



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

LIVIO FREITAS TORRES

**ANÁLISE DE GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA EM UM SISTEMA COM
SOMBREAMENTO PARCIAL UTILIZANDO MICROINVERSORES NA CIDADE
DE CABEDELO/PB**

FORTALEZA
2023

LIVIO FREITAS TORRES

**ANÁLISE DE GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA EM UM SISTEMA COM
SOMBREAMENTO PARCIAL UTILIZANDO MICROINVERSORES NA CIDADE
DE CABEDELO/PB**

Monografia submetida à Coordenação do curso de Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Energias Renováveis.

Orientadora: Profa. Dra. Fabiola Leite Almeida

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

T646a Torres, Livio Freitas.

Análise de geração solar fotovoltaica em um sistema com sombreamento parcial utilizando microinversores na cidade de Cabedelo/PB / Livio Freitas Torres. – 2023.
45 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2023.
Orientação: Profa. Dra. Fabiola Leite Almeida.

1. Sistema Fotovoltaico. 2. Irradiação. 3. Microinversor. I. Título.

CDD 621.042

LIVIO FREITAS TORRES

**ANÁLISE DE GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA EM UM SISTEMA COM
SOMBREAMENTO PARCIAL UTILIZANDO MICROINVERSORES NA CIDADE
DE CABEDELO/PB**

Monografia submetida à Coordenação do curso de Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Energias Renováveis.

Orientadora: Profa. Dra. Fabiola Leite Almeida

Aprovada em: 30/06/2023

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Fabiola Leite Almeida. (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Carlos Estevao Rolim Fernandes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Lucio e Ione e ao meu avô
Cecé.

AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de agradecer, em especial, meus pais Lucio e Ione, e meu irmão Levi, as pessoas mais importantes para mim, por todo o suporte prestado durante toda minha vida, me proporcionando tudo de melhor durante toda essa trajetória, me mostrando o valor da educação e do conhecimento, sendo eles minha maior inspiração. Meu avô Cecé que sempre esteve a disposição para me auxiliar em tudo que eu precisasse e a minha falecida avó Maria de Lourdes que foi muito importante no meu aprendizado durante toda minha infância.

À minha namorada Cândida por me apoiar e me acompanhar durante todos esses anos.

Agradeço também a todos os professores e colegas da Universidade Federal do Ceará e da Universidade Federal da Paraíba que de alguma forma contribuíram com meus conhecimentos adquiridos nesses anos de graduação.

À Nord Energy Engenharia por todo apoio e aprendizado durante o período de estágio, e por todo o material e suporte fornecido para realização deste trabalho.

Aos meus professores e amigos do ensino fundamental e médio do Colégio 7 de Setembro que sempre me motivaram e me fomentaram para eu ser o que sou hoje.

À toda minha família, que sempre esteve por perto me apoiando e oferecendo todo o suporte necessário e que de alguma forma direta ou indiretamente contribuiu com o meu crescimento, em especial ao meu tio José Antônio que não se encontra mais entre nós.

À minha orientadora Professora Ana Fabiola e aos integrantes da banca examinadora, professores Nivaldo e Estevo.

A todos vocês, meu sincero obrigado!

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano”.

Isaac Newton.

RESUMO

Dado o desenvolvimento socioeconômico crescente do Brasil, cada vez mais há busca por energia limpa, renovável e sustentável, por esse motivo esse trabalho apresenta o estudo de caso de um sistema de energia solar fotovoltaica, com um parcial sombreamento causado por uma caixa d'água e pouco espaço para instalação dos módulos, instalado no telhado de uma residência em um condomínio de casas na cidade de Cabedelo-PB, onde por um ano foi acompanhada a sua geração. Este trabalho tem o foco no estudo de caso, mostrando a localização do sistema, os parâmetros para realização do projeto, como foi feita a captação dos dados de irradiação, a escolha do módulo e a importância da escolha do microinversor e da utilização do software PVSYST para realização do projeto. Foi mostrada a documentação necessária para a homologação do sistema junto a concessionária de energia e a comparação dos resultados obtidos em relação aos esperados, além da demonstração da economia financeira realizada pelo cliente. O sistema em estudo apresentou valores de geração dentro de um limite de tolerância pré-estabelecido em relação aos cálculos realizados por software no início do projeto, onde mostrou resultados satisfatórios de geração no ano de 2022 próximo aos 2000kWh/mês projetados inicialmente.

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico; Irradiação; Microinversor.

ABSTRACT

Given the growing socioeconomic development of Brazil, there is an increasing search for clean, renewable and sustainable energy, for this reason this work presents the case study of a photovoltaic solar energy system, with a partial shading caused by a water tank and little space for installation of the modules, installed on the roof of a residence in a condominium of houses in the city of Cabedelo-PB, where for one year its generation was monitored. This work is focused on the case study, showing the location of the system, the parameters for the realization of the project, how the irradiation data was captured, the choice of the module and the importance of the choice of the microinverter and the use of the PVSYST software for the realization of the project. The necessary documentation for the approval of the system with the energy concessionaire was shown, as well as the comparison of the results obtained in relation to those expected, and the demonstration of the financial savings made by the client. The system under study presented generation values within a pre-established tolerance limit in relation to the calculations made by software at the beginning of the project, which showed satisfactory generation results in the year 2022 close to the 2000kWh/month initially projected.

Keywords: Photovoltaic System; Irradiation; Microinverter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil	15
Figura 2 - Matriz elétrica brasileira em maio de 2023.	16
Figura 3 - Célula fotovoltaica.	21
Figura 4 - Curva característica (I x V) de corrente e tensão de um módulo fotovoltaico	22
Figura 5 - Curva característica (P x V) de potência e tensão de um módulo fotovoltaico.	23
Figura 6 - Componentes de um módulo fotovoltaico.	24
Figura 7 - Inversor string	26
Figura 8 - Microinversor.	27
Figura 9 - String Box	28
Figura 10 - Mapa da localização da residência.	32
Figura 11 - Irradiação Solar no Plano Horizontal para Localidades Próximas	33
Figura 12 - Módulo fotovoltaico de 455Wp de potência.	34
Figura 13 - Características e parâmetros do módulo Fotovoltaico Canadian 455Wp	34
Figura 14 - Microinversor escolhido para o sistema fotovoltaico	35
Figura 15 - Características e parâmetros do Microinversor Hoymiles MI-1500.	36
Figura 16 - Balanços e principais resultados teóricos	37
Figura 17 - Placa de advertência - “CUIDADO – RISCO DE CHOQUE ELÉTRICO – GERAÇÃO PRÓPRIA”	38
Figura 18 - Foto aérea da residência pós-obra concluída.	39
Figura 19 - Energia anual total produzida por módulo no ano de 2022.	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Geração mensal de energia elétrica no ano de 2022	41
Gráfico 2 - Geração Realizada X Geração Esperada [kWh]	42
Gráfico 3 - Economia mensal no ano de 2022.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

DTU – Unidades Discretas de Tipagem

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas

EPI – Equipamento de Proteção Individual

EVA - Etileno Vinil Acetato

E_GRID – Energia Injetada na rede

FV – Fotovoltaico

ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

MPPT – Maximum Power Point Tracker

NBR – Norma Brasileira

NR – Norma Regulamentadora

ON GRID – Conectado à rede elétrica

OFF GRID – Desconectado da rede elétrica

UC – Unidade Consumidora

UV – Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{kWh/m}^2/\text{dia}$ – Quilowatt hora por metro quadrado por dia

G – Irradiação

A - Ampere

V – Volts

I – Corrente elétrica

P – Potência elétrica

A_M - Área da superfície do módulo

$E_{Módulo}$ - Energia produzida pelo módulo diariamente

E_S - Insolação diária

η_M - Eficiência do módulo

N_p - Número de módulos da instalação fotovoltaica

$E_{Sistema}$ - Energia produzida pelo sistema

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo Geral	17
2.2	Objetivos Específicos	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1	Energia Primária - Sol	18
3.1.2	<i>Definições</i>	18
3.1.3	<i>A Trajetória do Sol</i>	19
3.2	Componentes do Sistema Fotovoltaico	20
3.2.1	<i>Célula Fotovoltaica</i>	20
3.2.2	<i>Painel Fotovoltaico</i>	21
3.2.2.1	Curvas Características de Tensão, Corrente e Potência.....	22
3.2.2.2	Componentes do Módulo Fotovoltaico	23
3.2.3	<i>Inversor de Corrente CC-CA</i>	24
3.2.3.1	Microinversor	26
3.2.4	<i>String Box</i>	28
3.2.5	<i>Estrutura de Fixação</i>	29
3.3	Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico	30
4	METODOLOGIA	31
4.1	Localização do Sistema	31
4.2	Realização do Projeto	32
4.2.1	<i>Captação de Dados de Irradiação</i>	32
4.2.2	<i>Escolha do Módulo</i>	33
4.2.3	<i>Escolha do Inversor</i>	35
4.2.4	<i>Utilização do Software PVSYST</i>	36
4.2.5	<i>Homologação do Sistema junto a concessionaria de energia elétrica</i>	37
4.3	RESULTADOS E DISCURSSÕES	38
4.3.1	<i>Economia Mensal</i>	42
5	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Com o intuito de fornecer de forma sustentável um crescimento para o setor elétrico brasileiro de maneira não poluente e sem emissões de gases tóxicos ao meio ambiente, as fontes alternativas ganham cada vez mais força dentro da matriz energética brasileira, dentre elas se destaca a geração fotovoltaica, sendo cada vez mais utilizada dentro das normas técnicas e ambientais.

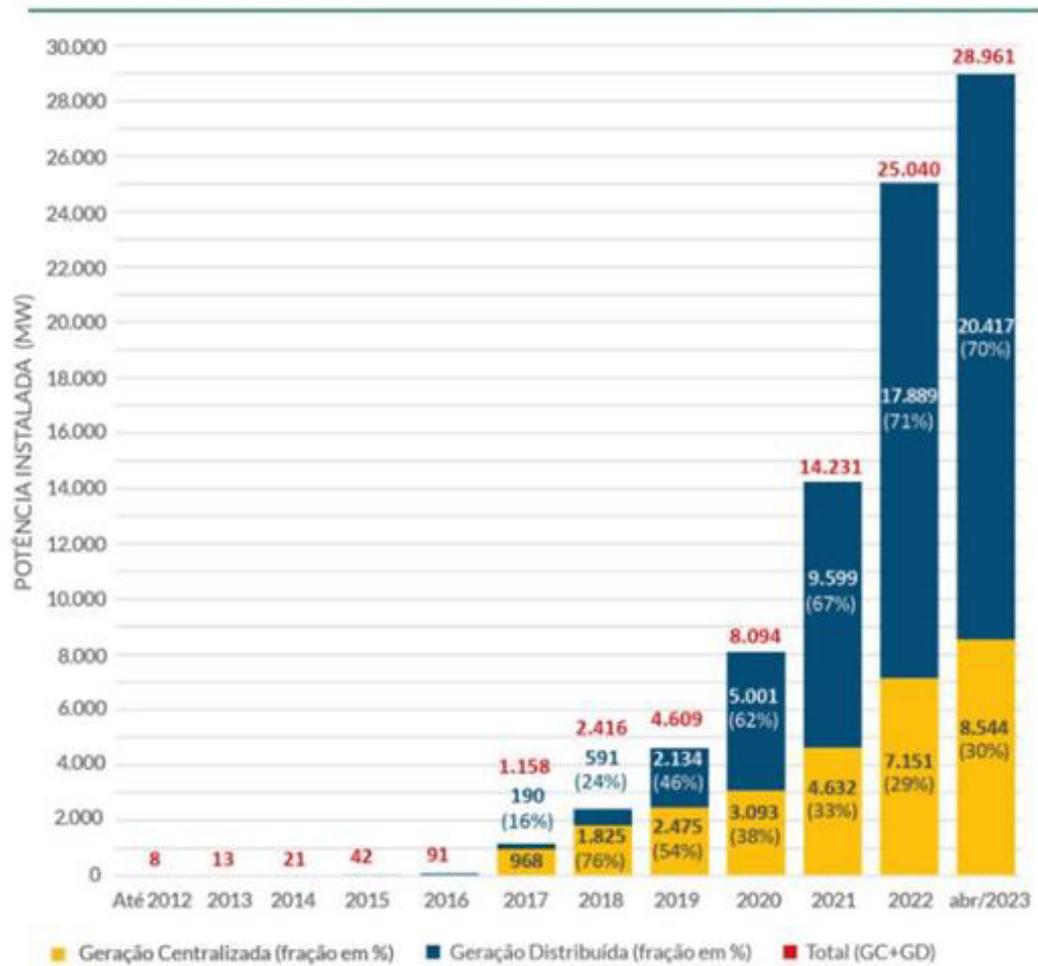
O efeito fotovoltaico foi descoberto por Edmond Becquerel, em 1839, em 1876 foi concebido o primeiro aparato tecnológico por meio da física do estado sólido, e apenas em 1956, iniciou-se a produção industrial seguindo o crescimento da área de eletrônica. No início, o desenvolvimento de tecnologias buscou empresas no setor de telecomunicações e de energias renováveis para sistemas em locais de difícil acesso, como comunidades em locais remotos, isoladas e sem acesso a rede de distribuição de energia elétrica. Um agente bastante impulsionador nesse setor foi a “corrida espacial”. A célula fotovoltaica é o meio mais adequado para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de alimentação de equipamentos eletroeletrônicos no espaço, visto seu menor custo, peso e segurança. (PINHO e GALDINO, 2014)

Com a crise do petróleo de 1973, um novo foco se dava para a energia solar fotovoltaica, mas se necessitava de uma maior viabilidade econômica e o custo teria que ser reduzido drasticamente em comparação as suas aplicações espaciais, o que levou a mudança do perfil das empresas envolvidas no setor. No final da década de 90, políticas de governo na Alemanha e no Japão resultaram no advento de tecnologias impactando positivamente esse mercado, e com o firmamento do Protocolo de Kyoto, gerou-se uma saída para a diminuição das emissões de gás carbônico. Mas o grande salto no desenvolvimento desse mercado se deu a partir da grande produção de células fotovoltaicas pela China a partir de 2006. (PINHO e GALDINO, 2014)

O mercado de energia solar está em constante crescimento inclusive no Brasil. Ter um sistema de energia solar é a uma das alternativas mais sustentáveis e econômicas de gerar e consumir energia elétrica.

A figura 1 ilustra a evolução da energia solar fotovoltaica no Brasil, em potência instalada (MW), tanto com geração centralizada quanto com geração distribuída, segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), 2023.

Figura 1-Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil



Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2023.

Os sistemas fotovoltaicos oferecem muitos benefícios, entre eles: reduz o valor das contas de luz, é de fácil instalação e baixo custo em relação ao tempo de vida útil, além de ser uma alternativa de baixo impacto ambiental. Para aproveitar a eficiência máxima das placas solares, é preciso se atentar para alguns fatores que podem afetar no seu desempenho e influenciar na eficiência do sistema fotovoltaico, como a temperatura e as condições físicas e climáticas do local de instalação.

Devido aos períodos de seca no Brasil nos últimos anos, os níveis nos reservatórios das hidroelétricas estiveram por muitas vezes em seus níveis críticos, sendo necessário a utilização das termoeletricas para manter a segurança energética do país, porém é uma fonte poluidora e para contornar isso destacam-se as fontes eólicas e solar, que em períodos de escassez hídrica conseguem ter uma geração acima da média.

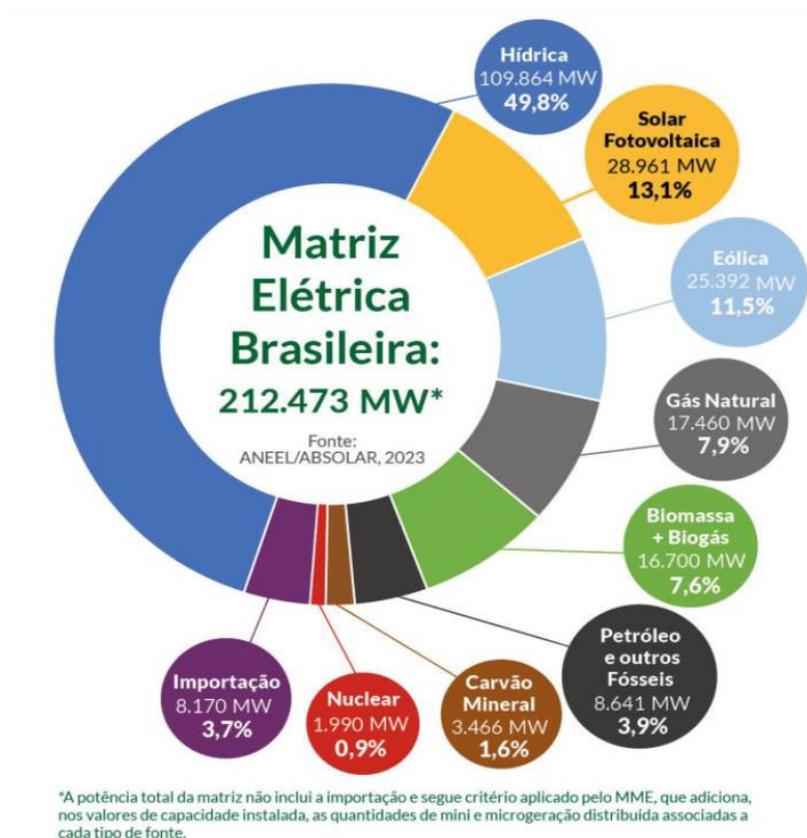
No Brasil, a geração distribuída se tornou bastante difundida nos últimos anos devido a incentivos do governo com a diminuição de impostos para importação de

equipamentos, facilidades de crédito e financiamento, além da difusão de novas tecnologias, as quais tornaram esses equipamentos mais acessíveis financeiramente a população de baixa e média renda. Além disso, o Brasil apresenta um enorme potencial para geração de energia solar devido a sua localização geográfica e forte radiação solar incidente no território, tornando ainda mais atrativa essa forma de geração elétrica.

De acordo com Pinho e Galdino (2014, p. 47), a energia proveniente do Sol é a fonte mais abundante e inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor como de luz. Deste modo, é possível através da radiação solar obter energia indireta, mediante a aplicação de coletores ou concentradores solares, ou energia direta, por meio de energia solar fotovoltaica

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), através dos dados fornecidos pelo Balanço Energético Nacional (MATRIZ, 2022), a matriz brasileira ainda é majoritariamente hidroelétrica, mas já se observa um grande aumento na matriz fotovoltaica que chegou a ultrapassar 28GW operacionais de potência em maio de 2023, se tornando a segunda maior fonte de energia brasileira, deixando a Energia Eólica para trás, em quantidade de potência, como é apresentada no infográfico da ABSOLAR e ilustrado na Figura 2.

Figura 2- Matriz elétrica brasileira em maio de 2023.



Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2023.

Para atingir a neutralidade de emissões de gases de efeito estufa até 2050, o Brasil precisa fazer a sua parte e pode transformar este desafio em uma grande oportunidade de acelerar seu desenvolvimento socioeconômico e ambiental.

A energia solar também pode ser utilizada para produção do hidrogênio verde, sendo assim, uma das possibilidades econômicas para a transição energética de descarbonização. Além de sustentável, o uso do hidrogênio diminui consideravelmente as emissões de gases de efeito estufa em setores complexos para descarbonizar, como a mineração, siderurgia, produção de aço e outros. Em poucos anos, o Brasil poderá produzir o hidrogênio verde mais competitivo do mundo, e com isso poderá se tornar um líder global na produção de combustível limpo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho teve por principal objetivo acompanhar a instalação, projeto e geração de energia de um sistema solar fotovoltaico com uma estrutura sombreada de alguns módulos geradores, e compará-la com a geração teórica calculada por software.

2.2 Objetivos Específicos

Destacam-se:

- Análise de dados de geração do sistema
- Comparação da geração teórica esperada com a geração real obtida.
- Análise de dados de potência e geração das placas individualmente sob efeito de sombreamento.
- Entender o funcionamento e as vantagens da utilização dos microinversores.
- Entender os processos de homologação de um sistema fotovoltaico.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Energia primária - Sol

O Sol é uma esfera de matéria gasosa intensamente quente com um diâmetro de $1,39 \times 10^9$ m e está, em média, a $1,5 \times 10^{11}$ m da Terra. Visto da Terra, o Sol gira sobre o seu eixo aproximadamente uma vez em cada 4 semanas. No entanto, ele não gira como um corpo sólido; o equador leva cerca de 27 dias e as regiões polares levam cerca de 30 dias para cada rotação. O Sol tem uma temperatura efetiva de corpo negro de 5777 K. A temperatura nas regiões centrais do interior é estimada em 8 milhões a 40 milhões K e a densidade é estimada em cerca de 100 vezes a da água. O Sol é, de fato, um reator de fusão contínuo com os seus gases constituintes como "recipiente de contenção" retido por forças gravitacionais. Foram sugeridas várias reações de fusão para fornecer a energia irradiada pelo Sol. A que é considerada a mais importante é um processo em que o hidrogênio (ou seja, quatro prótons) se combina para formar hélio (ou seja, um núcleo de hélio); a massa do núcleo de hélio é menor do que a dos quatro prótons, tendo a massa sido perdida na reação e convertida em energia. A energia produzida no interior da esfera solar a temperaturas de muitos milhões de graus tem de ser transferida para a superfície e depois irradiada para o espaço. Ocorre uma sucessão de processos radiativos e convectivos com sucessivas emissões, absorções e re-irradiações; a radiação no núcleo do Sol está nas partes de raios X e raios gama do espectro, com os comprimentos de onda da radiação a aumentar à medida que a temperatura diminui a distâncias radiais maiores. O Sol não funciona, de fato, como um radiador de corpo negro a uma temperatura fixa. Pelo contrário, a radiação solar emitida é o resultado composto das várias camadas que emitem e absorvem radiação de vários comprimentos de onda. (DUFFIE e BECKMAN, 2013)

3.1.2 Definições

Segundo (DUFFIE e BECKMAN, 2013) algumas definições acerca da energia emitida pelo sol, e muito importantes para a área de energia solar fotovoltaica, são dadas:

- Radiação de feixe: A radiação solar recebida do sol sem ter sido espalhada pela atmosfera. (A radiação de feixe é muitas vezes referida como radiação solar direta)
- Radiação difusa: A radiação solar recebida do sol após a sua direção ter sido alterada pela dispersão pela atmosfera.
- Radiação solar total: A soma do feixe e da radiação solar difusa numa superfície. (As medições mais comuns da radiação solar são a radiação total numa superfície horizontal, muitas vezes referida como radiação global na superfície).

- Irradiância (W/m^2): A taxa à qual a energia radiante incide numa superfície por unidade de área de superfície.
- Irradiação ou exposição radiante (J/m^2): A energia incidente por unidade de área numa superfície, encontrada por integração da irradiância ao longo de um tempo especificado, geralmente uma hora ou um dia. Insolação é um termo que se aplica especificamente à irradiação de energia solar.
- Radiosidade ou Exitância Radiante (W/m^2): A taxa à qual a energia radiante deixa uma superfície por unidade de área por emissão, reflexão e transmissão combinadas.
- Potência Emissiva ou Auto-Exitância Radiante (W/m^2): A taxa à qual a energia radiante deixa uma superfície por unidade de área apenas por emissão.
- Hora solar: É a hora baseada no movimento angular aparente do sol através do céu, sendo o meio-dia solar a altura em que o sol atravessa o meridiano do observador. A hora solar é a hora utilizada em todas as relações sol-ângulo; não coincide com a hora do relógio local. É necessário converter a hora padrão em hora solar aplicando duas correções. Primeiro, há uma correção constante para a diferença de longitude entre o meridiano do observador (longitude) e o meridiano no qual a hora padrão local é baseada. O sol leva 4 minutos para atravessar 1° de longitude. A segunda correção resulta da equação do tempo, que tem em conta as perturbações na taxa de rotação da Terra que afetam o tempo em que o Sol atravessa o meridiano do observador.

3.1.3 A trajetória do sol

Compreender o Sol, a Terra e as relações da matriz de superfície, é essencial para compreender como projetar um sistema Fotovoltaico, e a eficiência desse sistema tem a ver com o modo que ele recebe a energia em seu ambiente. Isso inclui a temperatura da célula e a concentração de luz solar recebida. É necessário avaliar cuidadosamente os fatores ambientais de cada local.

Segundo (BALFOUR et al., 2014), a quantidade utilizável de radiação solar disponível no local depende dos seguintes fatores:

- Condições locais: As condições locais, como árvores e obstruções, podem sombrear os raios solares. Outras condições incluem poeira, sujeira ou poluentes locais transportados pelo ar, como resíduos de diesel ou querosene, fluxo de ar, montagem e outros.
- Clima: O tempo nublado diminui a concentração da radiação solar e a neve pode cobrir os painéis solares, diminuindo o desempenho.

- **Latitude:** A localização no planeta afeta o ângulo da luz solar e, com isso, a quantidade de radiação solar.
- **Forma:** A forma redonda da Terra faz com que a luz solar atinja o planeta em ângulos variados.
- **A trajetória da Terra em torno do Sol:** A órbita da Terra faz com que a luz solar atinja uma superfície no planeta em ângulos e intensidades variados, de hora em hora, diária, mensal, sazonal e anualmente.
- **Órbita elíptica:** A Terra gira em torno do Sol em uma elipse, o que traz a Terra para mais perto e mais longe do Sol.
- **Eixo:** Durante o inverno no hemisfério Norte, o polo Norte aponta para longe do Sol, enquanto o polo Sul aponta para o Sol. Isso resulta em diferenças na energia disponível entre os polos Norte e Sul. Os raios solares atingem a Terra em um ângulo oblíquo, começando em zero grau com o Sol logo acima do horizonte. Quando o Sol está diretamente acima da cabeça, ao meio-dia solar no equador, os raios atingem a Terra a 90 graus. A densidade energética em uma superfície fica menor porque os raios precisam percorrer um ângulo mais oblíquo.

3.2 Componentes do Sistema Fotovoltaico

3.2.1 Célula Fotovoltaica

Os conversores fotovoltaicos são dispositivos semicondutores que convertem parte da radiação solar incidente diretamente em energia eléctrica. As células solares estão a ser utilizadas em diversas aplicações, desde a alimentação de relógios e calculadoras, passando pelo carregamento de baterias para barcos e sistemas de comunicação, até sistemas de média escala para produção de energia. A energia fotovoltaica tem sido o meio de fornecimento de energia à maioria dos satélites lançados desde o início dos programas espaciais. (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

Existem diversos tipos de células fotovoltaicas, que são classificadas pelo material e refinamento usados. Os principais tipos de células fotovoltaicas são produzidos em silício cristalizado, podendo ser monocristalino ou policristalino. Com o uso de diferentes elementos é possível criar dois tipos distintos do mesmo material semicondutor, um com átomos negativamente carregados (com excesso de elétrons), chamado de Tipo-N, e outro com átomos positivamente carregados (com falta de elétrons ou “buracos”), chamado de Tipo-P. A célula solar fotovoltaica convencional é fabricada a partir da união desses dois tipos do semicondutor.

A célula fotovoltaica funciona a partir da incidência dos raios do sol, que movimenta os elétrons do seu material semicondutor, gerando a corrente elétrica. (PORTAL SOLAR, 2022).

Um exemplo de célula fotovoltaica é apresentado na figura 3.

Figura 3- Célula fotovoltaica.



Fonte: Portal Solar (2022).

3.2.2 Painel Fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico é composto por células fotovoltaicas conectadas em arranjos para produzir tensão e corrente suficientes para a utilização prática da energia, ao mesmo tempo em que promove a proteção das células. O número de células conectadas em um módulo e seu arranjo, que pode ser série e/ou paralelo, depende da tensão de utilização e da corrente elétrica desejadas. É importante ter cuidado com a seleção das células a serem reunidas no momento da fabricação do módulo, devido a suas características elétricas. (PINHO e GALDINO, 2014).

Os módulos solares são feitos normalmente de células solares encapsuladas em outro material e depois impressadas entre duas camadas de substrato. O projeto do encapsulamento protege as células solares do ambiente. Isso é particularmente importante, pois os sistemas FV frequentemente são utilizados em áreas remotas onde os fatores ambientais são uma consideração importante. O mais comum é que as células solares sejam laminadas em vácuo no Etileno-vinil acetato (EVA). O encapsulamento EVA é comum nos módulos padrão e nos módulos personalizados. Isso é necessário para a durabilidade do módulo. Os módulos solares têm que enfrentar ambientes hostis. Os perigos ambientais comuns incluem as partículas pequenas, como o pó, a areia, a sujeira e o sal; pássaros e outros animais; vento, neve, granizo, chuva e umidade; evaporação da umidade e condensação; exposição prolongada aos raios UV; e gases e poluentes presentes na atmosfera. Os módulos precisam enfrentar impactos, ser

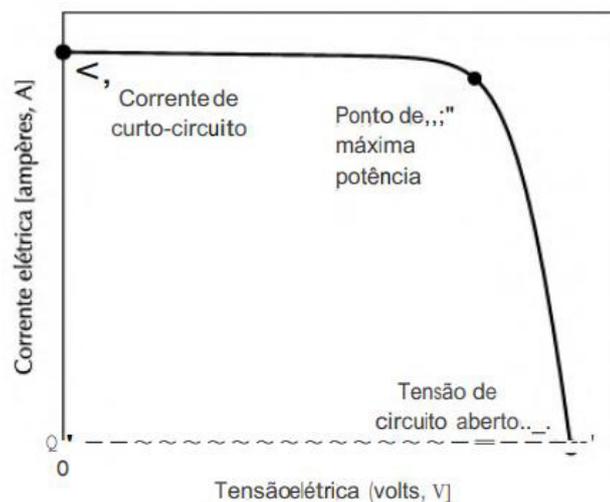
resistentes a abrasões e manchas e ter uma superfície que promova a autolimpeza. A corrente elétrica produzida por uma célula depende da sua área, pois a corrente elétrica depende diretamente da quantidade de luz recebida pela célula. Quanto maior a área, maior a captação de luz e maior a corrente fornecida. Geralmente os módulos cristalinos comerciais fornecem mais corrente elétrica do que os módulos de filmes finos. (BALFOUR et al., 2014).

3.2.2.1 Curvas características de tensão, corrente e potência

O módulo fotovoltaico não apresenta uma tensão de saída constante nos seus terminais. A tensão elétrica depende da sua corrente e vice-versa. O ponto de operação do módulo fotovoltaico, ou seja, o valor da tensão e da corrente nos seus terminais, depende do que está conectado aos seus terminais. Se conectado um aparelho que demanda muita corrente, a tensão de saída do módulo tenderá a cair. Por outro lado, se conectado uma carga que demanda pouca corrente, a tensão do módulo será mais elevada, tendendo à tensão de circuito aberto. A corrente de curto-circuito é aquela que acontece quando se coloca o curto-circuito os terminais do módulo. Nesta situação não existe tensão elétrica e a corrente do módulo alcança o seu valor máximo. A tensão de circuito aberto é aquela que se mede na saída do módulo quando seus terminais estão abertos, ou seja, quando não existe nada ligado a ele. Esta é a máxima tensão que o módulo pode fornecer. (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

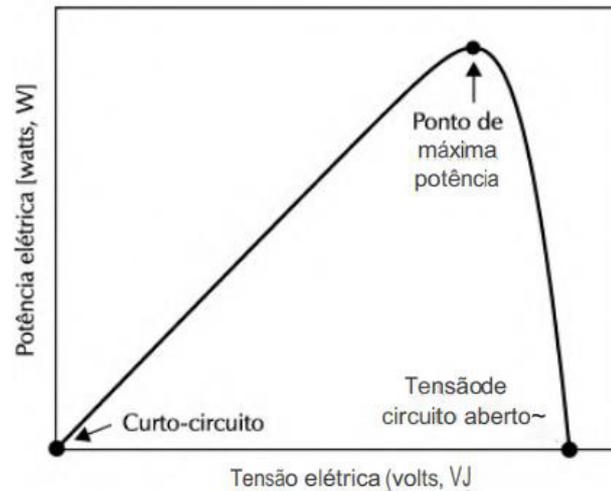
Todos os módulos fotovoltaicos possuem uma característica semelhante. Para cada curva $I - V$, existe uma curva $P - V$ correspondente. As relações entre a tensão e a corrente de saída de um módulo fotovoltaico e como a potência do módulo varia em função de sua tensão são mostradas nas figuras 4 e 5 a seguir:

Figura 4 - Curva característica ($I \times V$) de corrente e tensão de um módulo fotovoltaico



Fonte: VILLALVA e GAZOLI (2012).

Figura 5- Curva característica (P x V) de potência e tensão de um módulo fotovoltaico.



Fonte: VILLALVA e GAZOLI (2012).

3.2.2.2 Componentes do módulo fotovoltaico

Os painéis fotovoltaicos devem ser fabricados utilizando-se a melhor tecnologia para que eles possam durar por décadas conforme foram projetados.

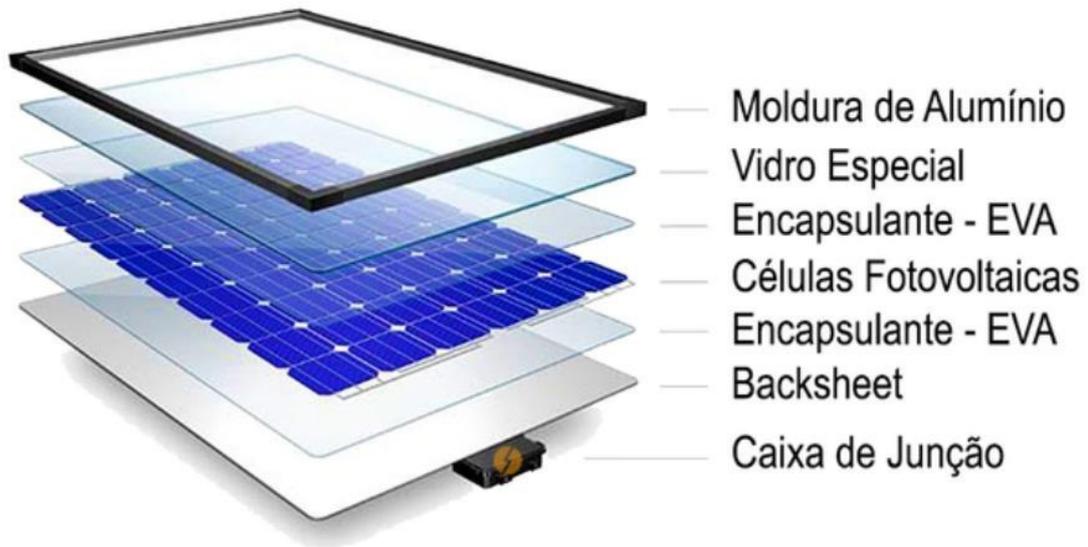
Segundo o (PORTAL SOLAR, 2022) os principais componentes de um módulo fotovoltaico são:

- Células Fotovoltaicas: são feitas a partir de uma "fatia" de cristal de silício ultrapuro e precisam ser manuseadas com extremo cuidado pois trincam com muita facilidade.
- Vidro Fotovoltaico: é um vidro especial ultrapuro com baixo teor de ferro, desenvolvido especialmente para refletir menos e deixar o máximo de luz passar através dele. Os painéis com vidros de boa qualidade vão resistir a impactos como em uma chuva de granizo
- Filme Encapsulante – EVA: é um material selante de cura rápida especificamente projetado para os painéis fotovoltaicos. Ele protege as células fotovoltaicas contra o envelhecimento causado por raios UV, temperaturas extremas e umidade.
- Backsheet (Material plástico branco que vai na parte de trás do painel solar): tem como função proteger os componentes internos do painel e agir como um isolante elétrico.
- Caixa de Junção: fica colada na parte de trás do painel e é onde as células interconectadas (strings) são conectadas eletricamente.
- Moldura do Painel Solar: Ao redor de um painel é adicionada uma moldura de alumínio anodizado especialmente desenvolvida para adicionar robustez ao painel solar e garantir

a sua integridade nas mais adversas situações. Ela serve tanto para proteger o painel na hora da instalação como para assegurar que o painel solar não "torça" causando trinca nas células.

Esses componentes são ilustrados na figura 6:

Figura 6- Componentes de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Portal Solar (2022).

3.2.3 Inversor de corrente CC-CA

Quando os fótons atingem uma célula solar, eles soltam os elétrons de seus átomos. Se os condutores estão ligados aos lados positivo e negativo de uma célula, forma um circuito elétrico. Quando os elétrons fluem por esse circuito, eles geram eletricidade. Os painéis solares fotovoltaicos geram eletricidade de corrente contínua (CC), mas a eletricidade de corrente alternada (CA) foi escolhida para a rede de energia elétrica, principalmente porque é menos dispendiosa transmitir por longas distâncias.

Por isso, é necessário ter em um sistema fotovoltaico um inversor, que é um dispositivo eletrônico que fornece energia elétrica em CA a partir de uma fonte de energia elétrica em CC. A energia CC pode ser proveniente, por exemplo, além de módulos fotovoltaicos, de baterias e células a combustível. A tensão CA de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas a serem alimentadas. Adicionalmente,

no caso de sistemas conectados à rede elétrica a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com a tensão da rede. (PINHO e GALDINO, 2014)

De acordo com Villalva e Gazoli (2012), um inversor CC-CA para sistema fotovoltaico autônomo, possui geralmente as especificações e características mostradas a seguir:

- Potência nominal: É a potência que o inversor pode fornecer em operação normal. Deve ser escolhida de acordo com os equipamentos aos quais ele irá alimentar.
- Potência máxima: É a potência que o inversor pode fornecer em situações de sobrecarga durante um curto intervalo de tempo. Muitos inversores conseguem fornecer uma potência superior a nominal.
- Tensão de entrada CC: É a tensão nominal de entrada do inversor. É fornecida pelo fabricante.
- Tensão de saída CA: É a tensão que o inversor fornece na saída em corrente alternada. Geralmente elas são de 110V ou 220V, cabe ao projetista escolher a que melhor convém.
- Frequência de saída: É a frequência da tensão de saída em corrente alternada fornecida pelo inversor. No Brasil geralmente a frequência é de 60Hz.
- Regulação de tensão: É a variação relativa (em percentagem) da tensão de saída do inversor quando um consumidor está ligado à sua saída de tensão alternada.

Para um bom projeto fotovoltaico é interessante o conhecimento dessas especificações para que não ocorra nenhum problema com os equipamentos eletrônicos nem com a rede elétrica. A figura 7 mostra um inversor string em uma instalação residencial.

Figura 7- Inversor string



Fonte: Acervo pessoal

3.2.3.1 Microinversor

Os microinversores possuem dimensões reduzidas e ficam instalados debaixo dos painéis solares, no próprio telhado. São conectados diretamente a estes painéis, não necessitando nenhum espaço adicional e exigindo apenas a interligação ao quadro elétrico. Ele possui a mesma função do inversor string que por sua vez é fixado normalmente em paredes e precisa de dutos elétricos devidamente dimensionados para interligá-lo, tanto ao quadro elétrico do imóvel quanto aos painéis. Os microinversores estão em constante evolução e expansão no mercado, podendo ligar os painéis fotovoltaicos de forma independente, gerando algumas vantagens. Tendo em vista que cada entrada é independente, os microinversores possuem rastreadores do ponto de máxima potência (MPPT) em nível de cada painel. Diferenças entre painéis, causada por sujeira ou sombreamento (fezes de passarinho, por exemplo), diferenças na inclinação ou na orientação de cada módulo, afetam apenas aquele dispositivo. Todos os outros permanecem em seu ponto de máxima performance. É possível monitorar essas grandezas para cada módulo individualmente. (SANUS, 2023)

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico passa pela potência do inversor. A

situação financeiramente ideal normalmente é o aproveitamento máximo do inversor em relação ao número de painéis a ele conectado. Dessa forma, inversores possuem baixa flexibilidade em relação à expansão, pois estão limitados à sua potência, que na maioria dos casos já foi dimensionada próxima ao seu limite. Caso o inversor possua disponibilidade de potência para expansão, somente poderá receber painéis adicionais se estes forem da mesma marca e modelo, uma vez que estão ligados em série. Como o avanço tecnológico é acelerado, normalmente após o período de dois anos, torna-se muito difícil encontrar no mercado painéis de reposição compatíveis. Essa restrição aplica-se para ampliações de menor porte, pois para expansões maiores com inversores string, a utilização de dois ou mais inversores é possível e recomendada. No caso dos microinversores, a expansão pode ser feita de maneira modular, adicionando-se microinversores ao sistema existente, com painéis iguais entre si. Em contrapartida, se a locação e o espaço não forem problemas, de uma maneira geral a utilização de inversores string se mostra mais atrativa financeiramente, pois o custo do microinversor ainda é mais elevado. (SANUS, 2023)

De acordo com Balfour et al., 2014, muitos projetistas usam microinversores como solução para o sombreamento parcial das strings. Isso permite que o sistema continue a funcionar mesmo quando partes de uma string sofrem sombreamento. Infelizmente, muitas vezes isso leva a excessos quando os projetistas incorporam sombreamento demais no painel em seus projetos. Os projetistas agem como se a perda de um painel, dois ou mais não fosse uma perda real, mas é. Ainda complementa que se deve evitar o uso de microinversores como atalho para o projeto adequado. A figura abaixo demonstra um microinversor.

Figura 8 - Microinversor.



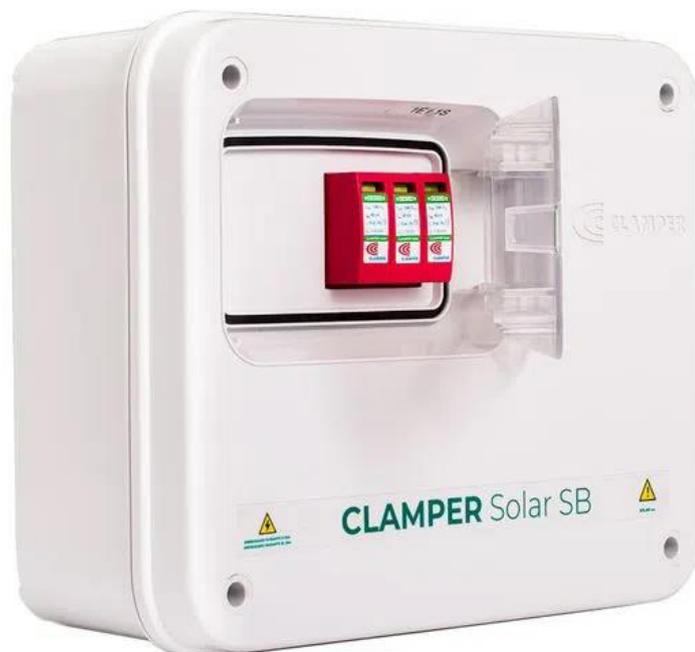
Fonte: Ecori Energia Solar

3.2.4 String Box

A norma brasileira de instalações elétricas de baixa tensão – NBR 5410 – e a norma brasileira sobre sistemas fotovoltaicos – NBR 16690 – preveem que as instalações devem ter como características básicas a proteção contra choque elétrico do usuário, proteção contra efeitos térmicos e incêndios, proteção contra sobrecorrente, proteção contra sobretensão e capacidade de seccionamento. A string box é o componente de proteção da parte CC do sistema fotovoltaico, ela conecta os cabos vindos dos módulos fotovoltaicos ao inversor, enquanto fornece proteção contra sobretensão e sobrecorrente e permite o seccionamento do circuito. (CANAL SOLAR, 2019)

A string box é instalada próxima ao inversor, no entanto, se a distância entre o painel solar e o inversor estiver superior a 10 metros, há necessidade de instalar uma string box a mais. Dessa forma, uma delas se posiciona perto do inversor e a outra, fica próxima dos painéis. Além disso, microinversores não necessitam de String box, e muitos fabricantes de inversores string já dispensam a string box por já vir a tecnologia dentro do próprio inversor. (ALDO, 2021). Um exemplo de string box é demonstrado na figura 9.

Figura 9 - String Box



Fonte: Loja Clamper

3.2.5 Estrutura de Fixação

O principal objetivo das estruturas de fixação é assegurar de que os painéis não se desprenderão de onde foram instalados. Segundo PINHO et al., 2014,

“A estrutura de suporte dos módulos fotovoltaicos tem como função posicioná-los de maneira estável. Além disso, ela deve assegurar a ventilação adequada, permitindo dissipar o calor que normalmente é produzido devido à ação dos raios solares e ao processo de perdas na conversão de energia. Isto é importante porque a eficiência dos módulos diminui com a elevação da temperatura, podendo até comprometer seu funcionamento normal. Deve ainda possibilitar o distanciamento entre módulos, conforme indicação do fabricante, para evitar danos mecânicos aos mesmos conforme sua dilatação”. (PINHO et al., 2014)

A tabela 1 mostra as vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de instalação de estruturas de sistemas fotovoltaicos:

Tabela 1: Vantagens e desvantagens das diferentes formas de instalação

Forma de Instalação	Vantagens	Desvantagens
(1) Estrutura de sustentação no solo	<ul style="list-style-type: none"> Fácil instalação. Fácil manutenção. Estrutura robusta. Indicado para sistemas de qualquer porte. 	<ul style="list-style-type: none"> Mais propícia a situações de sombreamento. Mais sujeita a acúmulo da poeira e contato de pessoas, objetos e animais.
(2) Poste	<ul style="list-style-type: none"> Fácil instalação. Menos propícia a situações de sombreamento. Mais segura contra contato de pessoas, objetos e animais. 	<ul style="list-style-type: none"> Estrutura menos robusta. Maior dificuldade de manutenção. Indicada apenas para sistemas de pequeno porte.
(3) Fachada	<ul style="list-style-type: none"> Menos propícia a situações de sombreamento. Mais segura contra contato de pessoas, objetos e animais. Ajuda a reduzir a carga térmica interna da edificação. 	<ul style="list-style-type: none"> Instalação mais trabalhosa. Maior dificuldade de manutenção. Riscos associados ao trabalho em altura. O porte do sistema deve ser adequado à área e à suportabilidade mecânica da edificação.
(4) Sobre a edificação	<ul style="list-style-type: none"> Menos propícia a situações de sombreamento. Mais segura contra contato de pessoas, objetos e animais. Estrutura de suporte mais simples. 	<ul style="list-style-type: none"> Instalação mais trabalhosa. Maior dificuldade de manutenção. Riscos associados ao trabalho em altura. O porte do sistema deve ser adequado à área e à suportabilidade mecânica da cobertura.

Fonte: Adaptado de (PINHO et al., 2008)

Para realização da montagem e para garantir a segurança na instalação, o sistema deve ser instalado apenas por profissionais tecnicamente qualificados e/ou com experiência em sistemas de montagem, antes da montagem, deve-se checar se a estrutura do telhado suporta a carga a ser instalada. Os profissionais devem seguir as normas de segurança no trabalho para prevenção de acidentes, utilizando Equipamentos de Proteção Individuais (EPI's) como capacete, sapatos antiderrapantes, luvas, óculos, equipamentos de proteção antiqueda, como cinto de segurança, talabarte.

Deve-se ter a presença de dois profissionais durante toda a instalação. Para trabalho em altura, o profissional deve estar habilitado pela NR 35, e deve sempre levar para o local da instalação o manual de montagem da estrutura.

No caso do projeto em estudo, por ser de pequeno porte, o projeto foi instalado sobre o telhado, pois a casa possuía resistência estrutural adequada.

3.3 Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

Após definir o modelo de módulo e sua potência que será utilizada, deve-se determinar a quantidade de energia produzida pelo painel na localidade em que será instalado. Como os sistemas conectados à rede sempre dispõem de um sistema de MPPT, o método definido é aquele baseado na insolação diária, ou seja, no valor do quilowatt-hora por metro quadrado diário [kWh/m²/dia] disponível em uma determinada localidade. Conhecendo a área do módulo e a sua eficiência, calcula-se com facilidade a energia elétrica por ele produzida diariamente. Para saber a produção mensal, basta multiplicar por 30 o valor diário obtido. (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Ainda segundo (VILLALVA e GAZOLI, 2012), a energia produzida pelo módulo fotovoltaico é calculada utilizando a Eq. (1):

$$E_{MÓDULO} = E_S \times A_M \times \eta_M \quad (1)$$

Onde:

$E_{MÓDULO}$ = Energia produzida pelo módulo diariamente, *Wh*;

E_S = Insolação diária, $\frac{Wh}{m^2}/dia$;

A_M = Área da superfície do módulo, *m*²

η_M = Eficiência do módulo.

Após o cálculo da energia produzida pelo módulo e conhecendo a energia que se deseja produzir diariamente ou mensalmente, determina-se o número de módulos necessários para o sistema utilizando a Eq. (2):

$$NP = E_{SISTEMA} \div E_{MÓDULO} \quad (2)$$

Onde:

NP = Número de módulos da instalação fotovoltaica;

$E_{SISTEMA}$ = Energia produzida pelo sistema no intervalo de tempo considerado, *kWh*;

$E_{MÓDULO}$ = Energia produzida por um módulo no mesmo intervalo de tempo, *kWh*.

4 METODOLOGIA

Por meio do estudo de caso será possível compreender os fenômenos individuais, os processos organizacionais e políticos da sociedade.

O projeto do sistema fotovoltaico em estudo foi desenvolvido para suprir a demanda de energia elétrica do local, e para isso, foram obtidos os dados de média de consumo energético da propriedade e sua localização, tudo por meio da conta de energia elétrica, além de uma conversa com o cliente para entendimento de futuras necessidades energéticas para um melhor dimensionamento do sistema proposto. Foram captados dados de geração por meio da plataforma do microinversor Hoymiles e comparados com os dados teóricos obtidos por meio do Software PVsyst, o qual foi utilizada sua licença adquirida pela empresa Nord Energy Engenharia.

Após uma análise preliminar do local, uma visita técnica foi feita para realização da viabilidade real do projeto, que foi escolhido por já está instalado desde 2021, podendo assim ser analisado os dados de 2022 por completo.

4.1 Localização do sistema

O projeto se encontra em uma residência particular em um condomínio privado de casas na cidade de Cabedelo, no estado da Paraíba, Brasil, como mostrado na figura 10, onde verificou-se uma excelente possibilidade de geração de energia elétrica alternativa e renovável, por meio da fonte solar fotovoltaica, por apresentar elevados índices de irradiação solar durante

todo os meses do ano, e pela a instalação ser feita no telhado da residência, não apresentando riscos ambientais durante a fase de obras e sendo de fácil execução. Além disso, como a instalação se encontra em um condomínio na zona urbana, o sistema escolhido foi o conectado à rede de energia elétrica local, “on grid”, o que barateia o projeto em relação ao desligado das redes “off grid”, por causa do alto custo financeiro das baterias, além de contribuir com o meio ambiente, pois o descarte dessas baterias pode acarretar impactos ambientais, devido ao material no qual elas são fabricadas.

Figura 10 - Mapa da localização da residência



Fonte: Google Earth.

4.2 Realização do projeto

4.2.1 Captação de dados de irradiação

De acordo com o consumo de energia elétrica do cliente obtido por sua conta de luz, ficou estabelecido 2000kWh/mês de demanda de energia. Com este valor estabelecido, e dado o local de instalação, os dados de irradiação foram extraídos do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), por meio do programa potencial solar - SunData 3.0v, este programa destina-se ao cálculo da irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional e constitui-se em uma tentativa de oferecer uma ferramenta de apoio ao dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Segundo o próprio

site do CRESESB:

“A primeira versão do programa foi elaborada em 1995 com a finalidade de auxiliar o dimensionamento dos sistemas nas diversas fases do PRODEEM e foi adaptado, no ano seguinte, para consulta via *web*. A primeira e a segunda versão do SunData utilizaram dados do *Valores Medios de Irradiacion Solar Sobre Suelo Horizontal* do Centro de Estudos de la Energia Solar (CENSOLAR, 1993) contendo valores de irradiação solar diária média mensal no plano horizontal para cerca de 350 pontos no Brasil e em países limítrofes. Após a publicação da 2ª Edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar em 2017, o Cresesb obteve autorização para utilizá-lo na atualização da base de dados do SunData. Produzido a partir de um total de 17 anos de imagens de satélite e com informações de mais de 72.000 pontos em todo o território brasileiro, o Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª Edição é o que se tem de mais moderno em informações de irradiação solar no Brasil. Vale lembrar que as informações apresentadas são indicativas e possuem as limitações dos modelos utilizados. Para avaliações mais precisas recomenda-se a medição da irradiação no local de interesse.” (CRESESB, 2014).

Após inserir os dados locais da residência de latitude: -7.05° Sul e longitude: -34.83° Oeste na plataforma, obteve-se os dados de irradiação mensal e a média naquela região por inclinação, como mostra a figura 11:

Figura 11 - Irradiação Solar no Plano Horizontal para Localidades Próximas

Estação: Joao Pessoa
 Município: Joao Pessoa , PB - BRASIL
 Latitude: $7,101^\circ$ S
 Longitude: $34,849^\circ$ O
 Distância do ponto de ref. ($7,05^\circ$ S; $34,83^\circ$ O) :6,1 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,86	6,00	6,01	5,37	4,82	4,36	4,47	5,26	5,76	6,05	6,24	6,15	5,53	1,88
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	7° N	5,62	5,86	6,00	5,51	5,06	4,62	4,72	5,46	5,81	5,95	6,00	5,85	5,54	1,38
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	4° N	5,73	5,93	6,01	5,45	4,97	4,52	4,62	5,38	5,80	6,00	6,11	5,99	5,54	1,59
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	20° N	5,02	5,43	5,82	5,61	5,36	4,97	5,04	5,65	5,75	5,59	5,39	5,16	5,40	,85

Fonte: CRESESB

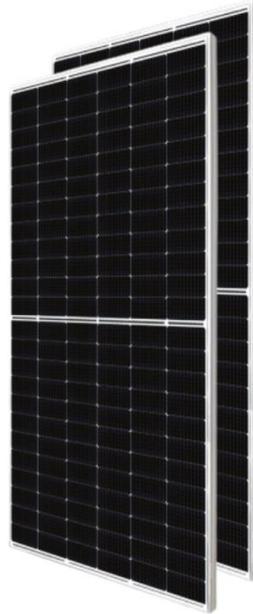
O site apresenta quatro valores de médias de acordo com a inclinação, o escolhido foi o ângulo de 7° por ser o ângulo que mais se aproxima da latitude e o do ângulo de instalação dos módulos fotovoltaicos que é aproximadamente 10° . Como pequenas variações na inclinação não resultam em grandes mudanças na energia gerada anualmente e a localização fica próxima à linha do equador tendo uma baixa latitude, escolheu-se essa inclinação para favorecer a autolimpeza dos módulos pela ação da água da chuva.

4.2.2 Escolha do módulo

Por questões comerciais o módulo escolhido foi o de 455Wp de potência. Sua

ilustração e suas características são apresentadas nas figuras 12 e 13:

Figura 12 - Módulo fotovoltaico de 455Wp de potência



Fonte: Energia Total.

Figura 13 - Características e parâmetros do módulo Fotovoltaico Canadian 455Wp


CanadianSolar

MODEL TYPE: CS3W-455MS
 Made in China. Cell origin: China

Nominal Maximum Power (Pmax):	455 W	 <small>INSTALLATION MANUAL</small>
Optimum Operating Voltage (Vmp):	41.3 V	
Optimum Operating Current (Imp):	11.02 A	
Open Circuit Voltage (Voc):	49.3 V	
Short Circuit Current (Isc):	11.66 A	
Maximum System Voltage :	1500 V	
Maximum Series Fuse Rating :	20 A	

All electrical data at Standard Test Conditions (STC) Irradiance of 1000W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.
 Production tolerance: ±3%(Pmax), ±5%(Voc, Isc).

Fire Rating: **CLASS C**
 Protection Class(IEC61140): **CLASS II**

WARNING-ELECTRIC HAZARD



This solar module produces electrical voltage when exposed to sunlight or intense artificial lights. Proper precautions associated with electrical power systems must be taken while handling and installing this product.

Please read the installation manual for more information prior to installation. REACH compliance information (applicable for EU and EEA countries only) is described therein. The installation manual can be downloaded on Canadian Solar website: <https://www.csisolar.com/downloads>

Certified to IEC61215:2016, IEC61730:2016 CSI Solar Co., Ltd.






www.csisolar.com support@csisolar.com

Fonte: Canadian Solar

Após essa etapa, foi realizada uma visita técnica ao local de instalação para saber a real viabilidade do projeto, sendo checados vários fatores, dentre eles: espaço adequado no telhado, estrutura do telhado, conexões elétricas da residência e da localidade, sombreamentos e fatores adversos que possam interferir no sistema fotovoltaico.

4.2.3 Escolha do Inversor

Com a realização da visita técnica foi constatada a presença de uma caixa d'água de aproximadamente 3m de altura e 6,5m de comprimento, podendo ocasionar em perdas no sistema por sombreamento, também foi averiguado pouco espaço para instalação de módulos na mesma orientação.

Por isso, foi proposto a instalação de microinversores, pois o sombreamento dos módulos fotovoltaicos afeta negativamente o desempenho do MPPT e pode comprometer a eficiência global do sistema, a análise das sombras é relevante para a otimização da produção de energia. Além disso, os inversores strings disponíveis comercialmente na época na faixa de potência desejada não apresentavam números de MPPT suficientes para como a instalação foi feita, utilizando quatro orientações.

O microinversor trabalha e monitora independentemente o desempenho de cada painel garantindo a geração máxima ao longo do dia. Além disso, cada microinversor utilizado apresenta 4 MPPT podendo-se assim utilizar melhor o espaço com quatro orientações de módulos, o que foi de grande utilidade no projeto devido ao espaço reduzido no telhado.

O microinversor escolhido e seus parâmetros encontram-se nas figuras 14 e 15:

Figura 14 - Microinversor escolhido para o sistema fotovoltaico



Fonte: datasheet Hoymiles.

Figura 15 - Características e parâmetros do Microinversor Hoymiles MI-1500

Dados de Entrada (DC)	
Potência do módulo geralmente usada (W)	300 ~ 470
Faixa de tensão de pico de potência MPPT (V)	Módulos fotovoltaicos de 60 ou 72 células
Tensão de inicialização (V)	36-48
Dados de Saída (CA)	
Faixa de tensão de operação (V)	16-60
Tensão máxima de entrada (V)	60
Corrente máxima de entrada (A)	4*11.5
Dados de Saída (CA)	
Potência de saída de pico (W)	1500
Corrente nominal de saída (A)	6.82 / 6.52 / 6.25
Tensão nominal de saída (V)	220 / 230 / 240
Faixa de tensão de saída nominal (V)	180-275 ¹
Frequência/intervalo nominal (Hz)	60/55-65 ¹
Fator de potência	>0.99
Distorção harmônica total	<3%
Unidades máximas por filial	3 / 3 / 3

Fonte: Datasheet Hoymiles.

4.2.4 Utilização do Software PVSYST

Depois de escolhidos os módulos e o microinversor, foi utilizado o software PVSYST, uma ferramenta que ajuda no dimensionamento de projetos fotovoltaicos, o qual seu principal diferencial é a precisão nos resultados devido às variáveis que são consideradas pelo programa, assim pode-se saber a geração teórica mensal e anual, perdas por sombreamento, perdas ôhmicas, perdas devido ao nível de irradiância, perdas devido à temperatura, perdas de qualidade do módulo, perdas de desfasamento módulos e strings, perdas de orientação mista, perdas relacionadas ao inversor durante o funcionamento (eficiência), potência nominal corrente máxima de entrada, tensão nominal de entrada, limiar de potência e limiar de tensão.

Com isso, foram projetados 34 módulos de 455Wp cada e 10 microinversores de 1500W cada. Totalizando uma potência nominal total de módulos de 15.47kWp. E dessa forma obteve-se os resultados teóricos demonstrados na figura 16:

Figura 16- Balanços e principais resultados teóricos

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
January	183.2	67.58	26.05	182.3	170.6	2.313	2.182	0.774
February	163.0	63.28	26.27	162.6	152.0	2.073	1.961	0.779
March	170.5	68.51	26.30	170.8	159.1	2.167	2.044	0.774
April	150.0	60.00	26.13	150.0	138.9	1.901	1.781	0.768
May	143.5	54.87	25.87	143.8	131.2	1.811	1.692	0.761
June	125.1	50.40	25.43	125.3	113.2	1.578	1.464	0.755
July	133.9	53.63	24.86	134.3	121.8	1.698	1.577	0.759
August	156.5	57.04	25.03	157.4	145.2	2.011	1.891	0.777
September	169.2	60.90	25.48	168.6	157.2	2.146	2.022	0.776
October	178.2	69.44	25.92	177.9	166.2	2.247	2.113	0.768
November	182.7	63.90	26.04	181.6	169.5	2.298	2.167	0.771
December	187.9	65.10	26.03	187.1	175.0	2.388	2.257	0.780
Year	1943.8	734.65	25.78	1941.6	1800.0	24.631	23.150	0.771

Legends:	GlobHor	Horizontal global irradiation	GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings
	DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
	T Amb	Ambient Temperature	E_Grid	Energy injected into grid
	GlobInc	Global incident in coll. plane	PR	Performance Ratio

Fonte: Software PVSYSY

A energia utilizada a partir da figura 16, é a E_Grid, que é a energia injetada na rede, os valores apresentados são das médias mensais e o valor total anual de energia gerada.

O valor total de geração foi de 23,150MWh por ano, o que dá uma média de 1929kWh/mês, razoavelmente próximo aos 2000kWh/mês prometidos ao cliente e dentro do limite de tolerância de 5% estabelecidos em contrato. Vale salientar que esses valores são uma simulação e uma média, podendo variar para mais ou para menos.

4.2.5 Homologação do sistema junto a concessionária de energia elétrica

Após a constatação por meio do software que foi gerada a média mensal exigida pelo o cliente, uma solicitação de acesso foi enviada à concessionária responsável naquele estado, junto com um memorial apresentando os objetivos, a descrição geral do consumidor, a descrição geral da geração distribuída com todas as características da unidade consumidora, potência disponibilizada, módulos e inversores, dispositivos de proteção, dimensionamento, cálculo de queda de tensão, previsão da produção de energia, requisitos de segurança como variações de tensão, frequência, aterramento, sinalização de segurança e sistema de medição, e normativas.

Além disso, um formulário de registro de central geradora e a Anotação de Responsabilidade técnica – ART, assinada pelo engenheiro responsável pelo projeto também foram enviados, junto com os certificados de registro pelo INMETRO do módulo e do microinversor utilizados, além de seus “datasheet”, que é uma folha de dados ou folha de especificações que resume o desempenho e outras características técnicas do produto.

Também foi instalada no ponto de conexão, junto ao padrão de entrada, sinalização indicativa da existência na unidade consumidora de geração própria através de placa de advertência, como demonstrado na figura 17:

Figura 17 - Placa de advertência - “CUIDADO – RISCO DE CHOQUE ELÉTRICO – GERAÇÃO PRÓPRIA”



Fonte: Nord Energy Engenharia

Após a aprovação do projeto pela concessionária de energia elétrica local, uma visita foi feita pelos técnicos dessa concessionaria e o medidor foi trocado. O sistema de medição é realizado através de um medidor bidirecional que foi instalado nesta visita. A instalação desse medidor é essencial e necessária, pois é ele quem faz a medição de toda a energia em kWh que foi injetada na rede pela usina fotovoltaica instalada no imóvel, assim como a energia que foi consumida e, que em outras palavras, foi vendida pela concessionária.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base no que foi exposto, e com as limitações citadas, a obra foi realizada e ficou conforme a figura 18:

Figura 18 - Foto aérea da residência pós-obra concluída.



Fonte: Adaptado de Nord Energy Engenharia.

Como pode-se observar na figura 18, alguns módulos a certa hora do dia ficarão sombreados total ou parcialmente, devido a estrutura da caixa d'água da residência. Todos esses fatores foram levados em conta e colocados na realização do projeto, e por meio do software PVSYST foi observado que mesmo com essas perdas o sistema conseguiria gerar energia suficiente para suprir as necessidades de 2000kWh/mês do cliente.

Por esse motivo também foi a escolha do microinversor, por ele trabalhar independentemente cada módulo, dessa forma essa estrutura não atingirá negativamente toda a string, e sim somente os módulos sombreados.

Devido as estações do ano e a movimentação do sol em cada período, vão existir meses que determinado módulo estará mais sombreado ou não, também vão existir meses de maior sombreamento causado por nuvens, sendo assim, tentando isolar outros fatores, foi pego a geração total de cada módulo em kWh durante todo o ano de 2022.

Baseado nisso, após um ano de monitoramento do sistema, e pela tecnologia fornecida pelos microinversores, tem-se a energia anual produzida por cada um dos 34 módulos representados na figura 19:

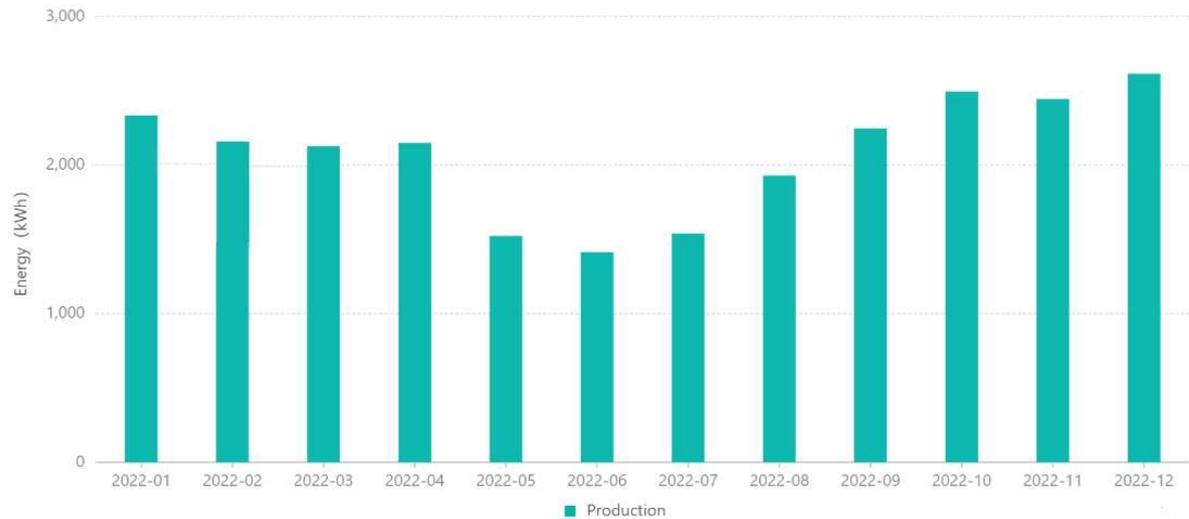
Figura 19 - Energia anual total produzida por módulo no ano de 2022.



Fonte: Plataforma Hoymiles.

Pode-se observar que alguns módulos produziram menos energia que outros, o que prova o efeito negativo causado pela estrutura da caixa d’água que em algumas épocas do ano causam bastante sombreamento, mas em outras nem tanto. Apesar desse fator negativo, a figura 19 mostrou uma geração total de 23,48MWh no ano de 2022, ultrapassando os 23,150MWh previstos pelo software a serem gerados anualmente. Vale salientar que a média de geração foi de aproximadamente 1956kWh/mês, valor aceitável pois está dentro de um limite de tolerância estabelecido no contrato de 5% em relação a geração esperada de 2000kWh para as necessidades do projeto. Os fatores negativos que influenciam no sistema foram contornados com a utilização de mais módulos e de microinversores, pois também é observável que alguns módulos geraram mais energia do que outros estando utilizando o mesmo microinversor, mostrando que o microinversor possui uma boa eficiência e é bastante eficaz nesses casos, além de não necessitar de grandes espaços físicos na residência para sua instalação, sendo mais discreto visualmente. Com isso obteve-se as gerações mensais reais expostas no gráfico 1:

Gráfico 1 - Geração mensal de energia elétrica no ano de 2022



Fonte: Plataforma Hoymiles

Como o sistema foi instalado no Nordeste, onde se tem os maiores índices de radiação solar do país, inserido no Hemisfério Sul, os sistemas fotovoltaicos produzirão um nível maior de energia entre os meses de dezembro a março, pois no verão o dia é mais longo, o que influencia diretamente na quantidade de tempo de produção de eletricidade, apesar do sistema está próximo à linha do equador, e quanto mais perto dessa linha, mais baixa será a oscilação na produção de energia durante o ano, devido à inclinação do eixo da Terra. Por isso é interessante considerar o nível médio de geração durante o ano.

Geralmente no período chuvoso, pode acarretar uma queda de geração de energia devido as nuvens densas o que pode gerar uma falta de radiação direta nos módulos, mas em contrapartida, as chuvas agem como uma limpeza natural desses módulos.

Observando o gráfico 1 com as médias mensais de geração real dadas e as médias teóricas de geração esperada calculadas pelo Software PVSYST dadas na figura 16, pode-se estabelecer uma comparação para se ter a real produtividade e eficácia do sistema, conforme mostra o gráfico 2:

Gráfico 2 - Geração Realizada X Geração Esperada [kWh]



Assim, no ano de 2022, em apenas em três meses a geração real foi menor que a geração esperada, mas dentro dos limites de erro, se visualizada a média anual, o valor real está dentro do limite de tolerância de 5%.

4.3.1 Economia Mensal

Com os valores conhecidos de energia gerada e sabendo o valor da tarifa de energia da cidade na qual foi instalado o projeto, pode-se calcular a economia mensal e anual gerada pelo sistema de energia fotovoltaica ao se pegar o valor em kWh gerado e multiplicar pelo valor da tarifa, que no caso foi usado o valor de 80 centavos por cada kWh consumidos (valor cobrado pela concessionária local na época). Dessa forma, o gráfico 3 mostra a economia mensal durante todo o ano de 2022:

Gráfico 3 - Economia mensal no ano de 2022



Já era de se esperar que os valores apresentados no gráfico 3 apresentassem a mesma tendência de curva de geração, visto que os valores foram multiplicados pelo o valor constante da tarifa de 80 centavos por cada kWh consumidos.

Vale ressaltar que a conta de energia não é zerada, pois mesmo que o consumo de energia da rede elétrica seja nulo a concessionária tem o direito de cobrar o custo de disponibilidade, ou taxa mínima, pelo fornecimento da infraestrutura elétrica para garantir o fornecimento de energia. Logo, a economia total gira em torno de 85% a 95% dependendo do estado onde o sistema foi instalado, pois os impostos diferem de uns estados para outros, alguns cobram ICMS por exemplo, o que levaria mais tempo para o cliente obter o retorno do investimento, estados como o Pernambuco por exemplo, onde não é cobrado esse imposto, alguns clientes chegam a ter até 96% de economia na conta de luz. Além disso, como a tarifa de energia sofre reajuste quase todos os anos, os valores de economia só tendem a crescer.

5 CONCLUSÃO

Esse trabalho mostrou dados de geração de um sistema solar fotovoltaico instalado no telhado de uma residência que possuía alguns fatores negativos que dificultaram a geração de energia, como um sombreamento causado por uma caixa d'água e pouco espaço para instalação dos módulos. O trabalho fez uma comparação com a geração esperada calculada por software, e, dessa forma, como principal objetivo do trabalho, pode-se ter uma análise entre essas gerações. Apresentou-se a geração individual de cada módulo e foi debatido sobre os efeitos causados pelo sombreamento e pelo pouco espaço para posicionamento dos módulos em uma só direção, as vantagens e como o microinversor atuou para amenizar possíveis perdas ocasionadas por esses fatores. O trabalho também mostrou os processos e documentos necessários para a homologação do sistema fotovoltaico junto a concessionária de energia elétrica local, Energisa.

Portanto, o trabalho conclui que o sistema estudado apresentou resultados dentro do esperado e após um ano de acompanhamento obteve-se resultados dentro da margem prevista chegando muito próximo dos 2000kWh/mês desejados no início do projeto, e apresentou como solução para amenizar problemas com pequenos sombreamentos e pouco espaço de instalação, microinversores, para que assim se possa utilizar mais orientações de módulos e ter uma maior eficiência de geração.

Foi possível notar a importância da instalação de microinversores nesse caso, para que não houvesse grandes perdas e o sistema conseguisse gerar energia dentro do limite de tolerância esperado, assim o cliente conseguiu ter uma economia financeira todos os meses e mais importante ainda, ajudou a preservar o meio ambiente gerando energia limpa, renovável, e, dessa forma, evitou que se utilizasse fontes energéticas poluidoras que emitem toneladas de gases que podem aumentar o efeito estufa e o aquecimento global.

Com as análises apresentadas, é interessante observar que o papel do engenheiro projetista é encontrar soluções para os mais diversos problemas e empecilhos que possam vir a existir no local da obra, para que no final as necessidades energéticas do cliente sejam atendidas e assim o sistema de energia solar fotovoltaica possa suprir a demanda exigida no contrato.

Para trabalhos futuros, fica a sugestão de ser feito um comparativo em um sistema similar ao estudado, com a instalação de inversor string, ou até mesmo ser feito um estudo comparativo financeiro com a instalação de um sistema off grid com microinversor.

REFERÊNCIAS

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 482**, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, DF, 2012

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 687**, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. E os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Brasília, DF, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5410**: instalações elétricas de baixa pressão. 2. ed. Versão corrigida. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT/CB-003 NBR 16690**: instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos. 2º projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2019

BALFOUR, John; SHAW, Michael; NASH, Nicole Bremer. **Introdução ao Projeto de Sistemas Fotovoltaicos**. São Paulo: LTD, 2016.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego, Secretaria de Inspeção do Trabalho (SIT). **Trabalho em Altura – NR 35**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil – Brasília, 2012.

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito / CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Programa Sundata. Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php>>. Acesso em 10/05/2023

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4ª Edição. Ed. New Jersey: [s.n.], 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Nota Técnica, Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Rio de Janeiro, EPE, 2012. Disponível em <http://antigo.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos_23/NT_EnergiaSolar_2012.pdf>. Acesso em 06/04/2023.

Geração Distribuída (Energia Solar). ENERGISA, 2013. Disponível em: <<https://www.energisa.com.br/Paginas/informacoes/outras-informacoes/micro-geracao.aspx>> Acesso em: 05/06/2023

Inversor x Micro inversor solar: Vantagens e desvantagens. Sanus, 2023. Disponível em: <<https://sunus.com.br/2021/01/20/inversor-x-microinversor-vantagens-e-desvantagens/>> Acesso em: 23 de maio de 2023.

LOPEZ, R. A., **Energia Solar Para Produção de Eletricidade**, Editora Artliber, São Paulo, 2012

Passo a Passo da Fabricação do Painel Solar. Portal Solar, 2022. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>. Acesso em: 22 de maio de 2023.

PORTAL SOLAR. Disponível em: <www.portalsolar.com.br>. Acesso em 15/05/2023.

Potencial Solar – SunData v 3.0. Cresesb, 2014. Disponível em: <http://cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 7 de junho de 2023

PINHO, João Tavares, GALDINO, Marco Antonio (org). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CEPEL, CRESESB, 2014

Saiba tudo sobre a string box. Aldo, 2021. Disponível em: <<https://www.aldo.com.br/blog/saiba-tudo-sobre-a-string-box/#:~:text=A%20string%20box%20%C3%A9%20instalada,uma%20string%20box%20a%20mais.>> Acesso em: 15 de abril de 2023.

SOUZA, Ronilson di. Os sistemas de energia solar fotovoltaica. **Livro Digital de Introdução aos Sistemas Solares. Ribeirão Preto: Bluesol,** 2018. Disponível em: <<http://programaintegradoronline.com.br/wp-content/uploads/2016/03/Livro-Digital-deIntrodu%C3%A7%C3%A3o-aos-Sistemas-Solares-novo.pdf>>. Acesso em: 10/05/2023

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica, Conceitos e Aplicações, Sistemas Isolados e Conectados à Rede.** São Paulo: Érica Ltda., 2012.

VINTURINI, mateus. **Entenda as especificações básicas dos componentes da string box.** Canal Solar, 2019. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/entenda-as-especificacoes-basicas-string-box/>>. Acesso em: 23 de maio de 2023.

YIN, Roberto K. **Estudo de caso: planejamento e métodos.** 2ª Ed. Porto Alegre. Editora: Bookmam. 2001.

ZILLES, R. et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012.