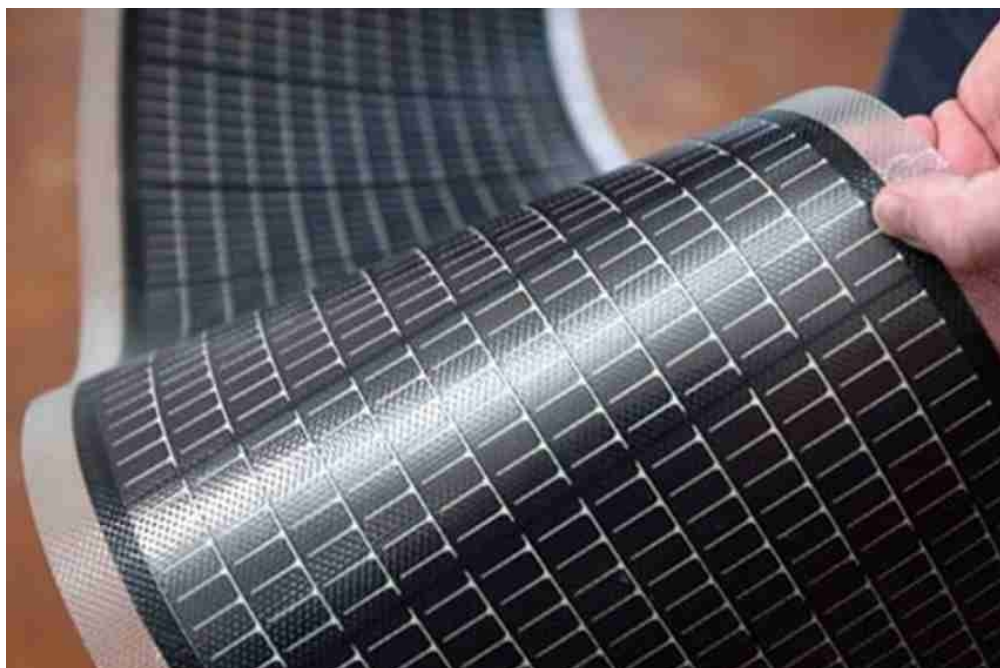


Figura 9 – Célula de telureto de cádmio (CdTe). Fonte: (SOLAR, 2020a)

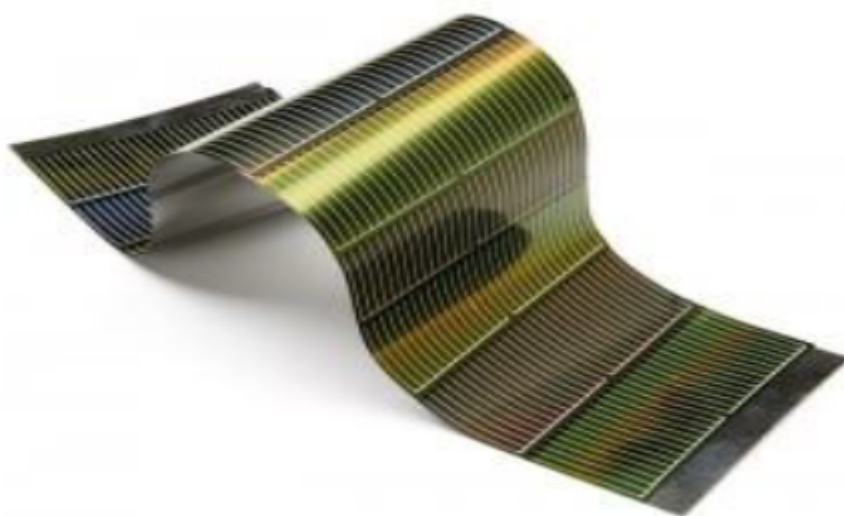


Figura 10 – Célula de disseleneto de cobre índio gálio (CIGS). Fonte: (KARAGIORGIS, 2014)

3.1.3 Emergentes

Estas células encontram-se em fase de pesquisa e desenvolvimento, incluindo as células sensibilizadas por corante (DSSC) e as células orgânicas ou poliméricas (OPV). Uma célula solar orgânica constitui uma variante das células poliméricas e emprega eletrônica orgânica, a qual se caracteriza por um ramo da eletrônica que utiliza polímeros orgânicos condutores ou pequenas moléculas orgânicas para a captação de luz e transporte de carga, possibilitando assim a geração de eletricidade a partir da luz solar por meio do efeito fotovoltaico (SOLAR, 2020b). Essas células apresentam flexibilidade e podem ser impressas em grandes áreas, o que potencialmente as torna muito econômicas. As DSSC, também conhecidas como células de Grätzel, utilizam um corante para absorver a luz solar e gerar elétrons.

3.1.4 Nanotecnologia

Estas células têm por objetivo utilizar nanotecnologia para aumentar a eficiência e diminuir os custos das células fotovoltaicas, destacando-se, entre elas, as células de nanotubos de carbono e as células de pontos quânticos. As células de nanotubos de carbono são constituídas por nanotubos de carbono organizados em uma rede hexagonal, conferindo-lhes propriedades mecânicas e eletrônicas excepcionais, como ilustrado na Figura 11. Estas células encontram-se em fase de desenvolvimento e, até o presente momento, exibem as menores eficiências entre todas as células fotovoltaicas, situando-se em torno de 3% a 4%. Por sua vez, as células de pontos quânticos empregam pontos quânticos, que são nanoestruturas semicondutoras com band gap ajustável, funcionando como "antenas" destinadas à captação da luz solar.

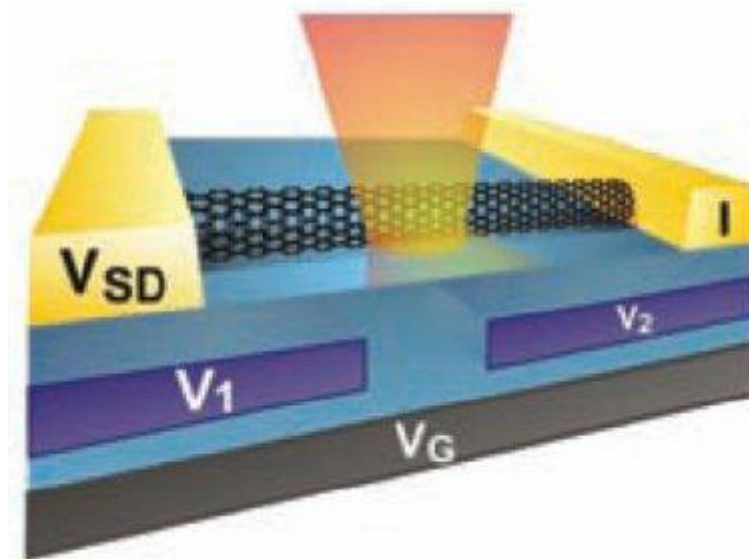


Figura 11 – Representação da célula de nanotubos. Fonte: (KARAGIORGIS, 2014)

3.1.5 Células Fotovoltaicas de Concentração (CPV)

As células CPV utilizam lentes ou espelhos para concentrar a luz solar em uma área pequena da célula fotovoltaica. Essa concentração de luz aumenta a intensidade da radiação incidente na célula, o que resulta em maior geração de energia elétrica em uma área menor. Com tal eficiência, têm potencial para reduzir o custo da energia gerada por sistemas CPV no futuro. Embora ainda em fase de desenvolvimento essa célula já atingiu a marca de 40% de aproveitamento de energia solar (FRAAS, 2010).

Embora as células sejam altamente eficientes, elas também requerem um grau maior de complexidade para sua manutenção e instalação, tais como:

- **Necessidade de Rastreamento Solar:** Os sistemas CPV exigem sistemas de rastreamento solar precisos para manter a luz solar concentrada na célula fotovoltaica. Esses sistemas aumentam a complexidade e o custo da instalação.
- **Sensibilidade à Temperatura:** A eficiência das células CPV é sensível à temperatura, e o aumento da temperatura pode reduzir significativamente o desempenho do sistema. A necessidade de sistemas de refrigeração pode aumentar o custo e a complexidade da instalação.
- **Sensibilidade a Sujeira e Sombreamento:** A concentração da luz solar torna os sistemas CPV mais sensíveis à sujeira, poeira e sombreamento, o que pode reduzir significativamente a eficiência. A limpeza frequente dos componentes ópticos pode ser necessária para garantir o desempenho do sistema.

Uma representação desse tipo de célula fotovoltaica pode ser vista na Figura 12



Figura 12 – Representação da células concentradas. Fonte: (TRIBUNE, 2011)

4 INVERSORES

O inversor fotovoltaico é um dos componentes essenciais de um sistema solar, responsável por converter a energia gerada pelos módulos solares em corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), a qual é consumida pelos dispositivos elétricos e injetada na rede elétrica. A evolução dessa tecnologia está intrinsecamente ligada ao crescimento do mercado de energia solar. Nos primeiros anos, os inversores fotovoltaicos eram equipamentos simples e com baixo desempenho, mas à medida que o mercado se expandiu e a demanda por sistemas mais eficientes aumentou, esses dispositivos passaram a se tornar mais sofisticados, compactos e com melhor eficiência. Originalmente, os inversores eram grandes e caros, destinados principalmente a grandes usinas solares, mas com o tempo, sua miniaturização e redução de custos permitiram que fossem aplicados em residências e pequenos comércios, ampliando o acesso à energia solar.

A função primária de um inversor fotovoltaico é converter a corrente contínua gerada pelos painéis solares em corrente alternada, mas seus papéis vão além disso. Inversores modernos possuem funções de otimização, monitoramento, proteção e até comunicação com a rede elétrica. O desempenho do inversor é fundamental para a eficiência de um sistema fotovoltaico, sendo que inversores de alta eficiência, com taxas de conversão de até 98

Além de melhorar a eficiência, a evolução dos inversores tem sido marcada pela digitalização e integração com novas tecnologias. Muitos inversores modernos permitem o monitoramento remoto do sistema, com dados sobre o desempenho em tempo real, alertas sobre falhas ou perdas de eficiência e relatórios sobre a produção de energia. Essa conectividade também permite a comunicação bidirecional com as redes elétricas, ajudando a balancear a produção de energia com as necessidades da rede, algo fundamental em redes inteligentes (smart grids). O avanço dos inversores também se dá na integração com sistemas de armazenamento de energia, como baterias, permitindo que a energia gerada durante o dia seja armazenada e utilizada à noite ou em períodos de baixa geração, aumentando a eficiência e a autonomia do sistema.

Os inversores também estão acompanhando a tendência de sistemas fotovoltaicos modulares e personalizáveis, com microinversores sendo instalados em cada módulo solar. Esses dispositivos permitem otimizar a produção de energia individualmente para cada painel, o que é especialmente útil em situações de sombreamento parcial, onde o desempenho de um inversor convencional pode ser comprometido devido ao baixo rendimento de uma única string de módulos. Dessa forma, os microinversores garantem maior produção de energia, mesmo quando algumas partes do sistema são afetadas por sombras ou sujeira. Com o avanço dessas tecnologias, os inversores fotovoltaicos estão se tornando dispositivos

ainda mais inteligentes, eficientes e flexíveis, possibilitando o crescimento e a popularização dos sistemas fotovoltaicos em diversos setores, tanto em grandes instalações quanto em residências e empresas de pequeno porte.

O futuro dos inversores fotovoltaicos é promissor, com a contínua evolução das tecnologias solares, da integração com sistemas de armazenamento e das redes elétricas inteligentes. A busca por maior eficiência, menor custo e melhor desempenho será sempre o foco da pesquisa e desenvolvimento nesta área, tornando os inversores cada vez mais fundamentais para a transição global para fontes de energia renovável e sustentáveis.

4.1 Central ou String

O inversor string é um tipo de inversor amplamente utilizado em sistemas fotovoltaicos de médio e grande porte, e sua principal função é converter a corrente contínua (CC) gerada pelos módulos solares em corrente alternada (CA), compatível com a rede elétrica ou com os dispositivos de consumo. Em um sistema com inversor string, os módulos fotovoltaicos são agrupados em strings (sequências de painéis solares conectados em série), e o inversor se conecta a essas strings para realizar a conversão de energia. Esse tipo de inversor é popular devido à sua eficiência, custo relativamente mais baixo e capacidade de atender a uma ampla gama de sistemas fotovoltaicos.

Um dos componentes mais importantes do inversor string é o MPPT (Maximum Power Point Tracking), ou Rastreador de Ponto de Máxima Potência. O MPPT é uma tecnologia fundamental que permite otimizar a produção de energia do sistema fotovoltaico, ajustando constantemente a operação do inversor para que ele opere no ponto de máxima eficiência, ou seja, no ponto onde a geração de energia do painel solar é maximizada. Como a irradiância solar e a temperatura podem variar ao longo do dia, o MPPT ajusta a tensão e a corrente de operação do inversor para garantir que o sistema esteja sempre produzindo a quantidade máxima de energia disponível, independentemente das condições climáticas ou de sombreamento. Isso aumenta significativamente a eficiência do sistema fotovoltaico, especialmente em situações de variações de luz, como em dias nublados ou em condições de sombreamento parcial.

Além da função principal de conversão de energia e otimização de geração, os inversores string modernos vêm equipados com vários dispositivos de proteção para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema fotovoltaico. Um dos principais dispositivos de proteção encontrados nos inversores modernos é o AFCI (Arc Fault Circuit Interrupter), ou Disjuntor de Falha de Arco. O AFCI é projetado para detectar falhas de arco elétrico, que podem ocorrer devido a conexões defeituosas, fios danificados ou outras falhas no sistema fotovoltaico. Essas falhas de arco podem gerar altas temperaturas, aumentando o risco de incêndios. Ao detectar um arco elétrico, o AFCI desliga automaticamente o circuito, prevenindo incêndios e outros danos ao sistema. Esse dispositivo é especialmente importante

para garantir a segurança das instalações fotovoltaicas, cumprindo com as regulamentações e normas de segurança, como as estabelecidas pela NEC (National Electrical Code) nos Estados Unidos.

Além do AFCI, outros dispositivos de proteção comuns em inversores string incluem proteção contra sobrecarga e curto-circuito, proteção contra sobretensão e subtensão, e fusíveis. A proteção contra sobrecarga e curto-circuito é essencial para garantir que o inversor não seja danificado caso ocorra um problema no sistema, como uma falha em uma das strings de módulos ou uma sobrecarga elétrica. A proteção contra sobretensão e subtensão garante que o inversor operará apenas dentro das faixas de tensão segura, protegendo o equipamento de danos devido a variações de tensão na rede elétrica ou no sistema fotovoltaico. Essas proteções são importantes não apenas para a segurança do inversor, mas também para a integridade do sistema fotovoltaico como um todo.

O inversor string também desempenha um papel fundamental no gerenciamento da geração de energia dos módulos fotovoltaicos. Cada string de módulos solares está conectada ao inversor, e o inversor monitora a corrente e a tensão de cada string para garantir que o sistema esteja funcionando de forma otimizada. Caso uma das strings esteja gerando menos energia devido a sombreamento, sujeira ou outros fatores, o inversor ajusta a operação de todas as strings para compensar essa perda, garantindo que a geração total de energia do sistema seja maximizada. Além disso, em sistemas maiores, o inversor string pode ser configurado para lidar com várias strings de módulos, permitindo uma melhor distribuição da carga e aumentando a eficiência geral do sistema.

Por fim, a parte técnica do inversor string envolve o controle preciso da conversão de energia e o gerenciamento da eficiência do sistema fotovoltaico. O inversor string realiza a conversão de CC para CA com um alto grau de eficiência, normalmente entre 95% e 98%, o que significa que a maior parte da energia gerada pelos módulos solares é convertida em energia utilizável. A qualidade da conversão e o desempenho do inversor são cruciais para garantir que o sistema fotovoltaico atenda às expectativas de produção de energia e cumpra com os requisitos de eficiência do projeto. Com o constante avanço da tecnologia, os inversores string continuam a se tornar mais inteligentes, com maior capacidade de monitoramento e controle remoto, além de integração com sistemas de armazenamento de energia, como baterias, o que abre novas possibilidades para otimizar a geração e o consumo de energia solar.

4.2 Microinversor

Os microinversores são uma alternativa aos inversores string em sistemas fotovoltaicos, oferecendo uma série de benefícios que podem resultar em maior eficiência e confiabilidade, especialmente em instalações residenciais e comerciais com configurações mais complexas ou sujeitas a sombreamento. Diferente dos inversores string, que conectam

várias strings de módulos solares a um único inversor central, os microinversores são instalados diretamente em cada módulo fotovoltaico individualmente. Isso significa que cada módulo tem seu próprio inversor dedicado, que converte a energia gerada pelo painel de corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA) de forma independente. Esse arranjo permite que o sistema fotovoltaico opere de maneira mais eficiente, maximizando a produção de energia, mesmo em condições de sombreamento parcial ou em módulos com desempenho desigual.

Uma das principais vantagens dos microinversores é a eliminação dos efeitos de sombreamento e mismatch que afetam inversores string. Quando os módulos fotovoltaicos são conectados em série em uma string, o desempenho de todo o sistema pode ser prejudicado por sombreamento ou sujeira em apenas um painel. Isso ocorre porque, em um sistema de inversor string, a corrente de todos os módulos em uma string precisa ser igual, e qualquer variação de desempenho em um módulo afeta diretamente os outros módulos conectados na mesma string. Nos sistemas com microinversores, como cada módulo tem seu próprio inversor, o desempenho de um módulo não afeta os outros, permitindo que cada um opere de forma independente e maximize sua produção de energia. Isso resulta em um aumento significativo na eficiência geral do sistema, especialmente em instalações com áreas sombreadas ou com módulos instalados em diferentes orientações e inclinações.

Do ponto de vista técnico, os microinversores oferecem uma série de recursos avançados, como monitoramento individual de desempenho de cada módulo. Como cada módulo está conectado a um inversor dedicado, é possível monitorar a geração de energia de cada painel de forma independente, permitindo detectar problemas rapidamente, como falhas em um módulo, baixo desempenho devido a sujeira ou sombreamento, ou defeitos no próprio inversor. Esse monitoramento preciso facilita a manutenção e pode ajudar a identificar falhas no sistema antes que elas se tornem problemas maiores. Além disso, os microinversores geralmente possuem uma eficiência de conversão de energia semelhante ou até superior aos inversores string, com taxas de eficiência entre 95% e 98%. A eficiência do microinversor não é afetada por sombreamento ou mismatch, o que contribui para um desempenho otimizado do sistema fotovoltaico.

Em relação à divisão do circuito, os microinversores funcionam de maneira diferente dos inversores string. Em vez de conectar os módulos em série, como em um inversor string, os microinversores são instalados individualmente em cada painel fotovoltaico, formando um circuito paralelo. Cada microinversor converte a energia gerada pelo módulo em CA de forma independente. Essa configuração permite que o sistema opere de forma mais flexível, pois os módulos podem ter orientações e inclinações diferentes, e o sombreamento ou sujeira em um módulo não afetará os outros. A partir de cada microinversor, a corrente alternada gerada é conectada diretamente à rede elétrica, ou em sistemas com armazenamento de energia, pode ser enviada para as baterias ou para a rede.

Além disso, os microinversores são mais adequados para sistemas fotovoltaicos modulares e escaláveis. Como cada módulo é controlado de forma independente, é possível expandir o sistema fotovoltaico facilmente, adicionando mais módulos sem a necessidade de grandes ajustes no inversor central, como no caso dos inversores string. Isso torna os microinversores ideais para instalações residenciais e comerciais onde a capacidade do sistema pode ser aumentada gradualmente ao longo do tempo.

Outra característica importante dos microinversores é a facilidade de instalação e a menor complexidade do cabeamento. Com os inversores string, há a necessidade de um sistema de cabeamento mais complexo para conectar as strings de módulos ao inversor central, enquanto os microinversores eliminam a necessidade de strings, pois cada módulo tem seu próprio inversor. Isso simplifica a instalação, reduz os custos de cabeamento e torna o sistema mais fácil de manter e expandir.

Embora os microinversores ofereçam diversas vantagens, como maior eficiência em condições de sombreamento e monitoramento individual de cada módulo, eles também apresentam alguns pontos negativos. O custo inicial de um sistema com microinversores tende a ser mais elevado em comparação aos inversores string, devido à necessidade de um inversor para cada módulo fotovoltaico. Isso pode resultar em um custo mais alto de aquisição e instalação, especialmente em sistemas grandes. Além disso, a instalação de múltiplos microinversores pode aumentar a complexidade do sistema elétrico, exigindo mais manutenção e possíveis substituições de inversores ao longo do tempo, o que pode ser mais dispendioso do que a substituição de um único inversor central. Outro ponto negativo é que, como cada microinversor é um dispositivo eletrônico independente, ele está sujeito a falhas individuais, o que pode gerar custos adicionais para a substituição de inversores defeituosos, enquanto em um sistema de inversor string, apenas o inversor central precisaria ser substituído caso houvesse uma falha.

5 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Os sistemas fotovoltaicos, também conhecidos como sistemas solares fotovoltaicos, consistem em múltiplos componentes que colaboram para converter a energia solar em eletricidade utilizável. Eles são predominantemente empregados para a geração de energia elétrica a partir da radiação solar e podem ser implementados em residências, estabelecimentos comerciais, indústrias, bem como em centrais solares. Em sequência apresenta-se os componentes principais do sistema.

5.1 Módulos Fotovoltaico

Em resumo, os módulos constituem o núcleo do sistema, sendo formados por células fotovoltaicas, as quais podem ser interligadas em série ou em paralelo a fim de converter a irradiância solar em energia elétrica. A quantidade de módulos necessários será determinada pela potência almejada para o sistema. Nos capítulos à frente foram ilustrados os módulos utilizados para o estudo de caso.

5.2 Inversor

A escolha do inversor para um projeto fotovoltaico é um dos passos mais importantes no dimensionamento do sistema, pois ele impacta diretamente na eficiência e no desempenho da instalação. Ao selecionar o inversor, é necessário considerar diversos fatores, como a potência do sistema, o tipo de instalação (residencial, comercial ou industrial), a quantidade de módulos fotovoltaicos, as condições ambientais e o tipo de conexão com a rede elétrica. Para sistemas maiores, o inversor string pode ser mais adequado, pois oferece uma solução econômica e robusta, com a capacidade de conectar múltiplos módulos em série. Já para sistemas menores ou em locais com sombreamento frequente, os microinversores podem ser uma melhor opção, pois permitem monitoramento individual e mitigação dos efeitos de perdas em um único módulo. Além disso, é importante garantir que o inversor seja compatível com os requisitos técnicos do projeto, como a tensão de operação dos módulos e o tipo de onda de saída (seja senoidal pura ou modificada). A eficiência do inversor, o tipo de MPPT (rastreador de ponto de máxima potência) e os dispositivos de proteção, como o AFCI (Arc Fault Circuit Interrupter), também devem ser analisados, pois contribuem para a segurança e o desempenho do sistema fotovoltaico.

5.3 Estruturas de Montagem

A estrutura de suporte ou fixação metálica é o componente responsável por sustentar e fixar os módulos fotovoltaicos em sua posição adequada, seja em telhados, terrenos

ou outras superfícies. Essas estruturas devem ser projetadas para suportar as condições climáticas locais, como vento e carga de neve, garantindo a segurança e estabilidade do sistema, um exemplo dessa estrutura é a Figura 13



Figura 13 – Exemplo de estrutura de fixação. Fonte: (MASTER, 2021)

5.4 Cabos

Os cabos desempenham a função de interligar os distintos componentes do sistema fotovoltaico, incluindo os módulos solares, o inversor e os sistemas de armazenamento de energia. Ademais, eles são responsáveis por conduzir a corrente elétrica produzida pelos painéis fotovoltaicos até o inversor e, posteriormente, até o ponto de utilização. Os cabos são especialmente projetados para resistir a condições externas, como sol, chuva e intempéries. São frequentemente feitos de materiais como cobre ou alumínio.

5.5 Dispositivos de Proteção (Fusíveis e Disjuntores)

O quadro de proteção contém dispositivos de proteção e controle, tais como o DPS (Dispositivo de Proteção contra Surtos), disjuntor, fusível e chave seccionadora. Tais dispositivos são imprescindíveis para assegurar a segurança do sistema, oferecendo proteção

contra sobrecargas, curtos-circuitos e surtos de tensão, e atuando mediante a interrupção do fluxo de corrente em situações de falha. Um exemplo apresenta-se abaixo pela Figura 14.

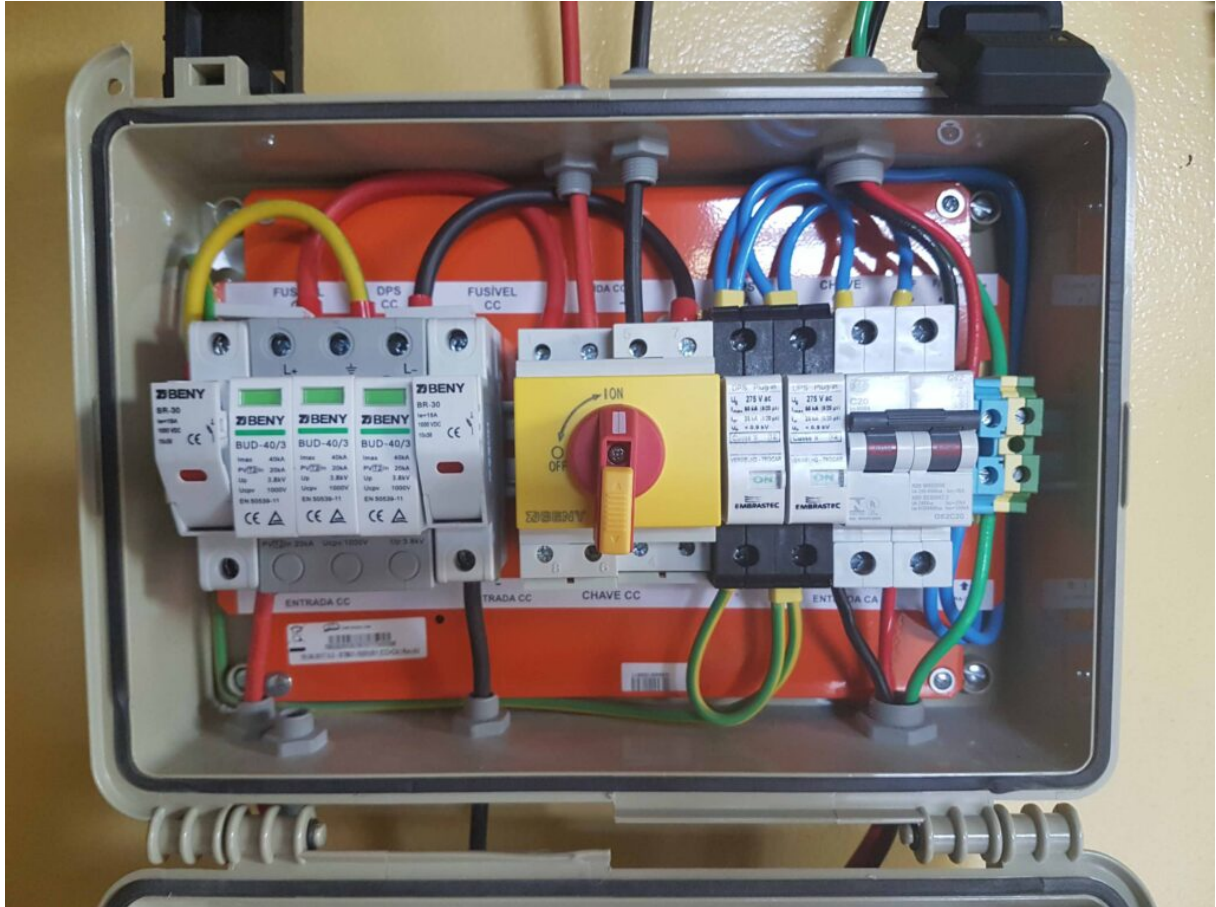


Figura 14 – Exemplo de um quadro de proteção. Fonte: (MASTER, 2021)

5.6 Sistema de Monitoramento

O sistema de monitoramento é incumbido da coleta e registro dos dados de desempenho do sistema fotovoltaico, incluindo a geração de energia, a tensão e a corrente em tempo real. Tais informações são fundamentais para o monitoramento e manutenção do sistema, possibilitando a identificação de eventuais falhas ou problemas de desempenho.

6 PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE

6.1 Etapas preliminares de projeto de um sistema fotovoltaico

O crescimento da demanda por energia renovável tem impulsionado o uso de sistemas fotovoltaicos como uma alternativa sustentável e economicamente viável. Um dimensionamento correto desses sistemas é essencial para garantir que eles atendam à demanda de energia de maneira eficiente, proporcionando o retorno econômico desejado e, ao mesmo tempo, contribuindo para a redução do impacto ambiental. Dimensionar corretamente um sistema fotovoltaico evita problemas como geração insuficiente, desperdício de recursos e aumento nos custos operacionais, que podem ocorrer devido a sub ou superdimensionamentos.

O processo de dimensionamento envolve uma série de etapas e considerações que englobam desde a análise do perfil de consumo do usuário até as condições climáticas e geográficas da região onde o sistema será instalado. Esses fatores afetam diretamente a quantidade de energia que o sistema pode gerar ao longo do tempo. Além disso, aspectos como eficiência dos módulos, características dos inversores e tipos de instalações (on-grid ou off-grid) também devem ser cuidadosamente considerados para garantir que o sistema atinja o desempenho esperado.

Existem diversas metodologias para dimensionar sistemas fotovoltaicos, cada uma adequada a diferentes tipos de aplicação e objetivos de projeto. Uma das metodologias mais comuns é o método de balanço energético, que se baseia na análise da demanda de consumo e na geração esperada, considerando dados históricos de radiação solar e estimativas de desempenho dos módulos. Outra metodologia amplamente utilizada é o dimensionamento baseado em softwares específicos, que simula diferentes cenários e possibilita a otimização do sistema com base em variáveis específicas de cada projeto. Além dessas, metodologias mais avançadas incluem o uso de inteligência artificial e aprendizado de máquina para prever demandas e otimizar o desempenho energético do sistema.

Por meio do entendimento e aplicação de uma metodologia adequada, o projetista é capaz de desenvolver soluções que maximizam a eficiência do sistema, garantindo tanto a sustentabilidade econômica quanto ambiental do projeto fotovoltaico.

6.1.1 Estudo do recurso Solar

Na fase de dimensionamento de um sistema fotovoltaico, é crucial quantificar a radiação solar global que incide sobre os painéis, pois esse dado determina a capacidade de geração de energia ao longo do ano. No entanto, nem sempre os dados de radiação solar estão disponíveis de forma precisa ou no formato ideal para o projeto, principalmente em

regiões onde há poucas estações meteorológicas ou registros incompletos. Para contornar essa limitação, utilizam-se métodos de tratamento e estimativa de dados que permitem obter as grandezas necessárias para um dimensionamento preciso.

Os dados de radiação solar podem ser apresentados como valores instantâneos de fluxo de potência, conhecidos como irradiância, ou como valores de energia por unidade de área com diferentes períodos de integração, denominados irradiação. Normalmente, a radiação solar é expressa em termos de valores médios mensais para a energia acumulada ao longo de um dia, o que facilita a análise e o planejamento de sistemas fotovoltaicos. Outra prática comum é a utilização de um "Ano Meteorológico Padrão" (ou TMY — Typical Meteorological Year, em inglês), que é construído a partir de informações meteorológicas coletadas ao longo de vários anos. Esse conjunto de dados típicos representa as condições climáticas médias de um local e permite realizar simulações de desempenho mais realistas, considerando variações sazonais e comportamentos meteorológicos esperados.

As características elétricas de um gerador fotovoltaico são influenciadas pela irradiância e pela temperatura dos módulos, sendo que a irradiância exerce uma influência muito mais expressiva na geração de energia do que a temperatura. A irradiância solar pode apresentar variações rápidas e intensas, especialmente em dias parcialmente nublados, onde sombras intermitentes provocam flutuações significativas nos níveis de irradiância em questão de segundos. Em contrapartida, a variação de temperatura tende a ser mais gradual, pois a capacidade térmica dos módulos fotovoltaicos age como um amortecedor, atenuando mudanças bruscas de temperatura ao longo do dia.

Para simplificar as estimativas de produção de energia elétrica, uma abordagem prática é ignorar as flutuações instantâneas da irradiância e considerar a energia elétrica total convertida em intervalos horários. Devido à relação linear entre a energia produzida e a irradiação horária, uma medida conveniente para expressar a energia acumulada ao longo do dia é o conceito de Horas de Sol Pleno (HSP). A HSP representa o número de horas em que a irradiância solar se manteria constante e igual a 1 kW/m^2 , de forma que a energia total irradiada seja equivalente à energia real acumulada ao longo do dia. Por exemplo, se um local possui uma irradiação diária de 6 kWh/m^2 , isso corresponde a 6 horas de Sol Pleno. Esse conceito é amplamente utilizado no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, pois simplifica o cálculo da energia disponível e facilita a comparação de potencial solar em diferentes localidades. Em base mensal, a irradiação incidente no plano dos módulos é convertida para seu valor médio diário em kWh/m^2 e, em seguida, utiliza-se o valor numérico como HSP.

6.1.2 Localização

Mesmo em regiões com recursos solares uniformes, a escolha do local de instalação dos painéis fotovoltaicos pode ter um grande impacto no desempenho do sistema. Fatores

como a integração com a arquitetura local, a presença de sombreamento de árvores, edifícios ou outros objetos e a existência de superfícies reflexivas próximas podem reduzir significativamente a eficiência do sistema. A sombra, mesmo que parcial e em curtos períodos do dia, pode causar perdas substanciais na geração de energia, especialmente em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, onde a menor queda de desempenho pode comprometer o retorno do investimento. Além disso, superfícies reflexivas, como telhados metálicos ou vidros próximos, podem aumentar a quantidade de radiação refletida em direção aos módulos, influenciando o rendimento, embora com efeitos variáveis dependendo da intensidade e do ângulo de reflexão.

6.1.3 Escolha da configuração

Dimensionar um projeto fotovoltaico para uma configuração on-grid, off-grid ou híbrida exige abordagens distintas, especialmente no que se refere à análise da demanda de energia, ao cálculo da capacidade de geração e ao investimento necessário. No caso de sistemas on-grid, o dimensionamento geralmente é mais simples, pois a principal preocupação é calcular a quantidade de energia que será consumida e comparar com a geração estimada. O excedente de energia gerado é injetado na rede, o que permite ao usuário compensar o consumo em períodos de menor produção solar, como à noite. Por isso, o foco está em garantir que o sistema gere energia suficiente para cobrir a maior parte do consumo diário, sem a necessidade de incluir armazenamento. O dimensionamento é mais econômico, pois não exige baterias ou sistemas de controle complexos, tornando-o uma opção atrativa em áreas com boa disponibilidade da rede elétrica.

Já no caso de sistemas off-grid, o dimensionamento se torna mais complexo e custoso, pois é necessário considerar não apenas a geração de energia, mas também o armazenamento dessa energia para garantir que o usuário tenha eletricidade disponível em períodos sem sol, como à noite ou em dias nublados. O cálculo envolve a análise detalhada do perfil de consumo, levando em conta o consumo diário e sazonal, além da escolha do número e capacidade das baterias que serão necessárias para armazenar a energia. Esse tipo de sistema exige um planejamento mais rigoroso para garantir a autonomia do usuário, já que a ausência de conexão com a rede elétrica implica na necessidade de um sistema de armazenamento eficiente e capaz de suportar períodos prolongados sem geração solar. Além disso, a manutenção das baterias e a substituição periódica delas geram custos operacionais adicionais ao longo da vida útil do sistema.

No dimensionamento de sistemas híbridos, que combinam a rede elétrica e o armazenamento de energia, o processo é uma combinação das abordagens para sistemas on-grid e off-grid. O sistema híbrido requer a consideração da capacidade de geração de energia, mas também demanda o cálculo do número de baterias necessárias para garantir a disponibilidade de energia durante períodos de baixa irradiância ou falhas na rede elétrica.

A integração de baterias com a rede traz uma flexibilidade adicional, permitindo que o usuário utilize a rede quando necessário, mas também tenha energia armazenada para momentos em que a geração solar não seja suficiente. O dimensionamento de um sistema híbrido, portanto, envolve uma análise cuidadosa do perfil de consumo, da capacidade de geração solar e da demanda por armazenamento, além de considerar as vantagens econômicas de usar a rede como backup. Embora o custo inicial seja maior que o de um sistema on-grid, ele tende a ser mais baixo que o de um sistema off-grid, tornando-o uma opção intermediária em termos de custos e benefícios.

6.1.4 Levantamento da Demanda

O primeiro passo para o projeto de um sistema fotovoltaico on-grid adequado é a análise detalhada da conta de energia do local onde a instalação será realizada e o sistema será conectado à concessionária de energia. Essa análise permite entender o perfil de consumo energético do usuário, que é crucial para dimensionar corretamente o sistema fotovoltaico. Para ilustrar esse processo, consideremos o histórico de consumo extraído da conta de energia de um consumidor na cidade de Campinas, que está sob a concessão da CPFL Paulista, com base nos últimos 12 meses. Esse histórico fornecerá informações essenciais sobre o padrão de consumo, como variações sazonais, picos de demanda e a média de energia consumida, dados que são essenciais para o cálculo da geração necessária do sistema fotovoltaico.



Figura 15 – Histórico de consumo

A média de consumo mensal dessa instalação nos últimos 12 meses foi de 844 kWh. Observamos que, em dois meses específicos — julho e outubro de 2024 — o consumo foi significativamente superior à média. No entanto, esses picos de consumo têm pouca relevância no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos interligados com a concessionária de energia, devido ao sistema de compensação de créditos de energia. O sistema de compensação de créditos de energia funciona com base na legislação e regulamentações estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pela Lei 14.300/2022,

que instituiu o "Marco Legal da Geração Distribuída". De acordo com as normas da CPFL Paulista e da ANEEL, quando um sistema fotovoltaico é instalado e interligado à rede elétrica, ele pode gerar mais energia do que o necessário para o consumo da unidade consumidora, especialmente em períodos de baixa demanda, como em dias ensolarados. O excedente gerado é injetado na rede elétrica da concessionária, que, por sua vez, credita essa energia na conta do consumidor. Esses créditos podem ser utilizados para abater o consumo de energia nos meses seguintes, quando a geração do sistema fotovoltaico for menor do que o consumo.

O crédito gerado pela energia injetada na rede tem validade de 60 meses (5 anos) e pode ser usado para compensar o consumo de energia elétrica em unidades consumidoras do mesmo titular, podendo ser de diferentes endereços dentro da área de concessão da CPFL Paulista, desde que sejam da mesma titularidade. Ou seja, se o consumidor tiver mais de uma propriedade dentro da área de concessão, ele pode transferir os créditos de uma instalação para outra, proporcionando uma flexibilidade maior no uso da energia gerada. No entanto, a compensação dos créditos ocorre apenas dentro do mesmo ciclo de medição de energia, e o saldo de créditos acumulado pode ser utilizado a qualquer momento dentro do período de validade.

De acordo com a Lei 14.300/2022, a compensação dos créditos gerados é feita com base em uma fórmula que leva em consideração a energia consumida, a energia injetada e a tarifa da concessionária. A energia consumida é descontada da energia gerada, e o saldo restante é utilizado para compensar o valor devido à concessionária. É importante observar que a CPFL Paulista realiza esse processo de compensação de maneira automática, calculando o crédito gerado e aplicando-o na conta do consumidor. Caso o crédito acumulado não seja suficiente para cobrir o consumo do mês, o consumidor paga apenas a diferença. Esse sistema de compensação tem se mostrado uma solução econômica, já que permite que os consumidores utilizem a energia solar de maneira mais eficiente e com um custo reduzido, além de contribuir para a sustentabilidade energética, incentivando o uso de fontes renováveis. Portanto, com base no histórico de consumo apresentado, o projeto fotovoltaico será dimensionado para uma capacidade de geração média de 844 kWh/mês, considerando um período de 12 meses.

6.2 Dimensionamento de sistema fotovoltaico conectado à rede

6.2.1 Local da Instalação

Neste estudo, vamos considerar a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede na cidade de Campinas, SP. Para calcular a geração estimada desse sistema, utilizamos dados de irradiância solar específicos da região. Esses dados foram obtidos no site do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB), que pertence ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobras (Cepel). O site fornece

a média diária de irradiação solar em kWh/m².dia para cada mês do ano, com base nas coordenadas geográficas da instalação. Neste caso, adotamos as coordenadas de referência da Unicamp (-22.818439°, -47.064721°).

Os valores de irradiação solar fornecidos abaixo pela Figura 16 e 17 representam a incidência sobre um plano horizontal. Portanto, para o dimensionamento do sistema fotovoltaico, vamos considerar essa base de dados para refletir as condições reais de irradiação em Campinas. Essa abordagem será aplicada ao posicionamento dos módulos no plano horizontal, garantindo precisão na estimativa de geração energética para o local.

Latitude: 22.818439° S
Longitude: 47.064721° O

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m².dia]																	
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta	
<input checked="" type="checkbox"/>	Campinas	Campinas	SP	BRASIL	22.801° S	47.049° O		2,5	5,60	5,81	5,14	4,66	3,82	3,58	3,74	4,66	4,86	5,50	5,71	6,16	4,94	2,58
<input checked="" type="checkbox"/>	Paulinia	Paulinia	SP	BRASIL	22.801° S	47.149° O		8,9	5,62	5,81	5,15	4,66	3,80	3,57	3,73	4,64	4,86	5,48	5,73	6,19	4,94	2,61
<input checked="" type="checkbox"/>	Campinas	Campinas	SP	BRASIL	22.901° S	47.049° O		9,3	5,60	5,75	5,09	4,62	3,79	3,54	3,71	4,61	4,84	5,48	5,68	6,12	4,90	2,59

Figura 16 – Irradiância

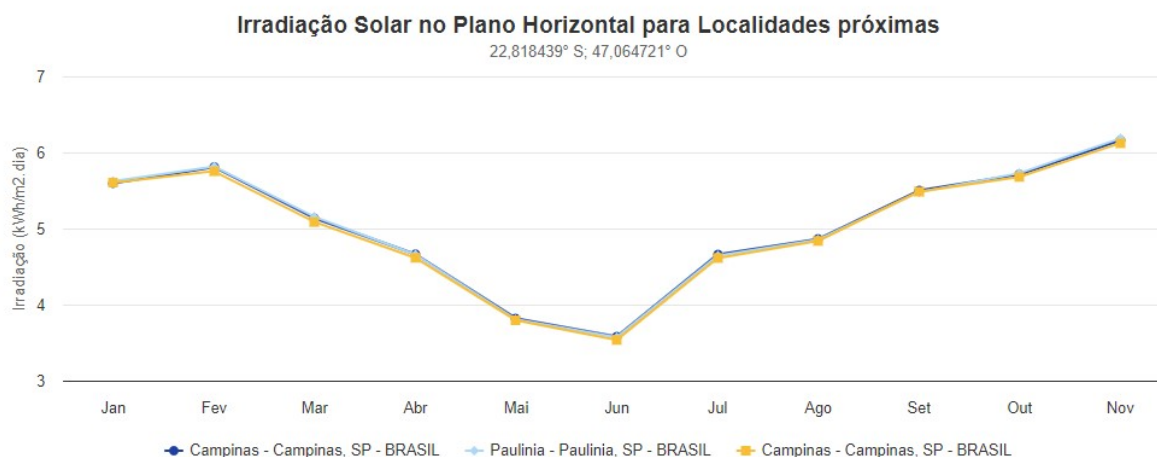


Figura 17 – Irradiância sobre o plano horizontal

A seguir, é apresentada uma imagem real, Figura 18 que ilustra a instalação dos módulos fotovoltaicos conforme a configuração escolhida para os cálculos deste estudo. A representação visual busca refletir fielmente a disposição dos módulos, levando em conta aspectos como orientação e inclinação que visam representar a captação da irradiação solar na região de instalação. Esse detalhamento contribui para uma análise mais precisa da geração energética esperada, alinhada às condições locais.



Figura 18 – Direção e inclinação da instalação

6.2.2 Cálculo de geração do módulo fotovoltaico

Nesta seção, será calculada a quantidade média anual de energia gerada por um módulo fotovoltaico, considerando os dados referentes ao período de janeiro a dezembro. O módulo fotovoltaico escolhido é o modelo RSM130-8-430M-450M Titan High Performance Monocrystalline perc module, da fabricante chinesa Risen, com potência máxima de 445Wp, cujas especificações técnicas estão detalhadas na referência deste trabalho.

A geração de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos é um processo que depende diretamente de fatores ambientais e das características intrínsecas dos módulos. A principal equação utilizada para descrever a produção de energia de um módulo fotovoltaico é dada pela equação X. conforme apresentada por (DUFFIE; BECKMAN; BLAIR, 2020). A Equação 6.1 integra parâmetros essenciais para o cálculo, incluindo a área do módulo (A), a irradiância solar incidente no plano do módulo (G), a eficiência de conversão (η) e os efeitos da temperatura na eficiência do módulo.

$$E = A \times G \times \eta \times (1 - \beta(T_{OP} - T_{REF})) \quad (6.1)$$

A eficiência dos módulos fotovoltaicos é influenciada pela temperatura operacional (T_{OP}) que é determinada pelas condições climáticas locais e pela temperatura ambiente (T_{AMB}). O aumento da temperatura pode reduzir a eficiência de conversão, efeito representado pelo coeficiente de temperatura (β), um parâmetro específico fornecido pelos fabricantes de módulos. A temperatura operacional pode ser estimada pela Equação 6.2

abaixo, onde NOCT (Temperatura Nominal de Operação da Célula) é outro parâmetro técnico relevante para simulações realistas.

$$T_{OP} = T_{AMB} + \left(\frac{NOCT - 20}{800} G \right) \quad (6.2)$$

Adicionalmente, a irradiância solar (G) é um fator crítico na equação, pois varia ao longo do dia, das estações do ano e em função da localização geográfica do sistema. Para maximizar a produção de energia, é importante considerar a orientação e inclinação dos módulos, que influenciam diretamente a quantidade de energia solar captada. A integração desses fatores no modelo matemático permite estimar com maior precisão a energia gerada por um sistema fotovoltaico em diferentes condições ambientais.

O uso dessa equação é amplamente aceito na literatura técnica e em ferramentas computacionais, como o PVWatts Calculator, desenvolvido pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL). Essas metodologias possibilitam a avaliação de desempenho de sistemas solares em etapas de projeto, contribuindo para decisões estratégicas e garantindo maior confiabilidade nos estudos de viabilidade econômica e energética de instalações fotovoltaicas.

Com o módulo fotovoltaico selecionado e as características do local de instalação definidas, é possível aplicar a equação apresentada para calcular a quantidade de energia gerada por cada módulo na configuração específica. Essa abordagem permite considerar fatores como a irradiância solar local, a eficiência do módulo e as condições térmicas do ambiente, garantindo maior precisão na estimativa de geração energética.

De acordo com a ficha técnica do módulo, suas dimensões são $1,894m \times 1,053m$ sendo sua área $A = 1,994m^2$ e eficiência $\eta = 21,4\%$, nas condições STC: Irradiance $1000W/m^2$, Cell Temperatura $25^\circ C$, Air Mass AM 1.5 according to EN 60904-3. O coeficiente de perda de eficiência por aumento de temperatura β vale $\beta = -0,34\%/^\circ C$. Os dados utilizados para irradiância (G) estão apresentados na Figura 4, serão utilizados os dados da primeira linha da tabela.

Para o cálculo da T_{op} , será considerada a temperatura ambiente média fornecida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a cidade de Piracicaba, que possui a estação meteorológica mais próxima do local da instalação. Os dados disponibilizados incluem as temperaturas máxima, mínima e média registradas para o mês escolhido. Abaixo, é apresentada a Figura 19 com as informações referentes a janeiro de 2023.

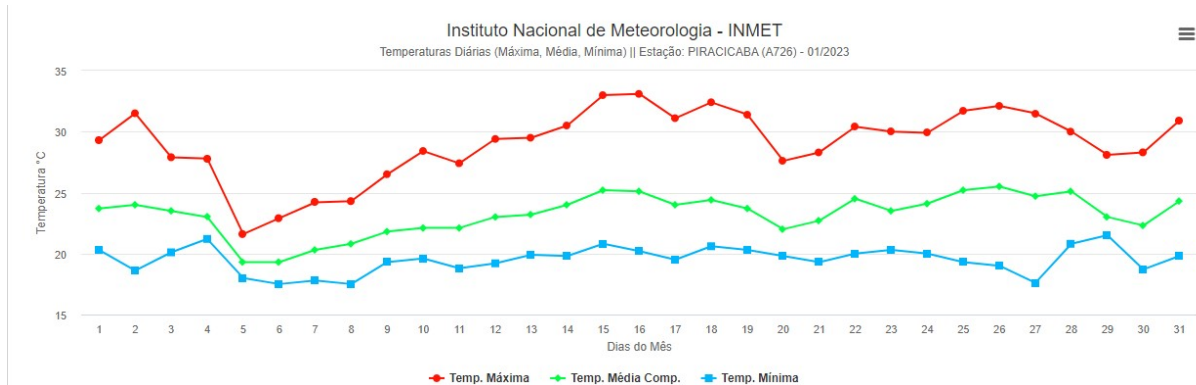


Figura 19 – Temperatura Média em Janeiro para a cidade de Piracicaba

Para calcular a média anual esperada, serão utilizados os valores médios mensais registrados de janeiro a dezembro de 2023 com T_{amb} extraída a partir dos dados fornecidos pelo INMET. O módulo em análise possui uma Temperatura Nominal de Operação da Célula (NOCT) = 44°C.

Com base nos dados apresentados, podemos utilizar a equação 2 para calcular a temperatura de operação do módulo T_{OP} e, a partir disso, elaborar a Tabela 1, que apresenta os valores de T_{OP} para o projeto, considerando os meses de janeiro a dezembro de 2023.

Temperatura de operação do módulo fotovoltaico			
Mês de referência	T_{amb} média (°C)	G (KWh/m^2)	T_{OP} (°C)
Janeiro	23,16	5,6	23,32
Fevereiro	23,63	5,81	23,80
Março	24,04	5,14	24,19
Abril	21,38	4,66	21,52
Maio	19,10	3,82	19,21
Junho	17,38	3,58	17,49
Julho	18,15	3,74	18,26
Agosto	20,52	4,66	20,66
Setembro	24,33	4,86	24,47
Outubro	23,65	5,5	23,81
Novembro	24,98	5,71	25,14
Dezembro	25,86	6,16	26,04

Tabela 1 – Temperatura de operação do módulo fotovoltaico

Com os valores obtidos para a temperatura de operação do módulo, podemos aplicar a equação 1 para calcular a energia gerada por cada módulo fotovoltaico ao longo do período de janeiro a dezembro de 2023, indicada na Tabela 2. Para a equação utilizamos a área $A = 1,994m^2$ do módulo, a irradiância G obtida no site do Centro de Referência

para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB), $\eta = 21,4\%$, $\beta = -0,34\%^\circ\text{C}$, T_{OP} obtido na Tabela 1 e $T_{REF} = 25^\circ\text{C}$.

Energia gerada por 1 módulo fotovoltaico			
Mês de referência	G (KWh/m^2)	T_{OP} ($^\circ\text{C}$)	E($\text{KWh}/\text{mês}$)
Janeiro	5,60	23,32	71,28
Fevereiro	5,81	24,19	69,13
Março	5,14	24,19	67,80
Abril	4,66	21,52	58,94
Maio	3,82	19,21	49,53
Junho	3,58	17,49	44,65
Julho	3,74	18,26	48,34
Agosto	4,66	20,66	60,73
Setembro	4,86	24,47	62,10
Outubro	5,50	23,81	72,46
Novembro	5,71	25,14	73,13
Dezembro	6,16	26,04	81,77

Tabela 2 – Energia gerada por 1 módulo fotovoltaico

Considerando o período de geração de janeiro a dezembro de 2023, a média de produção de energia de um módulo fotovoltaico foi de 63,52 kWh por mês. É importante destacar que neste cálculo não foram consideradas perdas de geração, exceto aquelas relacionadas à variação de temperatura. Outros fatores que podem impactar a geração de energia serão abordados no Capítulo 8. Com base nessa média de geração, para atender a um consumo estimado de 844 kWh por mês, seria necessário instalar, no mínimo, 14 módulos fotovoltaicos.

6.2.3 Escolha do inversor

A escolha do inversor em um sistema fotovoltaico é fundamental para garantir que o sistema opere com eficiência e atenda às expectativas de geração de energia. Entre os principais fatores a serem considerados estão as características técnicas do inversor, a compatibilidade com os módulos fotovoltaicos, as condições do local de instalação e o orçamento disponível. Esses aspectos desempenham um papel crucial na definição do tipo de inversor mais adequado para o projeto.

Um dos pontos mais importantes é a compatibilidade elétrica entre os módulos fotovoltaicos e o inversor. É essencial verificar se os valores de tensão e corrente do sistema estão dentro dos limites operacionais do inversor, especialmente considerando variações sazonais e ambientais. O inversor deve ser capaz de suportar a potência total gerada pelos módulos, além de operar dentro de uma faixa eficiente de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). Isso garante que a conversão da energia gerada seja feita com máxima eficiência.

Para esse projeto, utilizaremos o inversor string (central) da fabricante WEG, modelo SIW300H M060 L1, a ficha técnica do inversor está anexada ao documento.

O primeiro parâmetro a ser analisado para verificar a compatibilidade dos módulos com o inversor escolhido é a corrente máxima de curto circuito por MPPT. Essa corrente é o limite máximo que o rastreador do ponto de máxima potência (MPPT) de um inversor pode suportar, considerando os módulos conectados a ele. Essa corrente é baseada na corrente de curto-circuito I_{SC} dos módulos fotovoltaicos, que é a corrente máxima que um módulo pode gerar sob irradiação total, quando seus terminais estão diretamente conectados. Embora o sistema não opere em condições de curto-circuito, essa especificação é fundamental para dimensionar corretamente os módulos no projeto. Cada MPPT de um inversor é projetado para rastrear o ponto de máxima potência ajustando a tensão e a corrente de entrada. No entanto, ele tem um limite de corrente que não pode ser ultrapassado. Se o somatório das correntes de curto-circuito dos módulos conectados a um MPPT exceder esse limite, o inversor pode operar de maneira ineficiente ou até sofrer danos. Por isso, ao conectar os módulos, especialmente em paralelo, é crucial garantir que a corrente combinada fique dentro do valor especificado pelo fabricante do inversor. O módulo em análise apresenta uma corrente de curto-circuito $I_{SC} = 10,31$ A enquanto o inversor possui capacidade para suportar até 18 A. Dessa forma, os módulos podem ser conectados em série no MPPT do inversor sem comprometer o desempenho do sistema ou a segurança da instalação.

Outro parâmetro a se analisar é a corrente de entrada máxima do módulo I_{MPP} no inversor, que é o valor limite de corrente contínua que o inversor pode receber em cada entrada, geralmente associada ao MPPT. Esse parâmetro deve ser respeitado para evitar sobrecarga, perda de eficiência ou danos ao equipamento. Os módulos possuem uma corrente de ponto de máxima potência $I_{MPP} = 11.86$ A enquanto o inversor suporta até 12,5 A por MPPT. Portanto, há plena compatibilidade entre o módulo e o inversor.

Com a compatibilidade das correntes confirmada, agora vamos analisar as tensões para determinar a quantidade máxima de módulos que podem ser conectados ao inversor. Para isso, estudaremos os quatro parâmetros mais importantes dessa análise: a faixa de operação do MPPT, a tensão de partida, a faixa de tensão MPPT em máxima potência e a tensão de entrada máxima.

A faixa de operação do MPPT refere-se ao intervalo de tensões dentro do qual o rastreador de ponto de máxima potência (MPPT) de um inversor pode operar eficientemente. O MPPT é responsável por ajustar a tensão dos módulos fotovoltaicos para garantir que o sistema esteja sempre gerando a quantidade máxima de energia possível. A faixa de operação do MPPT do inversor escolhido está entre 80 V e 600 V. Isso significa que a soma das tensões dos módulos conectados deve permanecer dentro desse intervalo. Considerando que o módulo fotovoltaico possui uma tensão máxima de circuito aberto

V_{oc} de 45,09 V, a quantidade de módulos que pode ser conectada ao MPPT, respeitando apenas a faixa de operação, varia entre 2 e 11 módulos.

Tensão de partida é a tensão mínima necessária para que o inversor inicie o processo de conversão da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos. Quando a tensão dos módulos atinge esse valor de partida, o inversor começa a operar e realizar o rastreamento do ponto de máxima potência. A tensão de partida é especialmente importante em condições de baixa irradiância, quando os módulos podem gerar uma tensão menor. O inversor em análise possui uma tensão mínima de partida de 100 V. Como a tensão de operação em máxima potência V_{mpp} do módulo é de 37,54 V, para alcançar a tensão mínima necessária para o funcionamento do inversor, é preciso conectar pelo menos 3 módulos em série em cada MPPT.

A faixa de tensão MPPT em máxima potência é o intervalo de tensões dentro do qual o MPPT consegue maximizar a geração de energia. O inversor ajusta a tensão dos módulos dentro dessa faixa para otimizar a potência extraída dos módulos fotovoltaicos. O inversor possui uma faixa de operação do MPPT entre 90 V e 560 V. Considerando que a tensão de máxima potência V_{mpp} de cada módulo é de 37,54 V, o número de módulos que podem ser conectados em série, mantendo a operação dentro dessa faixa, varia entre 3 e 11.

A tensão de entrada máxima é o valor máximo de tensão que o inversor pode receber dos módulos fotovoltaicos sem sofrer danos. Exceder essa tensão pode causar sobrecarga no inversor, prejudicando seu funcionamento e até danificando componentes internos. O projeto do sistema deve garantir que a tensão combinada dos módulos conectados ao inversor esteja sempre abaixo deste limite, mesmo em condições de alta irradiância ou baixa temperatura, que podem aumentar a tensão gerada pelos módulos. A tensão máxima de entrada do inversor é de 600 V, e a tensão máxima em circuito aberto V_{oc} de cada módulo é de 45,09 V. Assim, o inversor suporta a conexão de até 11 módulos em série por MPPT, garantindo que a tensão total não exceda o limite permitido.

Portanto, para o inversor escolhido podemos conectar de 3 a 11 módulos por MPPT que vamos respeitar todas as configurações de corrente e tensão. Outro fator importante que limita a quantidade máxima de módulos que podemos ligar no inversor é a potência máxima de entrada, respeitar a potência máxima de entrada do inversor é fundamental para garantir a segurança, a eficiência e a durabilidade do sistema fotovoltaico. Quando a potência dos módulos conectados ultrapassa o limite especificado pelo fabricante, o inversor pode operar de forma inadequada, desligar-se automaticamente ou até sofrer danos permanentes devido à sobrecarga.

Além disso, sobrecarregar o inversor pode resultar em superaquecimento dos seus componentes internos, reduzindo sua vida útil e comprometendo a produção de energia ao longo do tempo. O desempenho do sistema também é afetado, já que o inversor é

projetado para operar dentro de uma faixa de potência ideal, e exceder essa faixa pode levar à saturação e a perdas de eficiência. Outro ponto importante é que trabalhar acima da capacidade do inversor pode aumentar o risco de falhas elétricas, como curtos-circuitos ou até mesmo incêndios, colocando em perigo não apenas o equipamento, mas também a segurança do local. Além disso, operar fora das especificações técnicas pode invalidar a garantia do fabricante, gerando prejuízos financeiros em caso de problemas futuros.

O inversor escolhido possui uma potência máxima de entrada de $P_{max} = 9\text{KW}$. Considerando que cada módulo em análise tem uma potência de pico P_{mod} de $0,445\text{KW}$ podemos determinar o número máximo de módulos conectados ao inversor, Equação 6.3. Portanto:

$$N_{mod} = \frac{P_{max}}{P_{mod}} = \frac{9}{0,445} = 20,22 \quad (6.3)$$

Portanto, considerando os dois MPPTs disponíveis e respeitando a potência máxima de entrada do inversor, é possível conectar no máximo 20 módulos.

6.2.4 Montagem do kit

Para a instalação do projeto fotovoltaico, é fundamental montar o kit com os equipamentos necessários, garantindo que todos os componentes estejam disponíveis na quantidade e especificação adequadas. Nesta seção, será realizado o dimensionamento detalhado de cada material necessário para a instalação do sistema, considerando aspectos como o número de módulos fotovoltaicos, inversores, cabos, estruturas de fixação, dispositivos de proteção e demais acessórios.

Esse processo é essencial para assegurar que o sistema funcione de forma eficiente, segura e dentro das normas técnicas. Além disso, o dimensionamento correto evita desperdícios de material e custos adicionais, otimizando os recursos e garantindo a melhor relação custo-benefício para o projeto.

Na seção 6.2.1, foi determinado que a quantidade necessária de módulos para atender à demanda de 844 kWh/mês é de 14 unidades. Isso implica em uma área mínima de $A_{nec} = 14 \times 1,994 = 27,916\text{m}^2$. Abaixo, apresentamos a configuração projetada para essa instalação, com duas fileiras de módulos, cada uma contendo 7 módulos dispostos de forma a otimizar o espaço e a eficiência do sistema.

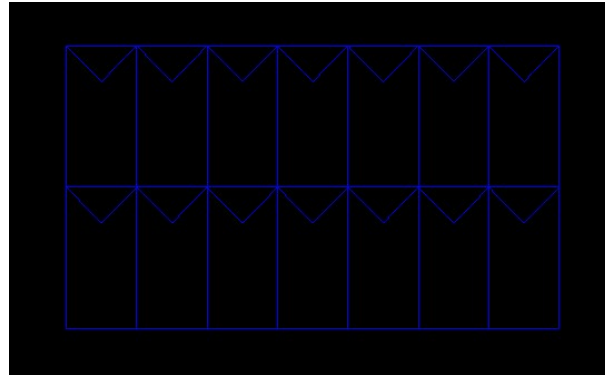


Figura 20 – Croqui de instalação dos módulos fotovoltaico

Uma única unidade do inversor escolhido é suficiente para suportar os 14 módulos previstos, e ainda oferece a possibilidade de expansão futura. Isso permite que o projeto seja ampliado com a adição de até 6 módulos adicionais, caso seja necessário aumentar a capacidade do sistema no futuro.

A estrutura de fixação dos módulos fotovoltaicos é um componente fundamental no dimensionamento do projeto, pois garante a estabilidade e segurança do sistema ao longo de sua vida útil. Atualmente, existem estruturas e manuais de instalação adequados para diversos tipos de telhados e solos, incluindo telhados com telhas de fibrocimento, estruturas de sustentação em madeira, telhados cerâmicos, metálicos, entre outros. No projeto em estudo, será considerada a instalação dos módulos fotovoltaicos em um telhado cerâmico, com estrutura de sustentação em madeira e inclinação de 0° , o que caracteriza uma instalação em um telhado plano.

A estrutura que vamos utilizar é da Solar Group, e o manual de instalação utilizado está anexado ao final do documento. O primeiro ponto a ser observado para dimensionar a estrutura de fixação é a região de vento que será instalado o sistema fotovoltaico, isso afeta o distanciamento dos pontos de fixação. Como a instalação será na cidade de Campinas, que possui região de vento nível IV, portanto dada a Figura 21 abaixo do fabricante, vamos utilizar o distanciamento para a região IV que é de 1,80m.

Módulos até 2,0 M²			
Angulação	15°	20°	25°
Região 1	2,10	2,0	1,90
Região 2	2,0	1,90	1,80
Região 3	1,90	1,80	1,70
Região 4	1,80	1,70	1,60
Região 5	1,70	1,60	1,50

Figura 21 – Posicionamento dos módulos segundo o fabricante

A instalação será realizada com duas fileiras de módulos fotovoltaicos dispostos no modo retrato. Para cada fileira, serão utilizados 2 perfis metálicos, conforme especificado na ficha técnica do módulo, com espaçamento de 1,10 m entre eles, para cada fileira, já que os módulos possuem furos específicos para facilitar a montagem. Assim, será necessário um total de 4 perfis metálicos, cada um com pelo menos 8 metros de comprimento, considerando que cada módulo tem 1,096 m de largura, totalizando 7,672 m de largura por fileira. Além disso, serão usados 5 grampos fixadores, por perfil, distribuídos a cada 1,6 m, a fim de garantir maior segurança na instalação. Outros componentes, como parafusos para fixação dos grampos aos caibros e vigas do telhado, e as peças de junção para unir os perfis e alcançar a medida necessária, serão adquiridos com uma margem de segurança. Portanto, a quantidade total de material necessário para fixar os módulos é descrita na Tabela 3 seguinte:

Material	Quantidade
Perfil metálico	4 peças 32m no total
Grampos fixadores	20 peças
Parafusos	25 peças
Junção	10 peças

Tabela 3 – Materiais utilizados para estrutura de fixação e suas quantidades

Abaixo na Figura 22, apresentamos a visualização da disposição da estrutura de fixação para a instalação dos módulos fotovoltaicos.

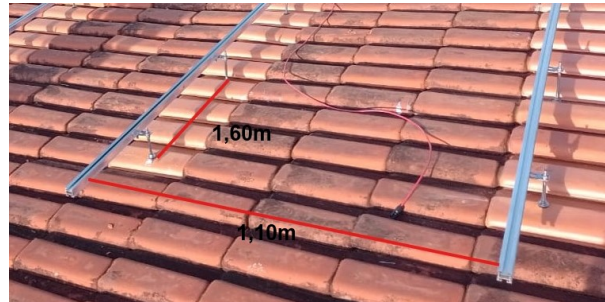


Figura 22 – Estrutura de fixação para instalação dos módulos fotovoltaicos

O dimensionamento dos cabos para a instalação varia conforme a localização do inversor. Para este projeto, vamos considerar que a distância entre os módulos fotovoltaicos e o inversor é de 10 metros. Com 14 módulos, serão necessários pelo menos 2 strings para o inversor. Como cada string requer dois cabos CC — um vermelho e um preto — serão necessários 4 cabos no total, com 10 metros de comprimento cada. Isso resulta em 20 metros de cabo vermelho e 20 metros de cabo preto para a conexão entre os módulos e o inversor. Para a conexão da parte CA, vamos considerar que o inversor estará localizado a 1 metro do ponto de conexão com a rede elétrica. Como o sistema é bifásico, serão necessários 2 cabos de 1 metro de comprimento cada, um para cada fase, além do cabo de aterramento. Os cabos de corrente alternada (CA) serão pretos, enquanto o cabo de aterramento será verde.

Para determinar a bitola adequada do cabo a ser utilizado, é necessário calcular a corrente máxima que será transmitida por ele. No lado de corrente contínua (CC), a corrente máxima será de I_{SC} . Com base na NBR 5410, que regulamenta instalações elétricas no Brasil, a seção mínima recomendada para o condutor é de $2,5mm^2$, considerando que esse cabo suporta correntes de até 21 A em condições normais de operação. No entanto, para aumentar a segurança e garantir maior robustez ao projeto, optaremos pela utilização de cabos de $6mm^2$.

Já para o lado de corrente alternada (CA), é preciso calcular a corrente máxima de saída do inversor. Sabendo que o inversor possui uma potência de 6kW e será conectado a uma tensão de 220V, a corrente pode ser calculada pela Equação 6.4:

$$I_{máx} = \frac{6000}{220} = 27,27A \quad (6.4)$$

Conforme a NBR 5410, no Brasil, o cabo adequado para a instalação no lado CA é de $6mm^2$. Assim, para o lado CC, serão utilizados 40 metros de cabo de $2,5mm^2$, divididos em 20 metros de cabo preto e 20 metros de cabo vermelho. Já para o lado CA, serão

utilizados 2 metros de cabo preto de $6mm^2$, além disso mais 1 metro de cabo da mesma bitola para conexão do terra do inversor, garantindo a conformidade com os padrões de segurança e eficiência da instalação.

Para finalizar a montagem do kit fotovoltaico, é fundamental analisar os dispositivos de proteção necessários para garantir a segurança e a eficiência do sistema. O disjuntor selecionado será de 32A, dimensionado para proteger os condutores contra sobrecorrentes e curtos-circuitos, considerando a capacidade de corrente nominal do sistema e as condições de instalação.

Além do disjuntor, serão utilizados dois Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS), essenciais para proteger o sistema contra surtos elétricos provenientes de descargas atmosféricas ou oscilações na rede elétrica. Esses DPS serão instalados para proteger as fases, garantindo a segurança dos equipamentos conectados ao sistema fotovoltaico.

Outro componente que será incorporado ao kit é o conector MC4, um elemento essencial para garantir conexões seguras e confiáveis entre os módulos fotovoltaicos e o restante do sistema. Um conector MC4 é um tipo de conector elétrico amplamente utilizado em sistemas fotovoltaicos para conectar os módulos solares de forma segura, eficiente e à prova de intempéries. Cada polaridade de cada string exige um conector MC4. Como o sistema terá duas strings conectadas ao inversor, serão necessários 4 conectores MC4 ao todo, dois para os polos positivos e dois para os polos negativos. Esses conectores serão adicionados ao kit para garantir uma instalação segura e eficiente.

Por fim, os itens que compõem o kit de instalação estão detalhados na Tabela 4 abaixo, proporcionando uma visão clara e organizada dos materiais necessários para a montagem completa do sistema.

Equipamento	Quantidade
Módulos fotovoltaico	14
Inversor on-grid	1
Perfil metálico	4 peças 32m no total
Grampos fixadores	20 peças
Parafusos	25 peças
Junção	10 peças
Cabo CC $6mm^2$ vermelho	20m
Cabo CC $6mm^2$ preto	20m
Cabo CA $6mm^2$ preto	2m
Cabo CA $6mm^2$ verde	2m
Disjuntor Bipolar 32A	1
DPS	2
Conectores MC4	4

Tabela 4 – Componentes do sistema fotovoltaico instalado e suas quantidades

6.2.5 Homologação

Para realizar a conexão do sistema fotovoltaico à rede da concessionária de energia, é necessário submeter uma série de documentos por meio da plataforma da própria concessionária. Nesta seção, detalharemos os principais requisitos estabelecidos pela concessionária, que, no caso em estudo, é a CPFL Paulista, responsável pela distribuição de energia na cidade de Campinas.

Podemos definir a implementação do sistema fotovoltaico em quatro etapas, a primeira seria a solicitação de acesso junto a concessionária, após aprovação é emitido o parecer de acesso para que a instalação seja feita, por fim a concessionária aprova a conexão e o sistema é ligado.

A solicitação de Acesso inicia o processo com o envio da solicitação de acesso pelo acessante. Nessa etapa, é necessário formalizar o pedido e encaminhar toda a documentação necessária, incluindo dados técnicos, informações pertinentes ao sistema e estudos realizados. A concessionária analisa a solicitação e emite o parecer de acesso, que pode incluir condições específicas para a conexão. Os prazos para emissão do parecer variam conforme o tipo de gerador e a necessidade de obras na rede da CPFL Paulista, sendo para microgerador sem obra na rede da CPFL até 15 dias após ação, para microgerador com obra na rede da CPFL até 30 dias após ação, para minigerador sem obra na rede da CPFL até 30 dias após ação e para minigerador com obra na rede da CPFL, até 60 dias após ação.

Após concluir a instalação do sistema, o solicitante tem um prazo de até 120 dias a partir da aprovação do parecer de acesso para solicitar a vistoria, que deve ser solicitada após concluir a instalação do sistema. A concessionária realiza a vistoria da instalação em até 7 dias após o pedido. Após a aprovação na vistoria, a concessionária faz os ajustes necessários no medidor de energia e libera o sistema para o início da compensação de energia. A micro ou minigeração passa, então, a estar conectada de forma efetiva à rede elétrica.

A CPFL Paulista disponibiliza em seu site uma cartilha detalhada com todos os procedimentos necessários para o preenchimento da documentação referente às solicitações de micro e minigeração distribuída. Neste trabalho, abordaremos o processo de solicitação para uma pessoa física (CPF) e a conexão de um sistema de microgeração, que abrange instalações com potência de inversor de até 75 kW.

Para realizar a solicitação, é necessário enviar o Anexo E, disponível na GED 1513 no portal da CPFL, devidamente preenchido. Esse anexo é dividido em cinco partes, sendo que a primeira trata da identificação da unidade consumidora de energia. Nessa etapa, é preciso informar o código da unidade consumidora, anexar os documentos de identificação do consumidor e fornecer outras informações relevantes.

A segunda parte do Anexo E solicita informações técnicas relacionadas à microge-

ração distribuída, como a potência do inversor, o tipo de fonte de energia a ser instalada, o tipo de geração e a modalidade de compensação de excedentes. Caso o sistema seja híbrido, incluindo baterias, essa característica também deve ser especificada nesta seção

Na terceira parte do anexo, é necessário enviar a documentação técnica do projeto. Isso inclui a emissão da Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) referente à instalação, a indicação do padrão de entrada, o diagrama unifilar, o memorial descritivo, o cronograma de instalação, e o certificado de conformidade do inversor homologado pelo INMETRO. Além disso, caso haja unidades cadastradas para autoconsumo remoto, é preciso especificar para onde os créditos de energia gerados serão destinados.

Na quarta parte, é necessário preencher algumas solicitações e declarações, que têm o objetivo de formalizar o compromisso do solicitante com a concessionária. Por fim, essa seção inclui a identificação do consumidor, que deverá assinar o documento para concluir o processo.

Seguir corretamente as normas e diretrizes estabelecidas pela concessionária de energia é essencial para garantir a aprovação do projeto durante o processo de homologação. Essas normas asseguram que o sistema fotovoltaico seja instalado de forma segura, eficiente e em conformidade com os padrões técnicos exigidos. Além de evitar atrasos ou reprovações, o cumprimento dos requisitos reforça a confiabilidade do projeto e o alinhamento com as regulamentações vigentes, promovendo uma conexão tranquila à rede elétrica.

Além disso, a observância rigorosa dessas normas é fundamental para preservar a integridade da rede elétrica existente. Sistemas instalados sem os devidos cuidados podem gerar problemas como sobrecargas, interferências ou falhas de segurança, afetando tanto a concessionária quanto os consumidores conectados à mesma rede. Assim, seguir as orientações técnicas não apenas protege os equipamentos e o investimento realizado, mas também contribui para a estabilidade e o bom funcionamento do sistema elétrico como um todo.

7 ANÁLISE DE CASO REAL

Neste capítulo, será realizada a análise de um caso real envolvendo um sistema fotovoltaico conectado à rede, instalado na cidade de Campinas, no estado de São Paulo. O sistema em questão foi projetado para atender à demanda energética de uma residência, utilizando tecnologia de microgeração distribuída, com potência instalada que se enquadra nos limites definidos pela regulamentação brasileira.

O dimensionamento do sistema foi realizado com o objetivo de compensar o consumo mensal informado na figura abaixo. Como a residência foi construída recentemente e ainda não possui um histórico consistente de consumo ao longo de vários meses, o projeto foi dimensionado, a pedido do consumidor, para atender ao maior consumo registrado nesse período inicial, que foi de 912 kWh/mês, como mostra a Figura 23 , além de uma margem para possível aumento de consumo no futuro.

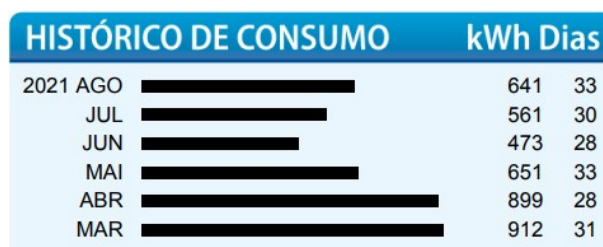


Figura 23 – Histórico de consumo do cliente

Para determinar a quantidade de placas necessárias, é fundamental considerar o local onde será realizada a instalação, que, neste caso, é uma residência. O sistema será montado em um telhado cerâmico, com estrutura de madeira utilizada como suporte. Abaixo, na Figura 24, é apresentada uma foto do telhado selecionado para a instalação, ilustrando as condições e características do local.



Figura 24 – Vista aérea do local da instalação

O módulo fotovoltaico selecionado para a instalação é o mesmo descrito na seção 6.2.2. Conforme o cálculo de geração apresentado anteriormente, cada módulo tem uma capacidade de geração estimada em 63,52 kWh/mês. Para atender à demanda energética do consumidor e garantir uma margem de segurança para possíveis aumentos futuros no consumo, optou-se pela utilização de 17 módulos, resultando em uma geração estimada de 1.079,84 kWh/mês. O inversor escolhido para o sistema também é o mesmo modelo descrito na seção 6.2.3, garantindo compatibilidade com os módulos selecionados e o desempenho adequado do sistema projetado.

A Figura 25 abaixo ilustra a implementação do projeto, destacando o posicionamento dos módulos fotovoltaicos no telhado.

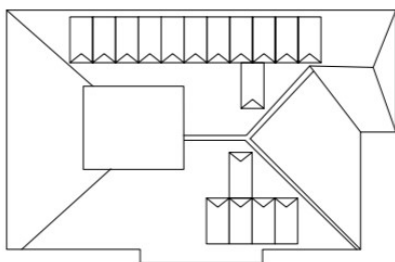


Figura 25 – Planta do posicionamento dos painéis no telhado



Figura 28 – Local de instalação do inversor



Figura 29 – Local de instalação do circuito de proteção do inversor

Para a análise dos dados da instalação, será utilizado o aplicativo FusionSolar. O FusionSolar é um aplicativo desenvolvido pela Huawei para monitoramento e gerenciamento de sistemas fotovoltaicos. Ele permite que usuários, instaladores e operadores acompanhem em tempo real o desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados a inversores Huawei.

Com o FusionSolar, é possível acessar dados detalhados, como a geração diária e acumulada de energia, potência de saída, corrente e tensão das strings, além de notificações sobre o status do sistema e alertas em caso de falhas. A interface intuitiva facilita o monitoramento tanto para usuários residenciais quanto para aplicações comerciais, ajudando a garantir que o sistema opere com eficiência máxima e forneça dados para análise de desempenho.

Vamos pegar como base o dia 16/01/2023, onde o inversor ao meio dia obteve sua potência máxima de saída, Figura 30.

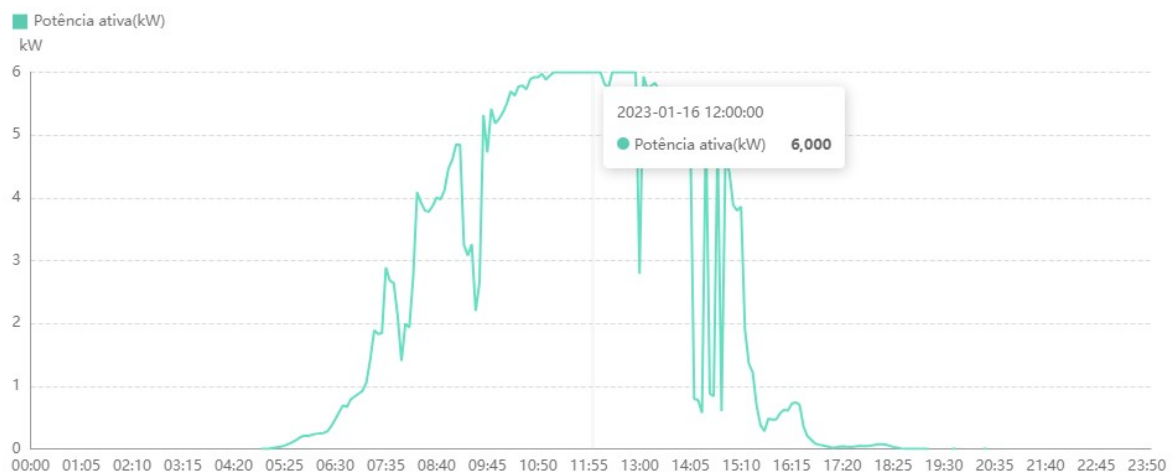


Figura 30 – Potência máxima de saída

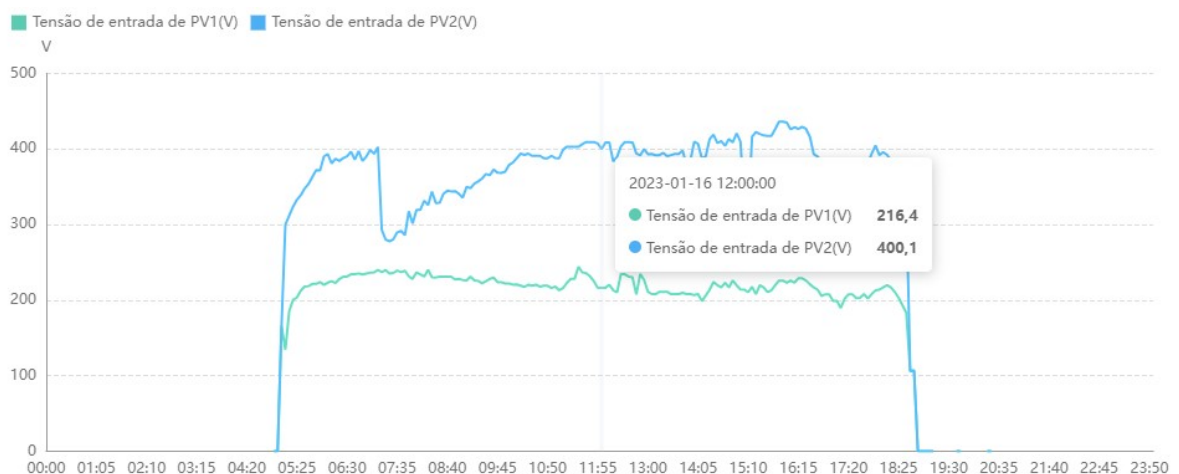


Figura 31 – Tensão de entrada do sistema fotovoltaico

A Figura 31 mostra que, ao meio-dia, a tensão da string 1 alcança 216,4 V, enquanto a tensão da string 2 está em torno de 400,1 V. De acordo com o projeto implementado, a string 1 é composta por 6 módulos, enquanto a string 2 possui 11 módulos. Cada módulo, operando em sua potência máxima, apresenta uma tensão de operação de $V_{mpp} = 34,65V$, conforme especificado na ficha técnica, em condições de temperatura da célula quando ela está submetida as condições de teste (NMOT), Equação 7.1 e Equação 7.2. Onde $V1$ é a Tensão de entrada da string 1 e $V2$ é a Tensão de entrada da string 2.

$$V1 = 34,65 \times 6 = 219,90V \quad (7.1)$$

$$V2 = 34,65 \times 11 = 403,15V \quad (7.2)$$

Os valores observados estão alinhados com o esperado, confirmando que a instalação foi realizada corretamente. Os módulos foram conectados às strings de forma adequada, garantindo o funcionamento esperado do sistema fotovoltaico.

O próximo parâmetro a ser analisado é a corrente de entrada do sistema fotovoltaico. A Figura 32 apresentado abaixo corresponde ao mesmo dia e horário dos dados de tensão analisados anteriormente.

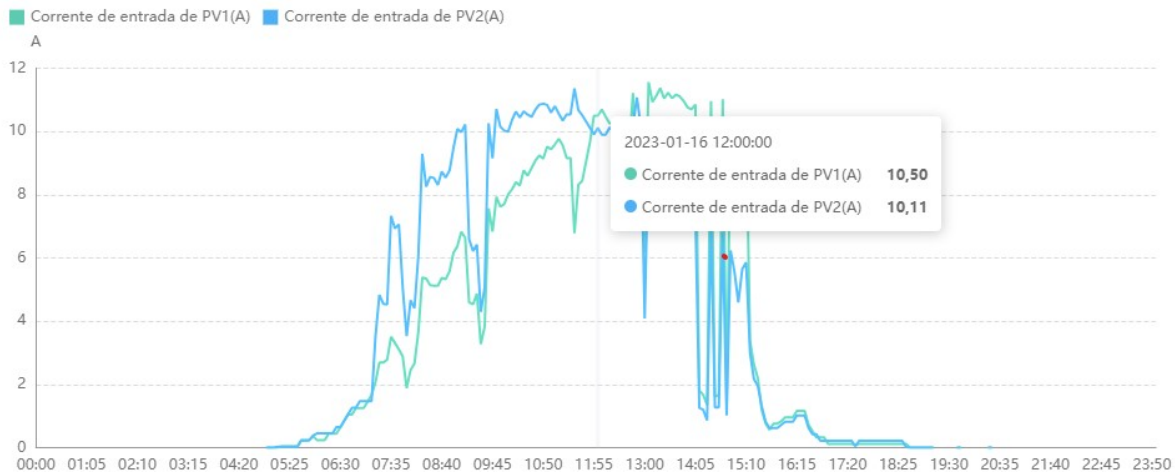


Figura 32 – Corrente de entrada do sistema fotovoltaico

No datasheet, a corrente em máxima potência é especificada como I_{mpp} . No entanto, ao analisar o gráfico, observamos que a corrente medida para a string 1 é $I1 = 10,50A$, enquanto para a string 2 é $I2 = 10,11A$. A corrente observada na string operando em máxima potência pode diferir dos valores especificados na ficha técnica devido a vários fatores. Primeiramente, os dados fornecidos pelo fabricante são obtidos em condições de temperatura da célula quando ela está submetida as condições de teste (NMOT), que consideram uma irradiação solar de $800 W/m^2$ e uma temperatura dos módulos de

20°C. No entanto, em condições reais, a irradiação solar e a temperatura podem variar significativamente, influenciando diretamente a corrente gerada.

Além disso, perdas no sistema, como aquelas causadas por resistência em cabos, conexões ou outros componentes, também podem contribuir para a redução da corrente. Outros fatores incluem possíveis sombreamentos ou acúmulo de sujeira nos módulos, que podem limitar a geração de corrente em uma ou mais strings. Por fim, o inversor ajusta o ponto de operação das strings para otimizar o desempenho geral do sistema, o que pode levar a correntes ligeiramente diferentes daquelas previstas para cada módulo isoladamente. Essas variações são normais e não indicam, necessariamente, problemas na instalação ou nos equipamentos.

Por fim, apresentaremos a geração de energia elétrica registrada no dia em questão, Figura 33, bem como a geração acumulada ao longo do ano de 2023, Figura 34.

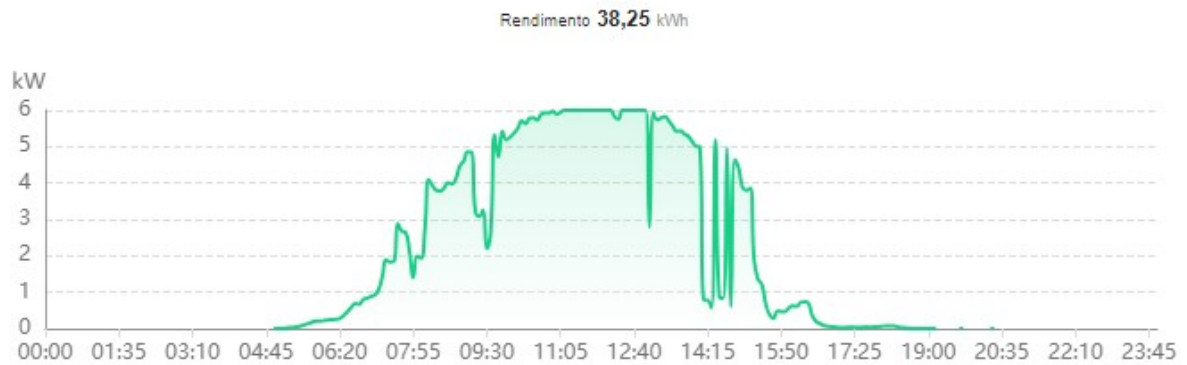


Figura 33 – Geração de energia elétrica registrada no dia



Figura 34 – Geração acumulada no ano de 2023

Podemos apresentar a geração em forma de Tabela 5 mês a mês:

Mês	Geração KWh/mês
Janeiro	915,63
Fevereiro	795,66
Março	992,20
Abril	803,75
Maiο	774,0
Junho	691,25
Julho	767,35
Agosto	805,05
Setembro	928,31
Outubro	857,16
Novembro	1.014,92
Dezembro	1.138,20

Tabela 5 – Geração de energia por mês do cliente

A média anual de geração do sistema fotovoltaico instalado foi de 879,06 kWh/mês, valor significativamente inferior ao projetado, que era de 1.079,84 kWh/mês. Essa discrepância pode ser atribuída a diversas perdas inerentes ao sistema fotovoltaico, que serão detalhadas no próximo capítulo.

8 FATORES QUE INFLUENCIAM A GERAÇÃO E PERDA DE EFICIÊNCIA

Como abordado no capítulo anterior, se não considerarmos os fatores que impactam diretamente a geração do sistema fotovoltaico, o projeto será dimensionado de forma inadequada, resultando em uma geração bem abaixo do esperado. No caso proposto a diferença entre o projetado e o real foi de 18,5% a menos. Portanto, é fundamental que, ao dimensionar o projeto, levemos em conta todos os elementos que podem afetar a eficiência do sistema, garantindo que as perdas sejam adequadamente previstas e compensadas.

8.1 Direção e Inclinação

A direção (orientação) e a inclinação (ângulo de instalação) dos módulos fotovoltaicos são fatores cruciais que impactam diretamente na quantidade de energia gerada pelo sistema. Esses dois parâmetros afetam a quantidade de radiação solar que os módulos recebem durante o dia, influenciando assim a eficiência do sistema fotovoltaico.

Para corrigir a geração de energia de um módulo fotovoltaico em função da radiação solar recebida, considerando a direção e a inclinação do módulo, é necessário levar em conta o ângulo de incidência da radiação solar na superfície do módulo. O cálculo que deve ser feito é baseado na correção da radiação solar incidente, que é a radiação no plano horizontal ajustada para a direção e a inclinação do módulo.

Vamos usar o conceito de ângulo de incidência e a radiação no plano horizontal para determinar a radiação efetiva que chega ao módulo fotovoltaico. O cálculo pode ser feito em duas etapas: primeiro corrigindo para o ângulo de inclinação (θ) e depois para a direção da radiação solar.

8.1.1 Cálculo do Ângulo de Incidência

O ângulo de incidência é o ângulo entre a linha normal à superfície do módulo e a direção da radiação solar. Este ângulo depende da orientação (direção) e da inclinação do módulo fotovoltaico. Quanto menor o ângulo de incidência (mais próximo de 0°), mais diretamente os raios solares atingem a superfície do módulo, resultando em maior captação de energia. Quando o ângulo de incidência aumenta, a radiação solar é distribuída em uma área maior do módulo, diminuindo a densidade de energia captada.

A eficiência dos módulos fotovoltaicos é máxima quando o Sol está perpendicular à superfície do módulo (θ). Qualquer desvio dessa condição reduz a geração de energia.

Como fatores que influenciam o ângulo de incidência podemos citar a latitude do local, inclinação do módulo, orientação do módulo, declinação Solar e a hora do dia (H).

A posição geográfica do sistema influencia a trajetória solar ao longo do dia e do ano, determinando como os raios solares atingem a superfície. Inclinação do módulo (β): O ângulo que o módulo faz com o plano horizontal. Ajustar a inclinação pode ajudar a maximizar a captação solar ao alinhar o módulo com a posição média do Sol durante o dia. O ângulo entre a direção para onde o módulo está voltado e o norte geográfico. Em geral, no hemisfério sul, a orientação ideal é voltada para o norte, enquanto no hemisfério norte, é para o sul. A Declinação Solar (δ) varia ao longo do ano devido à inclinação do eixo da Terra. Ela determina a posição do Sol em relação ao equador terrestre em um determinado dia. Por fim, o Sol muda de posição ao longo do dia, o que altera o ângulo com que seus raios atingem a superfície.

Em seu livro *Solar Engineering of Thermal Processes*, os autores Duffie e Beckman (DUFFIE; BECKMAN; BLAIR, 2020), apresentam a seguinte Equação 8.1 para calcular o ângulo de incidência:

$$\theta_{incidente} = \sin(\delta)\sin(\phi)\cos(\beta) - \sin(\delta)\cos(\phi)\sin(\beta)\cos(\gamma) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\beta)\cos(H) + \cos(\gamma)\sin(\phi)\sin(\beta)\cos(\gamma) + \cos(\delta)\sin(\beta)\sin(\gamma)\sin(H) \quad (8.1)$$

Na equação, θ é o ângulo de incidência, δ é a declinação solar, ϕ é a latitude do local de instalação, β é a inclinação do módulo, γ é a orientação do módulo (ângulo entre o norte verdadeiro e a linha normal ao módulo), H é o ângulo horário.

8.1.2 Correção da Radiação Solar Efetiva

Agora que temos o ângulo de incidência, podemos calcular a radiação solar efetiva que o módulo recebe, ajustada pela direção e inclinação, pela Equação 8.2. A radiação efetiva pode ser obtida multiplicando a radiação no plano horizontal $G_{horizontal}$ pelo fator de correção $\cos(\theta_{incidente})$ que depende do ângulo de incidência:

$$G_{efetiva} = G_{horizontal} \times \cos(\theta_{incidente}) \quad (8.2)$$

8.1.3 Correção da equação de geração

Com a correção do fator de radiação solar efetiva, substituímos essa nova variável na Equação 6.1, que agora passa a considerar a direção e a inclinação do módulo fotovoltaico, ajustando a radiação que chega ao módulo de acordo com as condições reais de instalação, Equação 8.3.

$$E = A \times G_{efetiva} \times \eta \times (1 - \beta(T_{OP} - T_{REF})) \quad (8.3)$$

8.1.4 Eficiência do inversor

A eficiência do inversor é um fator crucial que afeta diretamente a geração de energia elétrica utilizável de um sistema fotovoltaico. O inversor converte a corrente contínua (CC), gerada pelos módulos fotovoltaicos, em corrente alternada (CA), que é compatível com os padrões da rede elétrica ou dos dispositivos consumidores. Durante essa conversão, uma fração da energia é perdida devido a limitações técnicas do dispositivo.

Os inversores possuem uma eficiência que varia, geralmente, entre 94% e 98%, dependendo do modelo e da tecnologia empregada. Isso significa que uma fração da energia gerada pelos módulos é dissipada como calor ou perdida devido a limitações técnicas no processo de conversão. Por exemplo, se os módulos gerarem 1.000 kWh de energia e o inversor tiver uma eficiência de 95%, apenas 950 kWh serão aproveitados, enquanto 50 kWh serão perdidos.

Além disso, a eficiência do inversor não é constante; ela varia conforme o nível de carga, ou seja, o quanto da potência nominal do inversor está sendo utilizada. Geralmente, a maior eficiência ocorre quando o inversor opera entre 40% e 90% de sua capacidade nominal. Fora dessa faixa, a eficiência tende a diminuir, resultando em perdas adicionais. Outro ponto relevante é que a eficiência do inversor também pode ser afetada por condições ambientais, como a temperatura. Em dias de calor extremo, o inversor pode apresentar uma queda de eficiência devido à maior dissipação de calor.

Se o inversor for sobredimensionado em relação à potência dos módulos, ele pode operar frequentemente em faixas de baixa carga, reduzindo a eficiência média, caso seja subdimensionado, pode haver perdas por "clipping", quando a potência dos módulos excede a capacidade do inversor, e parte da energia gerada é descartada.

Para considerar a eficiência do inversor no dimensionamento, utiliza-se o fator de eficiência (η_{inv}) no cálculo da energia gerada, onde E_{CA} é a Energia útil disponível na saída do inversor, E_{CC} é a Energia gerada pelos módulos, η_{inv} é a Eficiência do inversor, expressa em decimal (ex.: 0,95 para 95%). Equação 8.4 :

$$E_{CA} = E_{CC} \times \eta_{inv} \quad (8.4)$$

8.1.5 Sombreamento

O sombreamento é um dos fatores mais prejudiciais à eficiência de um sistema fotovoltaico, especialmente quando os módulos estão conectados em série na mesma string do inversor. Ele ocorre quando objetos como árvores, prédios, nuvens ou até mesmo sujeiras acumuladas projetam sombras sobre os módulos fotovoltaicos, reduzindo a quantidade de luz solar disponível para a geração de energia.

Quando módulos estão conectados em série, a corrente que flui pela string é limitada

pelo módulo mais sombreados. Isso acontece porque, em um circuito em série, a corrente é uniforme ao longo de todos os módulos. Portanto, se um módulo estiver operando com uma corrente reduzida devido ao sombreamento, todos os outros módulos na string serão limitados a essa mesma corrente, independentemente de estarem totalmente expostos à luz solar. Esse efeito pode causar uma queda significativa na geração de energia.

Além disso, os módulos sombreados podem funcionar como cargas resistivas, dissipando energia gerada pelos outros módulos na forma de calor. Esse fenômeno, conhecido como hot spot (ponto quente), pode danificar os módulos ao longo do tempo, reduzindo a vida útil do sistema.

Para mitigar os efeitos do sombreamento, os módulos são equipados com diodos de bypass. Esses dispositivos permitem que a corrente "desvie" das células ou módulos sombreados, minimizando a perda de energia. No entanto, mesmo com diodos de bypass, o sombreamento ainda resulta em perdas de geração, especialmente em casos onde várias células ou módulos de uma string são afetados.

Em sistemas mais avançados, é possível utilizar otimizadores de potência ou microinversores, que permitem o controle individual de cada módulo. Esses dispositivos evitam que o sombreamento em um módulo específico impacte toda a string, melhorando a eficiência do sistema. Contudo, essas soluções podem aumentar os custos iniciais do projeto.

Portanto, ao projetar um sistema fotovoltaico, é fundamental considerar o impacto do sombreamento na escolha do local de instalação e no dimensionamento do sistema. A análise de possíveis sombras ao longo do dia e do ano, utilizando ferramentas como softwares de simulação, ajuda a minimizar as perdas e a garantir um desempenho eficiente do sistema fotovoltaico.

8.1.6 Mismatching

Mismatch em sistemas fotovoltaicos refere-se à discrepância nas características elétricas (corrente e tensão) entre os módulos de uma mesma string ou entre strings conectadas a um inversor. Essa diferença ocorre devido a variações no desempenho dos módulos, que podem ser causadas por fatores como sombreamento parcial, sujeira, degradação desigual, tolerâncias de fabricação, ou mesmo diferenças na orientação ou inclinação entre módulos.

Em uma string de módulos conectados em série, o módulo com a menor corrente limita a corrente de toda a string. Isso ocorre porque, em um circuito em série, a corrente é uniforme em todos os módulos. Por outro lado, em strings conectadas em paralelo, a tensão deve ser igual em todas as strings, de modo que a string com menor desempenho limitará a eficiência geral do sistema.

As perdas por mismatch podem reduzir significativamente a geração de energia do sistema fotovoltaico, especialmente em condições onde as características elétricas dos módulos variam amplamente. Essas perdas podem ser exacerbadas em sistemas maiores, onde é mais provável que existam variações entre os módulos ou strings.

Para calcular as perdas por mismatch, consideramos a diferença percentual entre a potência máxima teórica do sistema (quando todos os módulos operam em condições ideais) e a potência real devido às discrepâncias. A fórmula geral é descrita pela Equação 8.5:

$$PerdaPorMismatch(\%) = \left(1 - \frac{PotenciaRealdoSistema}{PotênciaTeóricaTotal}\right) \times 100 \quad (8.5)$$

Se os módulos de uma string têm correntes ou tensões diferentes, as perdas por mismatch podem ser estimadas utilizando suas curvas I-V (corrente vs. tensão) individuais. Para strings em série, a corrente total será limitada pelo módulo de menor corrente. Para strings em paralelo, a tensão será ajustada à tensão do módulo ou string com menor desempenho

Para minimizar os efeitos do mismatch, é fundamental adotar algumas práticas específicas. Utilizar módulos da mesma marca, modelo e com características elétricas semelhantes ajuda a reduzir as discrepâncias entre eles. Outra solução eficaz é o uso de diodos de bypass, que permitem que a corrente contorne células sombreadas ou defeituosas, minimizando as perdas em série. Além disso, realizar limpeza e inspeção periódica dos módulos é essencial para evitar que sujeira, detritos ou danos influenciem negativamente o desempenho do sistema, contribuindo para o mismatch.

8.1.7 Outras Perdas

Além de fatores como direção, inclinação, sombreamento, mismatch e eficiência do inversor, existem outros elementos que também impactam significativamente a geração de energia de um módulo fotovoltaico.

O acúmulo de sujeira e resíduos, como poeira, folhas, excrementos de aves e outros detritos, pode comprometer o desempenho dos módulos fotovoltaicos ao bloquear parte da radiação solar incidente. Mesmo obstruções em pequenas áreas podem gerar perdas significativas de eficiência, especialmente em sistemas com módulos conectados em série. Para garantir o desempenho ideal do sistema, a limpeza regular dos módulos é indispensável.

A qualidade dos componentes elétricos, como cabos, conectores e dispositivos de proteção, exerce influência direta na eficiência de sistemas fotovoltaicos. Cabos subdimensionados ou de baixa qualidade podem ocasionar perdas significativas devido à maior resistência elétrica. Além disso, conectores mal encaixados ou corroídos não apenas elevam

as perdas, mas também podem gerar aquecimento excessivo, comprometendo a segurança e o desempenho do sistema.

Os módulos fotovoltaicos passam por um processo natural de degradação ao longo do tempo, reduzindo gradualmente sua capacidade de geração de energia. Essa degradação ocorre devido a fatores como exposição prolongada à radiação solar, variações de temperatura, umidade, e outros elementos climáticos que podem afetar os materiais constituintes dos módulos. A taxa de degradação varia conforme a qualidade dos módulos, os materiais utilizados na sua fabricação e as condições específicas do local de instalação, como incidência de chuvas ácidas, salinidade ou poeira abrasiva. Em geral, os fabricantes especificam essa perda de eficiência, que costuma variar entre 0,5% e 1% ao ano, permitindo prever o desempenho do sistema ao longo de sua vida útil, normalmente estimada em 25 a 30 anos. Com a degradação acumulada, é importante considerar estratégias de manutenção e possíveis substituições futuras para garantir a viabilidade do sistema a longo prazo.

Embora os módulos fotovoltaicos sejam otimizados para captar a radiação solar direta, uma parcela significativa da geração de energia também provém da radiação difusa, que é a luz solar dispersa na atmosfera por partículas como poeira, vapor d'água e gases. Em dias nublados ou com alta nebulosidade, a proporção de radiação difusa aumenta consideravelmente, já que as nuvens bloqueiam parcialmente a radiação direta. Apesar de os módulos conseguirem gerar energia a partir da radiação difusa, a eficiência do sistema é reduzida, pois essa radiação possui menor intensidade e direção menos concentrada. Esse fenômeno destaca a necessidade de um dimensionamento adequado do sistema, levando em conta as condições climáticas do local, para otimizar a geração de energia em diferentes cenários de luminosidade.

Falhas mecânicas ou técnicas podem comprometer significativamente o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, reduzindo sua capacidade de geração de energia. Entre os problemas mais comuns estão as microfissuras nas células fotovoltaicas, que podem surgir durante o transporte, instalação ou devido à exposição prolongada a variações térmicas e mecânicas. Essas microfissuras podem ser invisíveis a olho nu, mas comprometem a integridade das células, causando perdas de eficiência que se acumulam ao longo do tempo. Outro problema frequente é a delaminação, que ocorre quando as camadas do módulo se separam, geralmente devido à exposição a condições climáticas adversas ou a falhas de fabricação. Além disso, falhas em componentes como cabos, conectores ou caixas de junção podem gerar aquecimento excessivo, perdas elétricas ou até risco de incêndios. Muitas dessas falhas passam despercebidas em inspeções visuais, exigindo o uso de tecnologias como termografia ou ensaios elétricos para detecção precoce. A manutenção preventiva e a escolha de componentes de alta qualidade são essenciais para mitigar esses riscos, garantindo a longevidade e a eficiência do sistema.

Condições climáticas extremas podem afetar significativamente a integridade e o

desempenho dos sistemas fotovoltaicos, mesmo quando os módulos são projetados para suportar adversidades. Eventos como granizo intenso podem provocar trincas ou fraturas nas células fotovoltaicas, reduzindo sua eficiência ou até inutilizando completamente os módulos. Ventos fortes, por sua vez, representam um risco para a estrutura de suporte, podendo causar desalinhamento, deslocamento ou até o colapso do sistema em casos de fixação inadequada. Neve acumulada sobre os módulos pode bloquear a radiação solar, enquanto o peso excessivo compromete a estrutura de suporte, especialmente se o projeto não considerar adequadamente essa carga. Já a chuva excessiva pode provocar infiltrações de água nos componentes elétricos, como caixas de junção ou conectores, aumentando o risco de curto-circuitos ou corrosão.

Embora os módulos e componentes sejam testados para resistir a condições adversas, eventos climáticos extremos, como furacões ou tempestades de granizo fora do padrão, podem ultrapassar os limites de resistência dos sistemas. A escolha de materiais de alta qualidade, o dimensionamento correto da estrutura de suporte e a manutenção regular são medidas essenciais para mitigar os impactos dessas condições. Além disso, em áreas propensas a eventos climáticos severos, recomenda-se o uso de sistemas de monitoramento e proteção, como para-raios e barreiras contra ventos, para preservar a durabilidade e a eficiência do sistema a longo prazo.

Sombras temporárias, frequentemente causadas por objetos móveis como árvores que crescem ao longo do tempo ou estruturas próximas, podem gerar perdas significativas e sazonais na geração de energia dos sistemas fotovoltaicos. Mesmo que as sombras não cubram a totalidade dos módulos, elas podem reduzir a eficiência do sistema, especialmente em instalações onde os módulos estão conectados em série. A variação na intensidade da sombra ao longo do dia ou nas diferentes estações do ano pode levar a perdas periódicas, o que compromete a produção de energia durante períodos críticos, como em meses de alta demanda.

Essas perdas podem ser mais acentuadas em sistemas fotovoltaicos que não foram projetados com um planejamento cuidadoso da posição dos módulos e das possíveis fontes de sombreamento. A análise do ambiente ao redor da instalação é fundamental para garantir que objetos como árvores, prédios ou outras estruturas não obstruam a radiação solar, seja de forma temporária ou permanente. Planejar a instalação levando em conta o crescimento das árvores e a movimentação de sombras ao longo do ano é crucial para evitar surpresas e maximizar a eficiência do sistema. Em áreas onde o sombreamento é um problema constante, a utilização de tecnologias como rastreadores solares (trackers) ou a escolha de um layout otimizado para a disposição dos módulos pode ajudar a mitigar essas perdas. Além disso, é importante monitorar regularmente o sistema e realizar a poda de árvores ou ajustes na estrutura para garantir que a geração de energia não seja comprometida por sombreamento excessivo.

9 CONCLUSÃO

Com o avanço da tecnologia e o surgimento de novos equipamentos que consomem cada vez mais energia elétrica, como os carros elétricos, torna-se de fundamental importância o estudo de fontes geradoras de energia para diversificar a matriz energética e atender à demanda crescente ano após ano. Nesse contexto, o estudo apresenta um modelo para dimensionar sistemas fotovoltaicos conectados à rede, abordando a escolha dos equipamentos, a quantidade necessária, o local de instalação e todos os fatores que impactam na geração de energia do sistema fotovoltaico.

Quando bem projetado, um sistema fotovoltaico conectado à rede oferece benefícios financeiros significativos para o solicitante, reduzindo consideravelmente a conta de energia do local de instalação, com alguns casos alcançando até 95% de redução. O dinheiro economizado pode ser utilizado em lazer, viagens, troca de carro ou para proporcionar mais conforto às famílias. Além do benefício econômico, investir em energia solar também traz vantagens para o planeta, sendo uma fonte limpa e sustentável. A energia solar está no radar de várias indústrias e, em alguns casos, sua instalação é obrigatória para reduzir a emissão de carbono no meio ambiente.

Este trabalho apresentou um modelo a ser seguido para dimensionar sistemas fotovoltaicos, bem como os passos necessários para conectá-los à concessionária de energia. Durante o dimensionamento, é essencial estudar o local da instalação, avaliando a disponibilidade de sol, a possibilidade de sombreamento sobre os módulos, a posição, direção e inclinação dos mesmos. Caso esse estudo seja feito de forma incorreta, a instalação terá uma geração abaixo do esperado e não conseguirá atender ao consumo para o qual foi projetada, o que pode gerar insatisfação no solicitante e prejudicar a reputação do setor. Por isso, o primeiro passo é definir o local adequadamente, levando em consideração todos esses fatores, para garantir que a expectativa seja atendida e o sistema entregue o desempenho projetado.

No estudo de caso real, foi possível observar o impacto de não levar em consideração as perdas associadas à instalação do projeto. Por outro lado, o sucesso da instalação foi evidenciado, já que o sistema está em pleno funcionamento há mais de um ano, respeitando os parâmetros do inversor e destacando o bom trabalho realizado na fixação dos módulos e na passagem dos cabos. O inversor, preferencialmente, deve ser instalado em um local protegido de sol e chuva, para aumentar sua vida útil e eficiência, o que foi devidamente verificado e executado na instalação. Assim, o trabalho apresentado é replicável, pois o passo a passo seguido resultou no pleno funcionamento do projeto.

Para o futuro, um dos principais desafios do setor é encontrar mecanismos para

levar a instalação de sistemas fotovoltaicos a mais consumidores. Apesar de ser um ótimo investimento financeiro, com payback de 2 a 3 anos, dependendo da cidade e do local de instalação, nem toda a população tem condições de adquirir o sistema. Portanto, é necessário implementar políticas públicas de incentivo, como financiamentos a juros mais baixos, para que mais pessoas possam ter acesso à energia solar em suas residências. Outro ponto amplamente discutido no setor e nos noticiários brasileiros é a instabilidade da rede da concessionária, com quedas de energia frequentes. Em alguns casos, há residências que ficam dias sem energia, resultando na perda de alimentos na geladeira e gerando insegurança para as famílias. O sistema fotovoltaico oferece uma solução para esse problema por meio do sistema híbrido. Enquanto o sistema on-grid é desligado assim que o inversor detecta a queda de energia da concessionária, o sistema híbrido incorpora baterias, geralmente de lítio, que permitem o abastecimento de circuitos essenciais (ou cargas críticas) com a energia armazenada, proporcionando maior conforto e satisfação para as famílias e eliminando a preocupação com as constantes falhas da rede elétrica.

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**. 2024. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 08 agosto 2024.
- CONNOR, N. **Semicondutores dopados por doadores**. 2020. Disponível em: <https://www.radiation-dosimetry.org/pt-br/o-que-e-doping-de-semicondutores-definicao/>. Acesso em: 08 agosto 2024.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A.; BLAIR, N. **Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2020. 112 p.
- EPE. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL**. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 08 agosto 2024.
- FILHO, O. C. G. **DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS**. 2012. Disponível em: <https://www.eletrica.ufpr.br/ogouveia/te046/files/Aula3.pdf>. Acesso em: 10 agosto 2024.
- FRAAS, L. P. L. **Solar Cells and Their Applications**. New Jersey: John Wiley Sons, Inc., Hoboken, 2010. 644 p.
- FRG, G. **ROBERTO ZILLES | IEE - USP | A HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR NO BRASIL E SUA ASCENSÃO**. 2022. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=5oX0dupY6ao>. Acesso em: 09 agosto 2024.
- KARAGIORGIS, G. **PHOTOVOLTAIC'S TECHNOLOGY OVERVIEW**. 2014. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Events/2014/Jun/2/15_Karagiorgis.pdf?la=en&hash=98B364D2F71C232E270545BA0FF9D36AB2E986B4. Acesso em: 15 agosto 2024.
- KNIRSCH, T. **Caminhos para a Sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Fundação Konrad Adenauer, 2012. 124 p.
- MASTER, E. S. **PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO**. 2021. Disponível em: <https://energiasolarmaster.com.br/2024/01/28/principais-componentes-de-um-sistema-fotovoltaico/>. Acesso em: 20 outubro 2024.
- PINHO, J.; GALDINO, M. Engineering manual for photovoltaic systems retrieved from rio de janeiro: Cepel—cresesb. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**, p. 14, 2014.
- SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution**. [S.l.: s.n.]: Crown Business, 2016. 36 p.
- SECRETARIA-GERAL, P. da R. **LEI Nº 14.300**. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/114300.htm. Acesso em: 06 novembro 2024.
- SOLAR, C. **Silício mono ou policristalino: quem vence o duelo?** 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/silicio-mono-ou-policristalino-quem-vence-o-duelo/>. Acesso em: 16 agosto 2024.

SOLAR, C. **Filmes finos CIGS: uma alternativa ao silício cristalino**. 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/filmes-finos-cigs-uma-alternativa-ao-silicio-cristalino/>. Acesso em: 16 agosto 2024.

SOLAR, P. **Painel solar: o que é, como funciona e tipos**. 2020. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/painel-solar>. Acesso em: 16 agosto 2024.

TRIBUNE, S. **Concentrated Photovoltaics**. 2011. Disponível em: <https://solartribune.com/cpv/>. Acesso em: 20 outubro 2024.

ANEXOS

ANEXO A – DATASHEET MÓDULO RISEN 445WP



HIGH PERFORMANCE MONOCRYSTALLINE PERC MODULE



The King of Rooftop

G5.3



★ As there are different certification requirements in different markets, please contact your local Risen Energy sales representative for the specific certificates applicable to the products in the region in which the products are to be used.

RISEN ENERGY CO., LTD.

Risen Energy is a leading, global tier 1 manufacturer of high-performance solar photovoltaic products and provider of total business solutions for residential, commercial and utility-scale power generation. The company, founded in 1986, and publicly listed in 2010, compels value generation for its chosen global customers. Techno-commercial innovation, underpinned by consummate quality and support, encircle Risen Energy's total Solar PV business solutions which are among the most powerful and cost-effective in the industry. With local market presence and strong financial bankability status, we are committed, and able, to building strategic, mutually beneficial collaborations with our partners, as together we capitalise on the rising value of green energy.

Tashan Industry Zone, Meilin, Ninghai 315609, Ningbo | PRC

Tel: +86-574-59953239 Fax: +86-574-59953599

E-mail: marketing@risenenergy.com Website: www.risenenergy.com



RSM130-8-430M-450M

130 CELL

Mono PERC Module

430-450Wp

Power Output Range

1500VDC

Maximum System Voltage

21.7%

Maximum Efficiency

KEY SALIENT FEATURES



Global, Tier 1 bankable brand, with independently certified state-of-the-art automated manufacturing



Industry leading lowest thermal co-efficient of power



Industry leading 12 years product warranty



Excellent low irradiance performance



Excellent PID resistance



Positive power tolerance of 0~+3%



Dual stage 100% EL Inspection warranting defect-free product



Module Imp binning radically reduces string mismatch losses



Excellent wind load 2400Pa & snow load 5400Pa under certain installation method

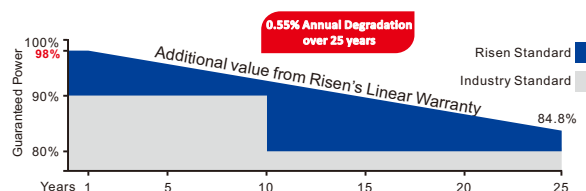


Comprehensive product and system certification

- ◆ IEC61215:2016; IEC61730-1/-2:2016;
- ◆ ISO 9001:2015 Quality Management System
- ◆ ISO 14001:2015 Environmental Management System
- ◆ ISO 45001:2018 Occupational Health and Safety Management System

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

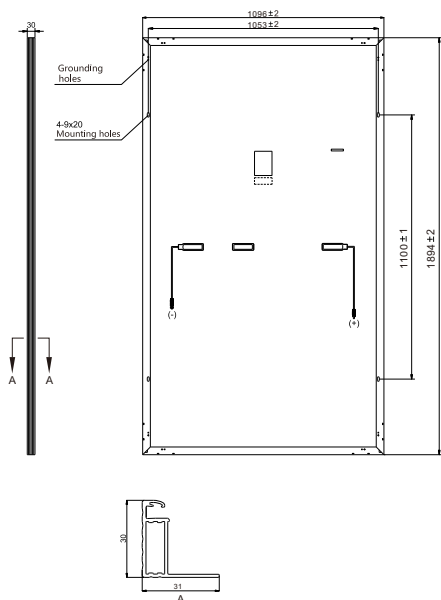
12 year Product Warranty / 25 year Linear Power Warranty



★ Please check the valid version of Limited Product Warranty which is officially released by Risen Energy Co., Ltd

THE POWER OF RISING VALUE

Dimensions of PV Module Unit: mm



ELECTRICAL DATA (STC)

Model Number	RSM130-8-430M	RSM130-8-435M	RSM130-8-440M	RSM130-8-445M	RSM130-8-450M
Rated Power in Watts-Pmax(Wp)	430	435	440	445	450
Open Circuit Voltage-Voc(V)	44.36	44.61	44.85	45.09	45.33
Short Circuit Current-Isc(A)	12.35	12.42	12.50	12.57	12.65
Maximum Power Voltage-Vmpp(V)	36.94	37.14	37.34	37.54	37.74
Maximum Power Current-Impp(A)	11.65	11.72	11.79	11.86	11.93
Module Efficiency (%) ★	20.7	21.0	21.2	21.4	21.7

STC: Irradiance 1000 W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5 according to EN 60904-3.

★ Module Efficiency (%): Round-off to the nearest number

ELECTRICAL DATA (NMOT)

Model Number	RSM130-8-430M	RSM130-8-435M	RSM130-8-440M	RSM130-8-445M	RSM130-8-450M
Maximum Power-Pmax (Wp)	325.9	329.6	333.4	337.1	340.9
Open Circuit Voltage-Voc (V)	41.26	41.48	41.71	41.93	42.15
Short Circuit Current-Isc (A)	10.13	10.19	10.25	10.31	10.37
Maximum Power Voltage-Vmpp (V)	34.28	34.47	34.65	34.84	35.02
Maximum Power Current-Impp (A)	9.51	9.56	9.62	9.68	9.73

NMOT: Irradiance at 800 W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

Solar cells	Monocrystalline
Cell configuration	130 cells (5×13+5×13)
Module dimensions	1894×1096×30mm
Weight	22.5kg
Superstrate	High Transmission, Low Iron, Tempered ARC Glass
Substrate	White Back-sheet
Frame	Anodized Aluminium Alloy , Black
J-Box	Potted, IP68, 1500VDC, 3 Schottky bypass diodes
Cables	4.0mm ² , Positive(+)350mm, Negative(-)230mm (Connector Included)
Connector	Risen Twinseal PV-SY02, IP68

TEMPERATURE & MAXIMUM RATINGS

Nominal Module Operating Temperature (NMOT)	44°C±2°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.25%/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.04%/°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.34%/°C
Operational Temperature	-40°C~+85°C
Maximum System Voltage	1500VDC
Max Series Fuse Rating	20A
Limiting Reverse Current	20A

PACKAGING CONFIGURATION

	40ft(HQ)	20ft
Number of modules per container	864	216
Number of modules per pallet	36	36
Number of pallets per container	24	6
Packaging box dimensions (LxWxH) in mm	1910×1110×1236	1910×1110×1236
Box gross weight[kg]	850	850

CAUTION: READ SAFETY AND INSTALLATION INSTRUCTIONS BEFORE USING THE PRODUCT.

©2022 Risen Energy. All rights reserved. Contents included in this datasheet are subject to change without notice.
No special undertaking or warranty for the suitability of special purpose or being installed in extraordinary surroundings is granted unless as otherwise specifically committed by manufacturer in contract document.

THE POWER OF RISING VALUE

ANEXO B – SIW300H M020 / M030 / M040 / M050 / M060 L1

SIW300H M020 / M030 / M040 / M050 / M060 L1

INVERSOR STRING ON-GRID MONOFÁSICO

Possuem uma das maiores eficiências do mercado, com até 98,4% de eficiência. Além disso, contêm interface de armazenamento de energia Plug & Play com a linha SBW300, possibilidade de conexão com baterias, grau de proteção IP65** e arrefecimento por convecção natural. Por último, possui proteção contra surtos CC e CA e tecnologia AFCI (Arc Fault Circuit Interrupter).



	SIW300H M020 L1	SIW300H M030 L1	SIW300H M040 L1	SIW300H M050 L1	SIW300H M060 L1
EFICIÊNCIA					
Eficiência máxima	98,20%	98,30%	98,40%	98,40%	98,40%
Eficiência europeia	96,70%	97,30%	97,50%	97,80%	97,80%
ENTRADA (FV)					
Potência de entrada máxima ¹	3.000 W ¹	4.500 W ¹	6.000 W ¹	7.500 W ¹	9.000 W ¹
Tensão de entrada máxima	600 V				
Faixa de operação do MPPT	80 V ~ 600 V				
Tensão de partida	100 V				
Faixa de tensão MPPT em máxima potência	90 V ~ 560 V				
Corrente de entrada máxima/MPPT	12,5 A				
Corrente máxima de curto-circuito/MPPT	18 A				
Número de MPPTs	2				
Número máximo de entradas por MPPT	1				
ENTRADA (Bateria SBW300)					
Range de tensão de operação	350 ~ 560V				
Corrente máxima de operação	15A				
Potência máxima de carregamento ²	5000W ²				
Potência máxima de descarga	2.200 W	3.300 W	4.400 W	5.000 W	5.000 W
SAÍDA ON GRID					
Conexão à rede	Monofásica				
Potência nominal de saída	2.000 W	3.000 W	4.000 W	5.000 W	6.000 W
Potência aparente máxima	2.200 VA	3.300 VA	4.400 VA	5.500 VA	6.000 VA
Tensão de saída nominal	220 / 230 V				
Frequência de rede CA nominal	50 Hz / 60 Hz				
Corrente de saída máxima	10 A	15 A	20 A	25 A	27,3 A
Fator de potência ajustável	0,8 adiantado ... 0,8 atrasado				
Distorção harmônica total máxima	≤3%				
SAÍDA OFF GRID					
Caixa de transferência	Backup Box B0				
Potência aparente máxima	2.000 VA	3.000 VA	4.000 VA	5.000 VA	5.000 VA
Tensão de saída nominal	220 V				
Frequência de rede CA nominal	50 Hz / 60 Hz				
Corrente de saída máxima	9,1 A	13,6 A	18,2 A	22,7 A	22,7 A
Fator de potência ajustável	0,8 adiantado ... 0,8 atrasado				
BATERIA					
Modelo controlador BMS	SBW300 C050 W0				
Modelo bateria	SBW300 B050 W0				
Faixa de tensão de operação	350 ~ 560V				
Corrente máxima de carga e descarga	15 A				
Comunicação	RS485, CANopen				

SIW300H M020 / M030 / M040 / M050 / M060 L1

INVERSOR STRING ON-GRID MONOFÁSICO



	SIW300H M020 L1	SIW300H M030 L1	SIW300H M040 L1	SIW300H M050 L1	SIW300H M060 L1
PROTEÇÕES					
Proteção AFCI	Sim				
Proteção anti-ilhamento	Sim				
Proteção contra polaridade CC invertida	Sim				
Monitoramento da isolação	Sim				
Supressor de surto CC / CA	Sim (tipo II)				
Monitoramento de correntes residuais	Sim				
Proteção contra sobrecorrente CA	Sim				
Proteção contra curto-circuito CA	Sim				
Proteção contra sobretensão CA	Sim				
Proteção de sobrecorrente CC	Topologia Fuseless				
Proteção contra sobretemperatura	Sim				
GERAL					
Faixa de temperatura de operação	-25 ~ 60 °C				
Umidade relativa de operação	0% ~ 100% (sem condensação)				
Altitude de operação	0 ~ 4.000 m				
Resfriamento	Convecção natural				
Display	LEDs + APP				
Comunicação	RS485, WI-FI				
Configuração / Monitoramento	APP				
Peso (incluindo suporte de montagem)	12,3 kg				
Dimensão (incluindo suporte de montagem)	365 x 365 x 156 mm				
Grau de proteção	IP65				
Modo de operação	On-Grid, Grid-Zero, Off-Grid				
Nível de ruído	< 29 dB				
Consumo noturno	< 2,5 W				
OTIMIZADOR					
SUN2000-450W-P	Sim				
SUN2000-600W-P	Sim				
NORMAS ATENDIDAS					
Segurança	EN IEC 62109-1/2				
EMC	EN 61000-6-1/2/3/4 e EN 61000-3-2/3/11/12				
Rede	ABNT NBR 16149, NBR IEC 62116				

Nota: 1) A potência máxima de entrada do inversor muda para 10.000W quando usadas strings longas com otimizadores em todos os módulos FV.

2) SBW300 B050 W0 de 2.500W @ 5kWh.

As especificações e os recursos principais contidos nesta folha de dados podem divergir ligeiramente de nossos produtos reais devido a inovação e aprimoramento contínuo dos produtos. A WEG S.A. reserva-se o direito de fazer os ajustes necessários às informações aqui descritas a qualquer momento sem aviso prévio.



Grupo WEG - Automation Business Unit

Jaraguá do Sul - SC - Brazil

Phone: +55 47 3276 4000

automacao@weg.net

www.weg.net