



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-  
BRASILEIRA**

**INSTITUTO DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS**

**FRANCISCO WAGNER PIMENTEL DOS SANTOS**

**COMPARAÇÃO DE BASES DE DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR PARA  
ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA EM USINAS FOTOVOLTAICAS NO  
CEARÁ**

**REDENÇÃO  
2024**

**FRANCISCO WAGNER PIMENTEL DOS SANTOS**

**COMPARAÇÃO DE BASES DE DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR PARA  
ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA EM USINAS FOTOVOLTAICAS NO  
CEARÁ**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira (UNILAB) como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Alisson Pessoa Guimarães.

**REDENÇÃO**

**2024**

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema de Bibliotecas da UNILAB  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Santos, Francisco Wagner Pimentel Dos.

S237c

Comparação de bases de dados de irradiação solar para estimativa de geração de energia em usinas fotovoltaicas no ceará / Francisco Wagner Pimentel Dos Santos. - Redenção, 2024.

0f: il.

Monografia - Curso de Engenharia De Energias, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Alisson Pessoa Guimarães.

1. Irradiação solar (Energia solar). 2. Geração de energia. 3. Sistemas fotovoltaicos. 4. Sistema de monitoramento. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 621.47

---

**FRANCISCO WAGNER PIMENTEL DOS SANTOS**

**COMPARAÇÃO DE BASES DE DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR PARA  
ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA EM USINAS FOTOVOLTAICAS NO  
CEARÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias, na Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB) – Campus das Auroras.

Data de aprovação: 26 de novembro de 2024.

**BANCA EXAMINADORA**

  
**Prof. Dr. Antônio Alisson Pessoa Guimarães (Orientador)**

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

  
**Profa. Ma. Janaína Barbosa Almada**

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

  
**Prof. Dr. Vandilberto Pereira Pinto**

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me dado saúde e coragem e forças para finalizar este ciclo.

Aos meus familiares, que sempre estão ao meu lado me apoiando, compreendendo e incentivando.

Ao meu orientador, Antônio Alisson, por todo apoio e paciência ao longo da elaboração, sempre esteve solícita em todas as etapas deste trabalho, compreendendo toda dificuldade na sua construção.

Aos professores participantes da banca examinadora, por suas considerações a respeito deste trabalho, e por todo conhecimento compartilhado e adquirido durante a graduação.

E por fim, a todas as pessoas que de alguma forma, direta ou indiretamente contribuíram para realização dessa pesquisa.

## RESUMO

A energia solar fotovoltaica é uma fonte de energia limpa e renovável que vem ganhando cada vez mais importância no Brasil. No Ceará, as condições ambientais favoráveis e os incentivos governamentais têm impulsionado o crescimento da utilização dessa tecnologia. A instalação de um sistema fotovoltaico requer o conhecimento prévio de algumas informações acerca da região onde estará localizado. Ter o conhecimento da variação mensal de dados de temperatura e irradiação solar é de fundamental importância na determinação dos valores máximos e mínimos de energia que podem ser produzidos, bem como a eficiência do equipamento sob essas condições. Este trabalho teve como objetivo avaliar a confiabilidade de quatro bancos de dados de irradiação solar e temperatura para o Estado do Ceará. A metodologia incluiu pesquisa bibliográfica para embasar teoricamente a análise e o uso de indicadores estatísticos (RMSE, MAE e  $r$ ) para comparar a confiabilidade de cada base de dados coletados em sistema FV já instalados, que possuem dados de geração disponíveis no sistema de monitoramento da fabricante do inversor de cada sistema, no período de janeiro a dezembro de 2023. Utilizou-se para coleta dos dados as seguintes bases: NASA, CRESESB, PVGIS e INMET, sendo esses dados inseridos no software PVsyst para simular a geração de energia e em seguida ser comparado com os dados reais de geração obtidos pelos sistemas de monitoramento dos inversores de cada sistema. Os dados do CRESESB e INMET demonstraram o melhor desempenho, com elevados coeficientes de correlação e baixos erros de previsão, como indicados pelos índices RMSE e MAE. A NASA pode ser considerada uma opção viável em casos específicos, embora tenha apresentado erros ligeiramente superiores em comparação às demais fontes. Por outro lado, o PVGIS obteve os piores resultados em todas as usinas, com baixos coeficientes de correlação e determinação, evidenciando sua inadequação para estimativas precisas de irradiação solar.

**Palavras-chave:** Irradiação Solar. Geração de Energia. Sistemas Fotovoltaicos. Sistema de monitoramento.

## ABSTRACT

Photovoltaic solar energy is a clean and renewable energy source that has been gaining increasing importance in Brazil. In Ceará, projected environmental conditions and government incentives have driven the growth in the use of this technology. The installation of a photovoltaic system requires prior knowledge of some information about the region where it will be located. Knowledge of the monthly variation of temperature and solar irradiation data is of fundamental importance in determining the maximum and minimum values of energy that can be produced, as well as the efficiency of the equipment under these conditions. This study aimed to evaluate the reliability of four solar irradiation and temperature databases for the State of Ceará. The methodology included bibliographic research to theoretically support the analysis and use of statistical indicators (RMSE, MAE and  $r$ ) to compare the reliability of each database accumulated in the PV system already installed, which have generation data available in the monitoring system of the inverter manufacturer of each system, in the period from January to December 2023. The following databases were used to collect the data: NASA, CRESESB, PVGIS and INMET, and these data were entered into the PVsyst software to simulate energy generation and compared with the real generation data obtained by the research monitoring systems of each system. The data from CRESESB and INMET revealed the best performance, with high visualization coefficients and low prediction errors, as indicated by the RMSE and MAE indices. NASA can be considered a viable option in specific cases, although it presented higher errors compared to other sources. On the other hand, PVGIS obtained the worst results in all plants, with low observation and determination coefficients, evidencing its inadequacy for accurate estimates of solar irradiation.

**Keywords:** Solar Irradiation. Power Generation. Photovoltaic Plant. Monitoring System.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Movimento da Terra e Estações .....	16
Figura 2 – Radiação e suas componentes. ....	17
Figura 3 - Composição de um painel fotovoltaico.....	18
Figura 4 – Imagem a esquerda apresenta o módulo Policristalino e a direita um Monocristalino. ....	20
Figura 5 – Arranjo de módulos em Série .....	20
Figura 6 - Arranjo de módulos em paralelo .....	21
Figura 7 – Representação da curva de ponto de máxima potência na condição STC .....	22
Figura 8 - Efeito causado pela variação da irradiância solar sobre a curva IV para um módulo fotovoltaico a 25°C .....	23
Figura 9 - Efeito causado pela variação da temperatura das células sobre a curva IV para um módulo fotovoltaico sob irradiância de 1.000 W/m <sup>2</sup> .....	23
Figura 10 - Caracterização de ondas da corrente CC e CA .....	25
Figura 11 – Representação dos Inversores .....	25
Figura 12 - Resultado da atuação de um sistema de MPPT sobre a tensão de entrada do inversor.....	26
Figura 13 – Vista superior Usina 01 .....	37
Figura 14 -Vista superior Usina 02.....	37
Figura 15 - Vista superior Usina 03.....	38
Figura 16 - Layout do site NASA .....	40
Figura 17 – Layout do site PVGIS .....	40
Figura 18 – Exemplo do preditor de serie temporal sazonal .....	41
Figura 19 - Layout do site BDMEP .....	42
Figura 20 - Layout do software PVsyst.....	44
Figura 21 – Exemplo de parametrização da usina .....	44
Figura 22 - Informações do sistema da Usina 02.....	45
Figura 23 – Exemplo da curva de geração do sistema de monitoramento.....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2 - Descrições das regiões de estudos.....	38
Tabela 3 – Dados de irradiação da Usina 01 .....	48
Tabela 4 - Indicadores de Desempenho para a Usina 01 .....	49
Tabela 5 - Dados de irradiação da Usina 02 .....	51
Tabela 6 - Indicadores de Desempenho para a Usina 02 .....	52
Tabela 7 - Dados de irradiação da Usina 03 .....	54
Tabela 8 - Indicadores de Desempenho para a Usina 03 .....	55

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação entre dados previstos e dados de monitoramento da Usina 01 .....	49
Gráfico 2 – Comparação entre dados previstos e dados de monitoramento da Usina 02 .....	52
Gráfico 3 – Comparação entre dados previstos e dados de monitoramento da Usina 03 .....	55

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 Problemática.....	11
1.2 Justificativa.....	11
1.3 Objetivos.....	12
1.3.1 Objetivo geral .....	12
1.3.2 Objetivos específicos.....	12
1.4 Estrutura do Trabalho .....	12
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>13</b>
2.1 Energia Solar .....	13
2.2 Radiação Solar .....	15
2.2.1 Radiação Solar e suas Componentes.....	16
2.3 Sistema Fotovoltaicos e Seus Componentes .....	17
2.3.1 Módulos Fotovoltaicos .....	18
2.3.1.1 Associações de Células e Módulos Fotovoltaicos.....	20
2.3.1.2 Curva Característica do módulo fotovoltaico.....	21
2.3.1.3 Influência da Irradiância Solar na curva IV .....	22
2.3.1.4 Influência da temperatura na curva IV.....	23
2.3.2 Inversores .....	24
2.3.2.1 Funcionamento Básico do Inversor.....	24
2.3.2.2 Ponto de Máxima Potência (MPPT - Maximum Power Point Tracking)...	25
2.3.2.3 Sistema de Monitoramento.....	26
2.4 Métodos e Estimativa de Dados de Irradiação .....	26
2.4.1 Modelos Analíticos.....	27
2.4.2 Modelos Empíricos.....	28
2.4.3 Rede Neurais Artificiais .....	28
2.4.4 Modelos de Transferência Radiativa: .....	29
2.5 Fonte de Dados de Irradiação .....	30
2.5.1 NASA .....	30
2.5.2 PVGIS .....	31
2.5.3 CRESESB .....	31
2.5.4 INMET .....	33

2.6 Software PVSyst.....	33
2.7 Avaliação comparativa de bases de dados.....	34
3 METODOLOGIA.....	36
3.1 Área de Estudo e Caracterização das Usinas.....	36
3.2 Aquisição de dados .....	39
3.2.1 NASA POWER.....	39
3.2.2 PVGIS .....	40
3.2.3 CRESESB .....	41
3.2.4 Instituto Nacional de Meteorologia .....	42
3.3 Simulação no <i>PVsyst</i> .....	43
3.4 Obtenção dos Dados de Geração .....	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	47
4.1 Usina 01.....	47
4.1.1 Análise dos Dados de Irradiação .....	47
4.1.2 Análise dos Indicadores de Desempenho da Usina 01 .....	48
4.2 Usina 02.....	50
4.2.1 Análise dos Dados de Irradiação .....	50
4.2.2 Análise dos Indicadores de Desempenho da Usina 02.....	51
4.3 Usina 03.....	53
4.3.1 Análise dos Dados de Irradiação .....	53
4.3.2 Análise dos Indicadores de Desempenho da Usina 02.....	54
5 CONCLUSÃO .....	57
REFERÊNCIAS .....	58

## 1 INTRODUÇÃO

O Sol é uma fonte de energia gratuita, abundante e sustentável que pode ser utilizada de forma eficiente, sendo assim um tipo de aplicação para geração de energia elétrica economicamente viável, pois todo o custo em relação à energia gerada de um sistema fotovoltaico de geração distribuída normalmente é bem menor que o produzido pela distribuidora (IPEA, 2018).

A energia solar é convertida diretamente em energia elétrica através do efeito de radiação com o auxílio de determinados materiais, como os semicondutores, destacando-se o efeito fotovoltaico, em que os fótons pertencentes à luz solar são convertidos em energia elétrica através do uso de células solares utilizadas na tecnologia fotovoltaica, possuindo assim, esses semicondutores que quando exposto à irradiação solar, produzem a eletricidade (INPE, 2017).

A principal fonte de geração de energia elétrica do Brasil é composta em sua maior parte por hidrelétricas, onde em 2019 representou 60,0% do fornecimento de energia (ABSOLAR, 2019). Porém, a dependência do país a este tipo de fonte tem demonstrado suas consequências nos últimos anos. O longo período de estiagem sobre importantes bacias hidrográficas do país têm causado pelo aumento da tarifa de energia elétrica (Lima, 2017).

O aumento da tarifa de energia elétrica para as residências, comércios e indústrias tem feito cada vez mais esses consumidores buscarem outras formas para diminuir o gasto com consumo elétrico. Unificando isso a grandes áreas abandonadas, como os terraços e cobertura de estacionamentos, faz desta geração solar ser uma opção mais viável para utilização em residências assim como em pontos comerciais (Lima, 2017).

Pode-se considerar que a geração fotovoltaica é uma alternativa interessante frente às fontes tradicionais que compõe a matriz elétrica brasileira. Nesse setor, a geração distribuída mostra-se como sendo uma modalidade bastante atrativa e normalmente com retorno financeiro positivo para os consumidores de energia elétrica. Assim, fica claro a importância de se aprofundar e conhecer as várias base de dados de irradiação solar para que se possa fazer uma estimativa mais correta da geração de energia em usinas fotovoltaicas.

Portanto, esse estudo torna-se relevante pois irá mostrar as várias fontes de dados conhecidos e utilizados para análise de dados de irradiação e por consequência

dados de geração do sistema solar, realizando uma comparação de diferentes bases de dados de irradiação solar coletadas em três usinas do Ceará, para serem utilizados na estimativa da geração de energia elétrica de usinas fotovoltaicas. Assim, após essa análise será visto qual desses bancos de dados traz um resultado mais coerente e que pode ser utilizado para instalação de novas usinas no Ceará, como também em outras regiões.

### **1.1 Problemática**

Diante do que foi exposto surgiu a seguinte problemática que será respondida ao longo desse estudo: existe diferença nos valores obtidos das bases de dados de irradiação solar para estimativa de geração de energia em usinas fotovoltaicas no Ceará?

### **1.2 Justificativa**

Frente ao aumento da demanda por energia elétrica mundial, as energias provenientes de fontes renováveis vêm se tornando uma opção cada vez mais explorada pela sociedade em relação às energias não renováveis. Geralmente são mais poluentes e ocasionam maiores impactos ao meio ambiente, como por exemplo, contribuindo para o efeito estufa.

Investir em pesquisas acerca desta temática é necessário e relevante tanto por questões econômicas quanto, principalmente, em prol dos cuidados com o meio ambiente. Nesse sentido, reitera-se a relevância do tema em escala mundial que busca por soluções energéticas limpas, diversificando a matriz energética, visto que a energia solar fotovoltaica (FV) tem ganhado cada vez mais um grande espaço no cenário nacional após sua regulamentação em 2012.

Dessa forma, refletir acerca da possibilidade de investimento em uma energia mais limpa de forma a contribuir com o seu papel social e ambiental com mais responsabilidade e compromisso com a diminuição dos impactos negativos a natureza. Portanto, é preciso pesquisar, propor e analisar, inclusive, a viabilidade técnica e econômica, principalmente através dos diferentes bancos de dados que estão disponíveis, onde atualmente contribuem para essa análise mais assertiva.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo geral comparar a precisão e a confiabilidade de diferentes bases de dados de irradiação solar na estimativa da geração de energia elétrica em usinas fotovoltaicas no estado do Ceará.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Coletar dados de irradiação solar de diferentes bases de dados para usinas fotovoltaicas no estado do Ceará.
2. Aplicar os dados no software PVSyst para estimar a geração de energia elétrica de usinas fotovoltaicas a partir dos dados de irradiação solar.
3. Comparar dados de geração de energia simulado no software PVSyst com dados de geração de energia elétrica de usinas fotovoltaicas reais.

## **1.4 Estrutura do Trabalho**

O trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução e a justificativa do estudo. O segundo capítulo aborda a fundamentação teórica sobre energia solar e sistemas fotovoltaicos. O terceiro capítulo descreve a metodologia utilizada, enquanto o quarto capítulo apresenta os resultados e discussões. Por fim, o quinto capítulo traz as conclusões e recomendações para futuras pesquisas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a elaboração deste estudo, foi necessário realizar uma pesquisa bibliográfica a qual contribuirá com a fundamentação teórica e a análise da coleta de dados, dos cenários e dos resultados que serão obtidos durante o trabalho. Dessa forma, nesse capítulo serão abordados conceitos sobre energia solar, análise da irradiação solar, sistema fotovoltaicos e seus componentes, módulos fotovoltaicos e sua composição, métodos e estimativa de dados de irradiação e fonte de dados de irradiação.

### 2.1 Energia Solar

Conforme Pinho e Galdino (2014, p. 67):

O sol é basicamente uma enorme esfera de gás incandescente, cujo núcleo acontece a geração de energia através de reações termonucleares. Sua estrutura é composta por: núcleo, zona radioativa, zona convectiva, fotosfera, cromosfera e coroa. Essa energia proveniente do sol é denominada de radiação solar.

O Sol é a principal fonte de energia para a terra. Além de ser responsável pela manutenção da vida no planeta, a radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, havendo um enorme potencial de sua utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia, como por exemplo, a térmica e a elétrica (Pinho; Galdino, 2014).

A energia solar é uma fonte de energia renovável e sustentável que tem se tornado cada vez mais presente no contexto energético do Brasil. A crescente adoção da energia solar se deve aos seus inúmeros benefícios ambientais e econômicos (Brito; Silva, 2023).

Diferentemente de fontes de energia não renováveis, como o petróleo e o carvão, a energia solar não emite poluentes atmosféricos prejudiciais e não esgota os recursos naturais. Além disso, a energia solar é abundante no Brasil, dada a sua localização geográfica privilegiada próxima à linha do Equador, o que garante uma alta incidência de radiação solar ao longo do ano (Soares; Silva, 2023).

Segundo dados da Agência de Desenvolvimento do Estado (Adece), o estado do Ceará, situado na região Nordeste do país, se destaca como um dos estados

brasileiros com o maior potencial para a geração de energia solar. As condições climáticas favoráveis, com muitos dias ensolarados, tornam o Ceará uma região estratégica para a implantação de usinas fotovoltaicas. O Ministério de Minas e Energia (MME) destacou o Ceará como uma das áreas de referência para a expansão da energia solar no Brasil em 2023 (ADECE, 2024).

A produção de eletricidade em usinas fotovoltaicas é baseada na conversão da energia solar em energia elétrica por meio de células fotovoltaicas. Essas células fotovoltaicas são dispositivos semicondutores que transformam diretamente a luz solar em eletricidade por meio do chamado efeito fotovoltaico. O Ministério de Minas e Energia (MME, 2023) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023) têm destacado a relevância crescente das usinas fotovoltaicas no contexto da matriz energética brasileira devido à sua contribuição para a diversificação da geração de eletricidade.

A irradiação solar é um dos principais fatores que influenciam a geração de energia elétrica em usinas fotovoltaicas. Ela representa a quantidade de energia solar que atinge uma superfície por unidade de tempo (Azevedo; Martins, 2020).

Pode-se dizer que a energia solar é a transformação da energia luminosa (Luz proveniente do Sol) em energia elétrica através do efeito fotovoltaico em que a célula fotovoltaica é o elemento que realiza esta conversão, gerando no processo eletricidade (Tolmasquim, 2016).

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico) sendo a célula fotovoltaica, um dispositivo fabricado com material semicondutor. A unidade fundamental desse processo de conversão, cujo módulo fotovoltaico é tomado como unidade básica, formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica, e se constitui na unidade comercial do gerador fotovoltaico (Pinho; Galdino, 2014).

A variação na intensidade da irradiação solar ao longo do dia e ao longo do ano afeta diretamente a quantidade de eletricidade que uma usina fotovoltaica pode gerar. Portanto, a disponibilidade de dados precisos de irradiação solar é fundamental para a operação e planejamento eficazes de usinas fotovoltaicas (Silva; Gomes, 2023). Além disso, a qualidade e a precisão desses dados desempenham um grande papel na maximização da eficiência e rentabilidade das usinas fotovoltaicas (Soares; Silva, 2022).

Além da irradiação solar, a temperatura ambiente também desempenha um papel vital na geração de energia em usinas fotovoltaicas, a temperatura afeta diretamente o desempenho das células fotovoltaicas, pois o aumento da temperatura pode causar uma redução na eficiência da conversão da luz solar em eletricidade (Silva; Gomes, 2022).

De acordo com o Oliveira *et al.* (2023), o calor excessivo pode levar a um aumento na resistência elétrica das células fotovoltaicas, diminuindo a eficiência do processo de geração. Portanto, o monitoramento e o controle da temperatura das células fotovoltaicas são fundamentais para otimizar a produção de energia elétrica.

Corroborando com o abordado anteriormente, Soares *et al.* (2022) apresentam que a combinação da irradiação solar, temperatura e outras variáveis ambientais influenciam a eficiência global das usinas fotovoltaicas, tornando essas considerações importantes para o dimensionamento e operação adequados desses sistemas de geração de energia solar.

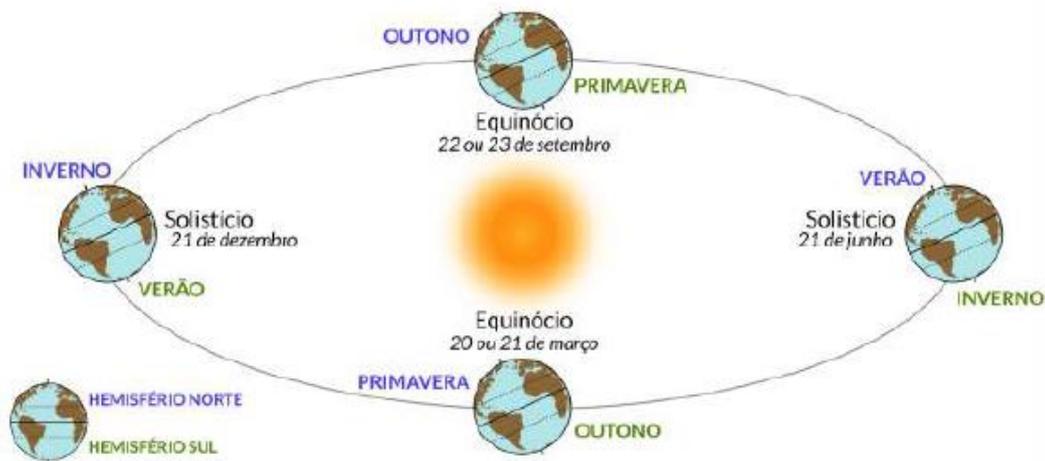
## **2.2 Radiação Solar**

A radiação solar é uma forma de energia eletromagnética emitida pelo Sol e que atinge a Terra, desempenhando um papel vital na sustentação da vida e sendo uma fonte primária de energia para diversos processos naturais e atividades humanas.

A disponibilidade e a variabilidade da energia solar são influenciadas por fatores astronômicos e atmosféricos. A posição da Terra em relação ao Sol é o principal fator a ser considerado. A Terra orbita o Sol a uma distância média de cerca de 150 milhões de quilômetros, completando um ciclo a cada ano. Essa distância varia ao longo do ano, de 1,47.108 km a 1,52.108 km. Como resultado, a radiação solar (irradiância solar) varia entre 1.325 W/m<sup>2</sup> e 1.412 W/m<sup>2</sup> (Pereira *et al.*, 2017).

Além da posição da terra em relação ao sol, outra determinante é a porção da superfície da Terra sobre a qual incide a radiação solar em sua localização variável com o tempo devido a rotação em seu eixo, no sentido de oeste para leste, definindo-se dias e noites. A Figura 1 apresenta a geometria da terra em relação ao sol nas diferentes estações do ano (Schubert *et al.* 2019).

Figura 1 - Movimento da Terra e Estações



Fonte: Altas Solar Brasileiro (2017).

O entendimento dessa mecânica é crucial para determinar a orientação dos sistemas de aproveitamento solar, como o posicionamento dos painéis, assim como para se estimar a produtividade e dimensionar o tipo de tecnologia a ser aplicada (Schubert *et al.* 2019).

### 2.2.1 Radiação Solar e suas Componentes

Radiação solar que incide sobre a superfície da Terra apresenta três componentes, nos tópicos abaixo são definidos cada uma, sendo identificadas na Figura 2 (Angela; Lima, 2022). Neste trabalho, serão considerados os dados da radiação direta, que incide sobre o solo sem sofrer desvios e representa a componente mais intensa da radiação solar, essencial para simulações de geração em sistemas fotovoltaicos.

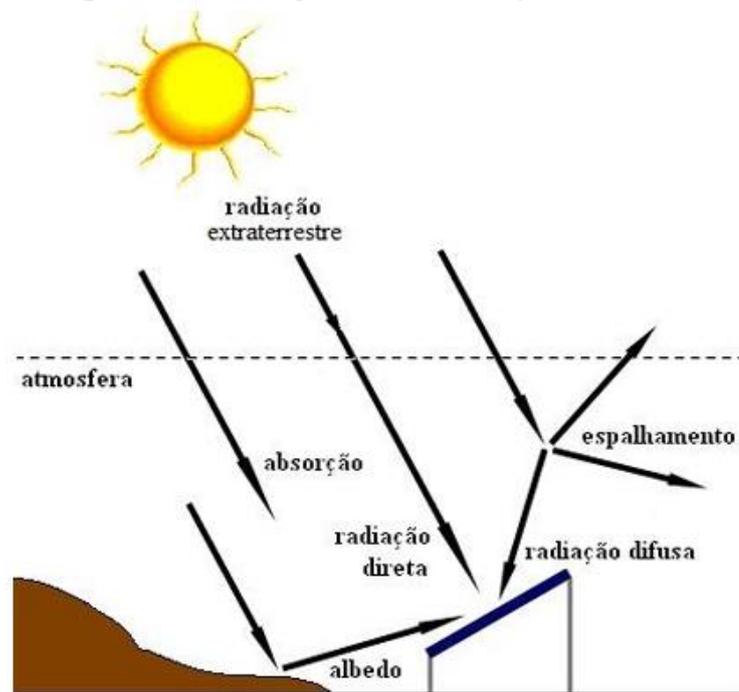
A radiação direta é uma parte da energia solar que viaja em linha reta do Sol para a superfície da Terra sem sofrer reflexões ou dispersões significativas na atmosfera. Ela representa a porção da radiação solar que atinge a superfície sem ser difundida ou espalhada por partículas ou moléculas na atmosfera.

A radiação difusa é uma parte da energia solar que atinge a superfície terrestre após ser dispersada ou espalhada pela atmosfera, sendo refletida por partículas de nuvens, moléculas de ar, poeira e outras partículas suspensas. Ao contrário da

radiação direta, que viaja em linha reta do Sol para a Terra, a radiação difusa chega à superfície terrestre de maneira dispersa, vinda de várias direções.

A radiação devido ao albedo é a energia refletida de volta para o espaço proveniente da superfície terrestre, sendo uma parte da radiação solar incidente que não é absorvida pela Terra, mas sim refletida de volta para a atmosfera. Este fenômeno é influenciado pela capacidade das superfícies refletirem a luz solar, conhecida como albedo.

Figura 2 – Radiação e suas componentes.



Fonte: Adaptada de manual de Engenharia FV (2014).

### 2.3 Sistema Fotovoltaicos e Seus Componentes

O sistema solar fotovoltaico é definido como um conjunto de equipamentos que convertem a luz solar em energia elétrica. Esses sistemas são compostos por vários componentes, detalhados abaixo.

### 2.3.1 Módulos Fotovoltaicos

Segundo Ângela e Lima (2022) os módulos são definidos como o componente principal de um sistema fotovoltaico, compostos de células fotovoltaicas que convertem a luz solar em eletricidade. Os módulos fotovoltaicos são compostos por várias células fotovoltaicas, que são feitas de materiais semicondutores, tendo-se o silício como sendo o mais abrangente. Quando a luz solar atinge uma célula fotovoltaica, ela excita os elétrons do material semicondutor, fazendo com que eles se movam. Esse movimento de elétrons cria uma corrente elétrica.

Os módulos, também conhecidos como painéis solares, são destacados como os principais componentes do sistema fotovoltaico para a geração de energia elétrica. Composto por um conjunto de células fotovoltaicas reunidas, de forma elétrica, em série ou paralelo, dependendo do projeto. Esses módulos formam em conjunto o designado gerador fotovoltaico sendo constituída pela primeira parte do sistema, ou seja, é partir desses módulos que a irradiação solar é captada e transformada em energia elétrica (Pereira; Oliveira, 2011).

Dessa forma, a Figura 3 ilustra a composição de um módulo fotovoltaico, o qual é formado por células fotovoltaicas feitas normalmente de silícios ou outros materiais semicondutores. O processo inicia-se na radiação solar que ultrapassa o painel fazendo que circule elétrons devido ao material ser semicondutor e, a partir daí gere-se a corrente elétrica (Nicola et al., 2018).

Figura 3 - Composição de um painel fotovoltaico



Fonte: Nicola et al. (2018).

Oliveira e Souza (2013) definem um módulo FV da seguinte forma: cada módulo FV é composto por uma quantidade de células FV que são conectadas em série. Ao unir-se a camada negativa de uma célula com a positiva da seguinte, os elétrons seguem pelos condutores de uma célula para a outra. Esse fluxo ordenado repete-se chegando até a última célula do módulo.

Um módulo FV normalmente é construído de modo a conter de 36 a 216 células FV, estas células são soldadas em tiras e posteriormente são encapsuladas para proteção contra as intempéries e para promover a resistência mecânica do módulo. Esse encapsulamento é formado por um sanduíche de vidro temperado de alta resistência, as células, EVA (acetato de etileno-vinil) estabilizado, e um filme isolante. E por fim, coloca-se uma moldura de alumínio e a caixa contendo as conexões elétricas, como mostra a Figura 3 (Pinho; Galdino, 2014).

Atualmente existem diversos tipos de módulos solares, sendo eles rígidos ou flexíveis, de acordo com o tipo de célula que for empregada (Pinho; Galdino, 2014). No caso da fabricação desses painéis, é válido ressaltar que, devido à grande interferência governamental na sua produção, este tipo de componente tem seu custo reduzido ao longo do tempo efetivando mais ainda o sistema.

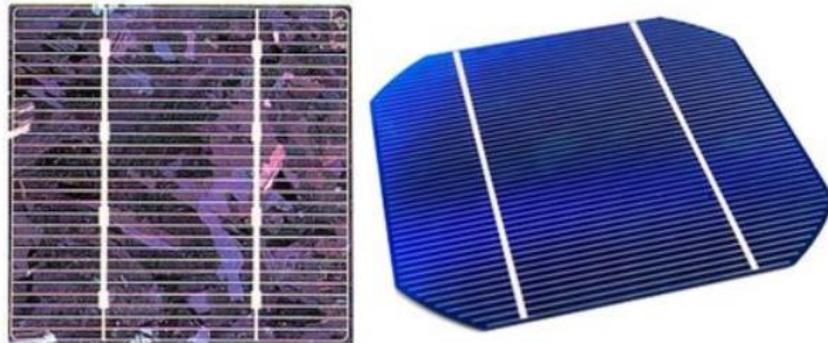
A quantidade e a potência, medida em Watt (W), dos módulos determinam a capacidade nominal de potência de um sistema fotovoltaico, que é medida em quilowatt-pico (kWp), ou seja, essa é a potência máxima que um sistema fotovoltaico pode gerar sob condições ideais de irradiação solar. Por exemplo, um sistema de 5kWp terá a capacidade de gerar até 5W de potência em condições ideais de irradiação.

Os semicondutores mais comuns são formados por elementos que possuem quatro elétrons na camada de valência, tendo-se estes o silício (Si). Tais elementos são chamados de elementos do grupo IV da tabela periódica. A presença de quatro elétrons de valência permite que esses elementos formem quatro ligações covalentes (Bavaresco et al., 2017).

No Brasil, segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2022) os módulos fotovoltaicos de silício monocristalino representaram 60% do mercado brasileiro de módulos fotovoltaicos no ano. Conseqüentemente, os módulos fotovoltaicos de silício policristalino representaram 40% do mercado e os módulos fotovoltaicos de silício monocristalino tem uma eficiência média de 16% de

conversão de energia. A Figura 4 apresenta bem a diferença visual dessas duas tecnologias.

Figura 4 – Imagem a esquerda apresenta o módulo Policristalino e a direita um Monocristalino.

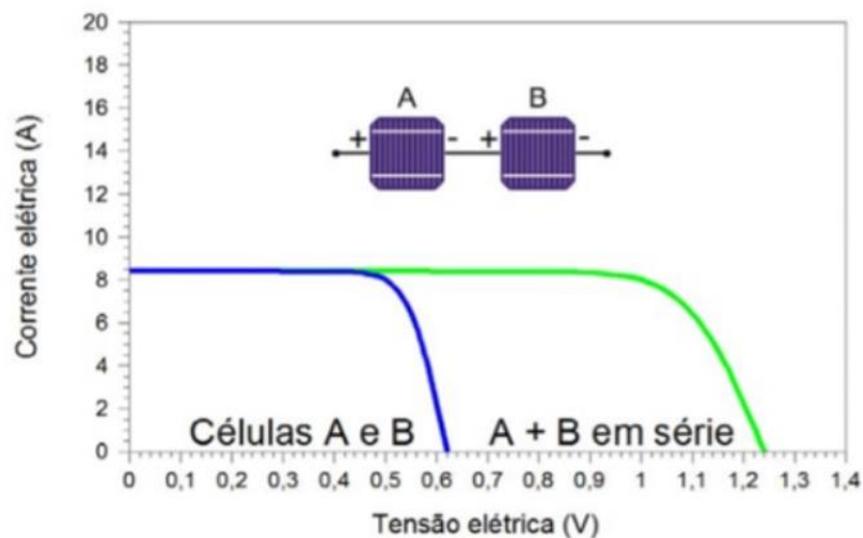


Fonte: Adaptada GreenPro (2023).

### 2.3.1.1 Associações de Células e Módulos Fotovoltaicos

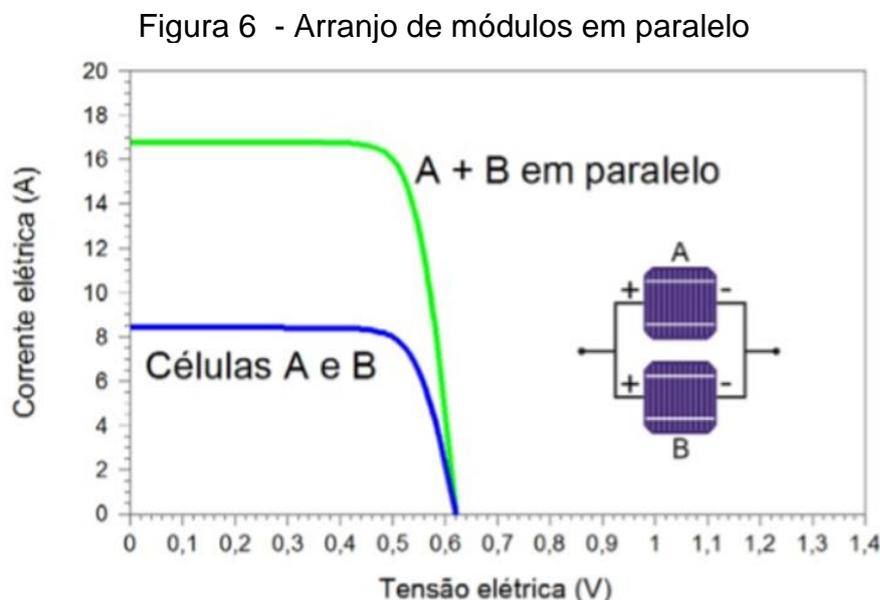
Os módulos fotovoltaicos podem ser conectados em série, da teoria de circuitos elétricos, temos que as tensões serão somadas e a corrente será a mesma. Utilizando a curva característica do painel solar, na Figura 5, pode-se observar como a conexão série afeta o resultado, favorecendo o aumento da tensão elétrica (Freitas et al., 2021).

Figura 5 – Arranjo de módulos em Série



Fonte: Adaptada de Energy Shop (2020).

Na Figura 6 é visto um arranjo de módulos em paralelo, tal conexão verifica-se que aumenta-se a corrente e a tensão se mantém constante (Freitas et al., 2021).



### 2.3.1.2 Curva Característica do módulo fotovoltaico

A curva característica de módulos fotovoltaicos trata-se da relação entre a corrente ( $I$ ) e tensão ( $V$ ), são usados para avaliar o desempenho e a potência gerada do módulo FV. Cada módulo FV possui uma curva  $I$  versus  $V$  característica e é fornecido pelo fabricante do módulo, conhecidos como *datasheet*, que geralmente se encontra disponível no portal dos fabricantes de módulos fotovoltaicos (Freitas et al., 2021).

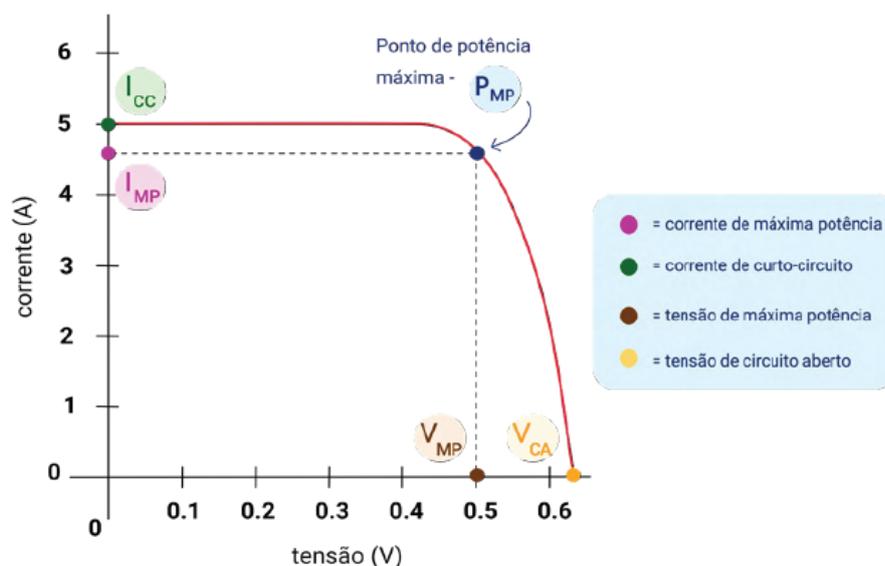
Para compreender o comportamento da curva IV faz necessário definir alguns parâmetros característicos:

- **Condições-padrão para ensaio - STC - Standard Test Conditions:** visa determinar as características elétricas do módulo nas seguintes condições de temperatura de junção da célula á  $25^{\circ}\text{C}$ , irradiância total de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , normal à superfície de ensaio e Espectro solar para AM igual a 1,5.
- **Tensão de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ ) (open circuit voltage):** tensão gerada por um conversor fotovoltaico sem carga (saída aberta), para valores preestabelecidos de temperatura e irradiância total.

- **Corrente de Curto-Circuito ( $I_{sc}$ ) (*short circuit current*):** corrente de saída de um conversor fotovoltaico, na condição de curto-circuito, e para valores preestabelecidos de temperatura e irradiância total.
- **Potência Nominal de um Módulo –  $P_{NOM}$ :** É o valor de potência que o módulo fornece nas condições-padrão de ensaio (STC) e é especificado na etiqueta pelo fabricante.

A Figura 7 apresenta a curva e seus pontos principais para análise, em condição padrão de ensaio. A curva varia seu formato de acordo com a mudança dos valores de temperatura e irradiação, ou seja, desempenho do módulo está relacionado diretamente com esses dois fatores.

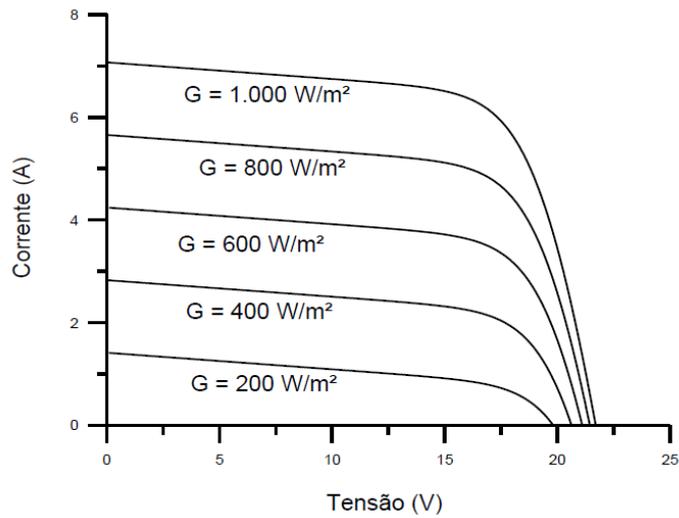
Figura 7 – Representação da curva de ponto de máxima potência na condição STC



### 2.3.1.3 Influência da Irradiância Solar na curva IV

A irradiação solar está diretamente relacionada com a corrente elétrica, quanto maior for a irradiação incidente, maior será a corrente e a tensão, portanto maior será a potência gerada por esse módulo. Para melhor entendimento os efeitos da radiação variando-se tensão e corrente pode ser vista na Figura 8, considerando-se em média uma temperatura de 25°C para o módulo fotovoltaico em análise (Pinho *et al.* 2014).

Figura 8 - Efeito causado pela variação da irradiância solar sobre a curva IV para um módulo fotovoltaico a 25°C

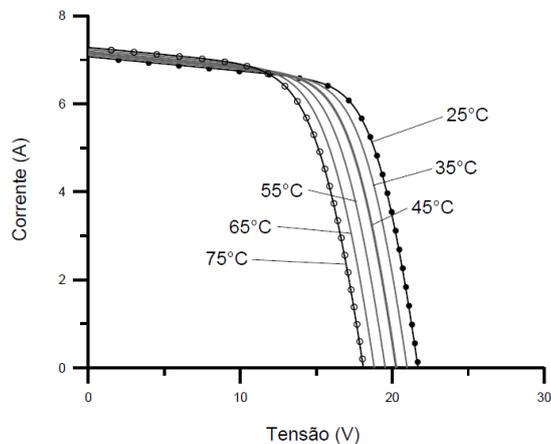


Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (2014)

#### 2.3.1.4 Influência da temperatura na curva IV

No caso da temperatura, por outro lado, é visto que ao provocar uma queda da tensão na medida que aumenta a temperatura, ocorre que a corrente não sofre variação para compensar a perda causada pela diminuição da tensão. A Figura 9 mostra curvas *I versus V* para diversas temperaturas de célula, tornando-se a irradiação constante em 1000W/m<sup>2</sup> para essa análise.

Figura 9 - Efeito causado pela variação da temperatura das células sobre a curva IV para um módulo fotovoltaico sob irradiância de 1.000 W/m<sup>2</sup>



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (2014).

### 2.3.2 Inversores

Os inversores são dispositivos essenciais em sistemas fotovoltaicos. Eles são responsáveis por converter a corrente contínua (CC) gerada pelos painéis solares em corrente alternada (CA), que é a forma de energia elétrica usada na maioria das residências, empresas e na rede elétrica (Santos; Silva; Oliveira, 2021).

Segundo os autores Pinho e Galdino (2014), o inversor é um tipo de dispositivo eletrônico que tem a função de transformar a energia elétrica de uma fonte de corrente contínua para uma energia elétrica em corrente alternada.

Como já relatado, os módulos fotovoltaicos possuem como saída uma energia elétrica em corrente contínua. Isso torna-se inviável a sua aplicação de forma direta na maioria dos equipamentos residenciais, sendo necessário a transformação para a corrente alternada. Para isso, emprega-se os inversores para realizar a conversão desta tensão, além disso é válido ressaltar que este dispositivo ajusta a frequência e o nível de tensão gerada, para que, quando o sistema for *on grid*, se possa conectar à rede, de acordo com as normas vigentes que são estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) (Pereira; Oliveira, 2011).

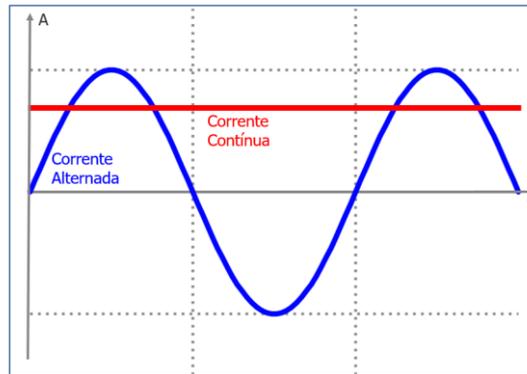
Em resumo, o inversor solar é um dos principais equipamentos do sistema de energia solar, ele atua na conversão de energia elétrica CC gerada pelos painéis em corrente alternada CA com regulação de frequência e tensão. Outra função desempenhada por esse equipamento é garantir a segurança do sistema, proteção e fazer a medição de energia produzida pelos painéis solares.

#### 2.3.2.1 Funcionamento Básico do Inversor

O princípio de funcionamento de um inversor é relativamente simples. Ele recebe a energia CC dos painéis solares e, em seguida, por meio de um processo chamado inversão, transforma essa energia em eletricidade CA. A Figura 10 representa a diferença entre essas duas correntes e a Figura 11 representa a simbologia dos inversores em projetos fotovoltaicos (Oliveira; Silva; Lima, 2022).

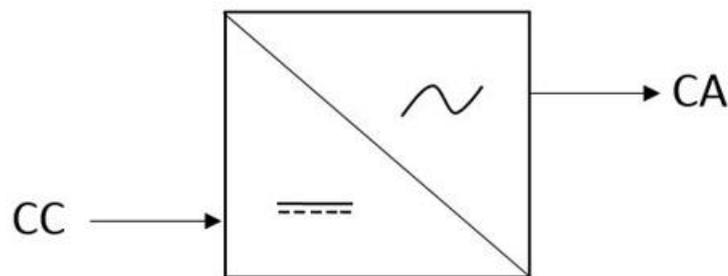
Para realizar essa conversão, os inversores fazem uso de circuitos eletrônicos, transistores de potência e técnicas de modulação de largura de pulso (PWM) ou chaveamento (Oliveira; Silva; Lima, 2022).

Figura 10 - Caracterização de ondas da corrente CC e CA



Fonte: Adaptada Energês (2020).

Figura 11 – Representação dos Inversores



Fonte: Adaptada Energês (2020).

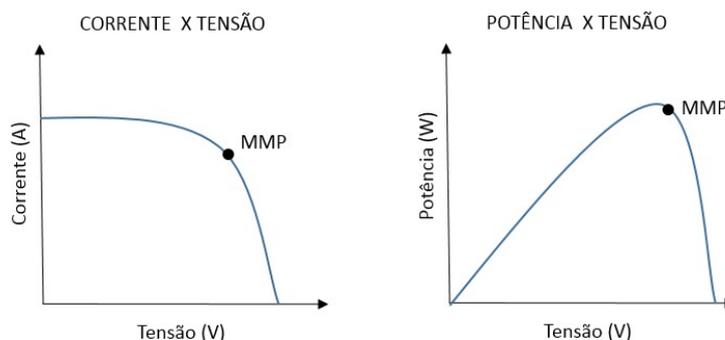
Um dos principais desafios dos inversores é produzir uma forma de onda de saída CA que seja similar à fornecida pela rede elétrica, em termos de frequência e amplitude, isso é importante para garantir que os dispositivos elétricos conectados ao sistema solar funcionem de maneira segura e eficaz.

### 2.3.2.2 Ponto de Máxima Potência (MPPT - Maximum Power Point Tracking)

O Ponto de Máxima Potência (MPPT) é uma tecnologia muito utilizada nos sistemas solares para otimizar a eficiência energética. O MPPT tem o papel de rastrear constantemente o ponto de máxima potência dos módulos fotovoltaicos da relação na curva *I versus V*, como pode ser vista na Figura 12, otimizando assim a eficiência do sistema em função das condições ambientais e operacionais, garantindo sempre que a potência de saída máxima dos módulos seja a mesma. Essa otimização é alcançada ajustando a corrente e a tensão de saída do sistema para garantir que

ele esteja operando na condição em que gera a maior potência possível (Freitas, 2022).

Figura 12 - Resultado da atuação de um sistema de MPPT sobre a tensão de entrada do inversor



Fonte: Adaptada Energês (2020).

O MPPT é essencial em situações em que as condições de irradiação solar variam ao longo do dia, como em dias nublados ou com sombreamento, ou seja, a corrente resultante na saída do inversor solar é modulada de acordo com essas variações (Freitas, 2022).

### 2.3.2.3 Sistema de Monitoramento

Os fabricantes de inversores implementam plataformas de monitoramento para verificar o desempenho de seus inversores em tempo real, garantindo sua eficiência e confiabilidade. Os sistemas de monitoramento são componentes críticos em sistemas fotovoltaicos, pois fornecem informações valiosas para otimização, manutenção e análise dos dados de geração de energia gerada durante o seu funcionamento (Pereira et al., 2020).

## 2.4 Métodos e Estimativa de Dados de Irradiação

Como destacado nos estudos de Silva e Almeida (2022), as bases de dados ambientais podem ser classificadas com base nos métodos de estimativa utilizados para coletar os dados. Cada um desses métodos possui características distintas que

influenciam a precisão e a aplicabilidade dos dados. Os principais métodos de estimativa de irradiação solar são apresentados a seguir.

#### 2.4.1 Modelos Analíticos

Os modelos analíticos são baseados em equações físicas que descrevem a interação da radiação solar com a atmosfera e a superfície terrestre. Exemplos incluem o modelo de Angström-Prescott e o modelo de Perez.

Na visão de Antunes Júnior et al. (2017), a equação de Angström-Prescott tem sido muito utilizada para estimar a radiação solar ( $R_s$ ), pois os valores de  $R_s$  podem ser estimados para qualquer região utilizando apenas um equipamento de valor baixo conhecido como heliógrafo, de simples utilização e com valores de constantes diárias para o período de um ano.

Para Silva et al. (2016) o modelo de Angström-Prescott tornou-se o principal modelo estatístico para estimar a radiação solar global ( $R_s$ ), conforme é mostrado na Equação 1 abaixo, a partir de uma única variável, o brilho solar ( $n$ ) e outras duas constantes diárias. Vale ressaltar que a única desvantagem da utilização desse modelo é o fato de a validade ser apenas para os locais em que são gerados ou para regiões de clima similar.

$$R_s = \left( a + b \frac{n}{N} \right) R_a \quad (1)$$

em que:

$R_s$  - radiação solar, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>

$R_a$  - radiação extraterrestre, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>

$n$  - Número de horas de brilho solar, h d<sup>-1</sup>

$N$  - Número máximo de horas de brilho solar, h d<sup>-1</sup>

Já o modelo de Perez, este baseia-se em uma análise mais detalhada das três formas difusas componentes que pode ser calculada por:

$$IT = I_b R_b + I_d (1 - F_1) (1 + \cos \beta)^2 + I_d F_1 a b + I_d F_2 \sin \beta + I_{pg} (1 - \cos \beta)^2 \quad (2)$$

Em que:

$F1$  e  $F2$  são coeficientes que representam a contribuição da irradiação difusa circumsolar e a contribuição da irradiação difusa horizontal, respectivamente.

$a$  e  $b$  são termos que justificam os ângulos de incidência do disco de radiação circumsolar.

#### 2.4.2 Modelos Empíricos

São desenvolvidos a partir de dados observacionais históricos e geralmente ajustados estatisticamente para prever a irradiação solar com base em parâmetros como latitude, altitude, cobertura de nuvens e horas de sol. O desenvolvimento de modelos empíricos ocorre com base na correlação entre a  $UV$  solar e uma ou mais variáveis meteorológicas.

Durante as últimas duas décadas, diferentes modelos empíricos foram propostos na literatura, os quais podem ser divididos em dois grupos principais: G1 - modelos que calculam os Raios Ultravioleta ( $UV$ ) solar a partir da radiação global; G2 - modelos baseados nos índices de transmissividade atmosférica  $K_{TUV}$  e  $K_T$ . O  $K_{TUV}$  corresponde à razão entre a radiação solar  $UV$  incidente na superfície terrestre e a radiação solar  $UV$  extraterrestre (Teramoto et al., 2020).

Os modelos G1 expressam a  $UV$  como um percentual da radiação global, são mais simples, porém apresentam como principal desvantagem a dependência local. Além disso, eles apresentam menor acurácia devido a radiação global ser influenciada pelo vapor de água e pelas nuvens de maneira diferente da  $UV$ . Ao contrário deles, os modelos G2 correlacionam a transmissividade atmosférica da radiação  $UV$  ( $K_{TUV}$ ) com o  $K_T$  eliminando as dependências local e astronômica (Huang et al., 2011; Wang et al., 2015).

#### 2.4.3 Rede Neurais Artificiais

As redes neurais artificiais (RNA) são compostas por estruturas em formato de nós computacionais (neurônios) possuindo uma alta capacidade de processar dados, informações e habilidade de aprendizado e adaptabilidade de forma rápida. O treinamento ocorre através de um conjunto de dados (conjunto de treinamento) e de um programa de treinamento (algoritmo de aprendizado), sendo o processo análogo

ao aprendizado biológico. O algoritmo de aprendizado carrega os casos exemplos do conjunto de treinamento e atribui pesos a eles a fim de reduzir os erros no momento da estimativa (Teramoto et al., 2020).

Como exemplo de redes neurais existentes atualmente, a Perceptron de Multicamadas (MLP) tem sido a mais utilizada na estimativa de dados de radiação solar (Leal *et al.*, 2011; Jacovides *et al.*, 2015). Sua composição possui as seguintes estruturas: camadas de neurônios artificiais, cada uma responsável pela recepção dos sinais (dados de entrada), análise dos sinais (camadas ocultas) e saída dos dados estimados (camada de saída); um algoritmo de aprendizado que possui todo o conjunto de regras pré-definidas para resolver falhas no aprendizado e minimizar os erros; e uma função de ativação, que define a influência do algoritmo sobre a ativação dos neurônios (Haykin, 1998). A função de ativação usada pela MLP é a típica de padrão sigmoide e o algoritmo de treinamento é o Levenberg-Marquardt de retro propagação (Rumelhart *et al.*, 1986).

#### 2.4.4 Modelos de Transferência Radiativa:

Mais complexos, esses modelos simulam a interação da radiação solar com a atmosfera e a superfície terrestre usando equações de transferência radiativa. São frequentemente usados em estudos climáticos e ambientais de larga escala.

Neste modelo, os fluxos médios zonais de radiação solar e termal na superfície e na atmosfera são substituídos pelas formulações dos processos de transferência radiativa baseadas na metodologia de Chou e Suarez (1994, 1999).

As estimativas da irradiância solar (na superfície terrestre ou em um determinado nível de pressão), e dos fluxos de radiação termal (emitida pela superfície e pela atmosfera terrestre) são realizadas através da modelagem dos processos físicos de transferência radiativa considerando-se a atmosfera plano-paralela, ou seja, uma atmosfera horizontalmente homogênea. A atmosfera é considerada composta por 75 camadas. Na interação da radiação solar e da radiação termal com a atmosfera são considerados alguns dos principais gases radiativamente ativos que compõem a atmosfera (que fazem parte dos denominados gases do efeito estufa), as nuvens, e os aerossóis. Neste estudo os gases radiativamente ativos que interagem com a radiação do espectro solar considerados são: o vapor d'água, o ozônio, o oxigênio, e o dióxido de carbono (Moraes, 2002).

## 2.5 Fonte de Dados de Irradiação

As bases de dados ambientais desempenham um papel importante na representação precisa das condições climáticas em um local específico. Essas bases de dados são mantidas por diversas instituições, incluindo agências de meteorologia, universidades, centros de pesquisa e órgãos governamentais, desempenhando um papel fundamental na avaliação e no planejamento da geração de energia solar em usinas fotovoltaicas. Além da irradiação solar essas bases de dados fornecem uma visão abrangente das condições climáticas ao longo do tempo em uma região específica (Silva; Gomes, 2022).

Essas fontes de dados oferecem abordagens distintas para a coleta de informações sobre irradiação solar e temperatura, permitindo que os pesquisadores e profissionais escolham a que melhor atende às suas necessidades específicas em projetos relacionados à energia solar (Silva; Gomes, 2023).

### 2.5.1 NASA

A Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (*National Aeronautics and Space Administration* - NASA) é uma valiosa fonte de dados para a irradiação solar e a temperatura. Ela obtém informações precisas por meio do sensoriamento remoto por satélites. Esses satélites coletam dados de radiação solar diretamente do espaço, permitindo uma visão global das condições solares em diferentes regiões.

A NASA disponibiliza esses dados através de sua plataforma POWER (*Prediction of Worldwide Energy Resource*), que oferece uma ampla gama de informações climáticas e de irradiação solar baseadas em dados históricos e modelos atmosféricos. Esse banco de dados é constantemente atualizado e cobre um histórico de décadas, o que permite análises detalhadas sobre a média de irradiação anual, variações sazonais e o impacto de condições atmosféricas em diferentes locais (NASA, 2023).

A NASA disponibiliza dados de satélites meteorológicos e fluxo de energia da superfície terrestre. Os dados são gratuitos e podem ser baixados em uma resolução espacial de 0,5°. Esses modelos consideram diversos fatores, como a posição do sol, a cobertura de nuvens e a variação sazonal para fornecer informações atualizadas e de alta qualidade (Silva; Rocha; Fernandes, 2021).

### 2.5.2 PVGIS

O *Photovoltaic Geographical Information System* (PVGIS) é uma aplicação web desenvolvida pelo Centro Comum de Pesquisa da Comissão Europeia, tendo passado por mais de uma década de evolução. Sua versão mais recente, o PVGIS 5.2, foi lançada em 2022. A cada nova versão, o PVGIS tem ampliado seus recursos e expandido a cobertura geográfica dos dados disponíveis. Ele integra informações de diversas fontes, como observações meteorológicas terrestres, dados de satélites, informações topográficas e modelos climáticos. Para o Brasil estão disponíveis dois modelos: NSRDB e SARA (Mendes, 2023)

Assim, é a partir dessa ferramenta muito utilizada que é possível estimar a produção média mensal e anual de eletricidade de um sistema fotovoltaico quando conectado à rede elétrica, basta apenas inserir o valor de capacidade instalada e exportar os dados para serem processados em folhas de cálculo. O programa leva em consideração as características específicas como: a radiação solar, a temperatura, a velocidade do vento, além dos tipos de módulos fotovoltaicos escolhidos. Vale ressaltar que ela utiliza também as coordenadas geográficas para fazer os cálculos, o azimute e o ângulo de inclinação ideais para sistemas PV montado, no entanto assume nas simulações, determinadas características padrão do sistema (Hartmann, 2018).

Diante disso, mesmo o PVGIS permitindo caracterizar o tipo de sistema, nomeadamente, localização geográfica, condições climáticas locais, tecnologia do PV, potência instalada e perdas no sistema, a saída dos resultados também necessita de algumas condições padrão que o programa assume, tais como: perdas devido a temperatura e efeitos de irradiação, ou seja, o cálculo automaticamente tem em consideração a dependência desempenho da tecnologia PV dessas condições padrão (Hartmann, 2018).

### 2.5.3 CRESESB

Os dados de irradiação solar fornecidos pelo CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito) desempenham um papel essencial no planejamento de projetos de energia solar no Brasil. Vinculado ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e mantido pela Eletrobras, o CRESESB é uma

das principais referências nacionais em recursos de energia solar e eólica, oferecendo uma base de dados robusta e confiável sobre a disponibilidade de radiação solar em diferentes regiões do país. Essa informação é de suma importância para a consolidação da energia solar como fonte renovável viável e estratégica no contexto brasileiro (CEPEL, 2023).

O banco de dados disponibilizado pelo CRESESB fornece informações detalhadas sobre componentes de irradiação solar, incluindo Irradiância Global Horizontal (GHI), Irradiância Direta Normal (DNI) e Irradiância Difusa Horizontal (DHI). Esses dados, obtidos por meio de uma rede de estações de medição solar e instrumentos satelitais, além de modelos atmosféricos, garantem medições precisas e de alta qualidade. Esse nível de detalhamento é fundamental para uma avaliação precisa do potencial solar de diferentes locais, proporcionando informações essenciais para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos e para a análise de viabilidade de novos projetos (SILVA et al., 2021).

Um dos grandes diferenciais do banco de dados do CRESESB é seu foco nas particularidades climáticas e geográficas do Brasil, o que proporciona uma precisão aprimorada para o desenvolvimento de projetos solares locais. Dada a diversidade climática do país e a variação na intensidade da radiação solar entre as regiões, a utilização de dados nacionais oferece vantagens consideráveis em relação a fontes internacionais. Esses dados são especialmente valiosos para projetistas e investidores ao identificar áreas com alto potencial de irradiação, como o Nordeste brasileiro, que apresenta algumas das melhores condições para geração de energia solar no mundo (PEREIRA et al., 2017).

Além disso, o CRESESB é uma fonte importante para estudos acadêmicos e pesquisas em energia renovável. Seu Atlas Solar Brasileiro é amplamente utilizado em estudos de viabilidade e no desenvolvimento de políticas públicas para a expansão do uso de energia solar. Por meio desse recurso, é possível analisar padrões sazonais e variações climáticas que impactam diretamente a produção de energia, permitindo um planejamento mais preciso e eficiente para o setor (CRESESB, 2022).

Em suma, os dados de irradiação fornecidos pelo CRESESB constituem um recurso essencial para o setor solar brasileiro. Oferecendo uma base sólida e adaptada às condições locais, esses dados apoiam o planejamento de projetos fotovoltaicos e contribuem para o desenvolvimento sustentável e econômico do país ao promover a energia solar como uma alternativa viável e competitiva.

#### 2.5.4 INMET

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) possui uma rede de estações meteorológicas automáticas que coletam dados meteorológicos em todo o Brasil. A cada minuto, essas estações registram informações como temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade do vento, e irradiação solar. A cada hora, os dados coletados são integrados e transmitidos para a sede do INMET, em Brasília, via satélite ou telefonia celular (INMET, 2023)

Diferentemente das fontes de sensoriamento remoto, o INMET coleta dados através de 194 estações convencionais e de 574 estações automáticas distribuídas em todo o Brasil. Os dados coletados são essenciais para monitorar as condições climáticas locais e fornecer informações precisas sobre a temperatura. As informações do INMET são amplamente confiáveis e frequentemente usadas para análises de clima e previsões meteorológicas no Brasil (Santos; Costa; Araújo; Pires; Regnier, 2020).

Suas estações terrestres fornecem observações in loco, tornando-se uma fonte fundamental para o monitoramento da temperatura em projetos fotovoltaicos específicos em todo o país (Santos; Pereira; Silva; Batista, 2017).

### 2.6 Software PVSyst

Software PVsyst foi desenvolvido em Genebra na Suíça, pelo engenheiro Roger Meyer em 1992, usado para dimensionamentos de sistemas fotovoltaicos. Apresenta diversas funcionalidades dos mais diversos detalhamentos de gráficos até a precisão de cálculos. Atualmente o PVsyst é um dos softwares mais empregados por engenheiros eletricitas e arquitetos nos mais diversos lugares do mundo (PVSYST, 2023).

Essa ferramenta computacional conta com bancos de dados de informações meteorológicas e permite também importações de dados de sites externos, além de possuir dados técnicos bem completos como inversores, baterias, placas, MPPTs entre outros, o que permite fazer o dimensionamento de forma correta.

O software PVSyst possui uma ampla gama de funcionalidades, como estimativa da geração de energia elétrica de usinas fotovoltaicas, análise do

desempenho de sistemas fotovoltaico e compatibilidade com diferentes tipos de módulos fotovoltaicos.

## 2.7 Avaliação comparativa de bases de dados

Para validar a confiabilidade dos dados simulados com o reais serão realizados uma análise estatística utilizando métricas reconhecidas na literatura, a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), o Erro Absoluto Médio (MAE) e o Coeficiente de correlação de

O RMSE é determinado pela soma dos quadrados das diferenças entre os resultados do modelo e observações, essa métrica fornece uma medida de dispersão de erros entre as previsões e valores reais:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2)$$

Onde  $n$  é o número de observações.

O Erro Absoluto Médio (MAE) é uma métrica que mede a magnitude média dos erros em um conjunto de previsões, sem considerar a direção dos erros. Comparado ao RMSE, o MAE é menos sensível a grandes desvios. Quanto menor o valor do MAE, mais preciso é o modelo

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (3)$$

O Coeficiente de Correlação de Pearson ( $r$ ) mede a correlação linear entre duas variáveis, onde valores próximos de  $\pm 1$  indicam uma forte relação linear. É frequentemente utilizado para verificar a consistência entre dados observados e previstos, sendo calculado pela mesma fórmula do Coeficiente de Correlação ( $r$ ).

$$r = \frac{\sum (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2 \cdot \sum (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}} \quad (4)$$

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo, serão apresentadas as definições das áreas de estudo e das fontes de dados de irradiação que serão objeto de análise. Em seguida, fazendo-se uma comparação entre os dados simulados com dados reais de monitoramento da usina fotovoltaica em estudo.

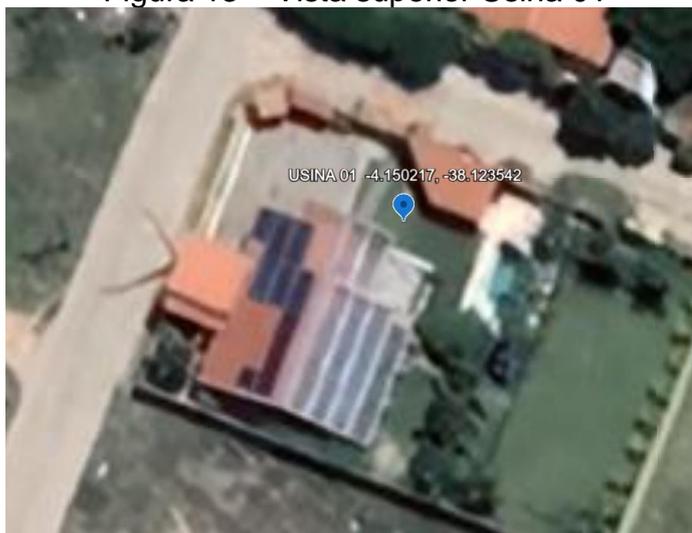
Considerando que o equipamento piranômetro não está disponível nas três usinas do Ceará participante dessa pesquisa para medir os dados reais de irradiação solar global horizontal (GHI), será adotado um método alternativo para comparar as bases de dados da NASA, CRESESB, PVGIS e INMET com os dados reais. Primeiramente, os dados de cada fonte serão inseridos no software PVsyst para simular a geração de energia e em seguida, esses dados simulados serão confrontados com os dados reais de geração obtidos pelos sistemas de monitoramento dos inversores de cada usina.

#### 3.1 Área de Estudo e Caracterização das Usinas

Para determinar as regiões de estudo, foram selecionadas três usinas já instaladas, que possuem dados de geração disponíveis no sistema de monitoramento da fabricante do inversor de cada usina, no período de janeiro a dezembro de 2023. As usinas foram selecionadas com base em dois cenários distintos, sendo da região e potência instalada, com o intuito de comparar e avaliar o comportamento dos dados disponibilizados de irradiação fornecidos pelas diferentes fontes de dados em cada cenário.

O primeiro cenário, definido como Usina 01, está localizado na cidade de Beberibe, no estado do Ceará, na região Metropolitana de Fortaleza. A cidade está situada em uma região litorânea, com clima tropical úmido, caracterizado por temperaturas médias altas e chuvas abundantes. O sistema fotovoltaico da Usina 01, conforme apresentado na Figura 13, está instalado sobre estrutura de madeira com telhas cerâmicas, sendo composto de 90 módulos fotovoltaicos da fabricante JA Solar, com potência nominal de 325 W cada, orientação dos módulos está a 111 graus sudeste e 291 graus noroeste. Os módulos estão interligados em 3 strings com 19 módulos e outras 3 strings com 11 módulos, com um inversor de frequência da fabricante SMA, modelo STP 25000, cuja potência instalada é de 29,25 kWp.

Figura 13 – Vista superior Usina 01



Fonte: Adaptado do Google Earth (2023).

A Usina 02 está localizada no município de Irauçuba, no estado do Ceará, na região do Sertão Central, conforme Figura 14. A cidade está situada em uma região semiárida, com clima tropical quente semiárido, caracterizado por temperaturas médias altas e chuvas escassas. A altitude da região é de 138 metros acima do nível do mar. O sistema fotovoltaico da Usina 02, apresentado na Figura 02 está instalado em solo e possui 880 módulos fotovoltaicos da fabricante Trina Solar, com potência nominal de 335 W cada, a orientação dos módulos está a 15 graus ao nordeste. Os módulos estão interligados em 44 strings com 20 módulos cada, com 3 inversores de frequência da fabricante SMA, SHP 75-10, com potência nominal de 75 kW, cuja potência instalada da usina é de 294,80 kWp.

Figura 14 -Vista superior Usina 02



Fonte: adaptado do Google Earth (2023).

Por fim, a Usina 03 está localizada em Fortaleza, capital do estado do Ceará, como pode ser visto na Figura 15. A cidade está situada em uma região litorânea, com clima tropical quente subúmido, caracterizado por temperaturas médias altas e chuvas abundantes. A altitude da região é de 16 metros acima do nível do mar. O sistema fotovoltaico da usina 03 está instalado sobre estrutura de madeira e telhas cerâmica e é composto por 63 módulos fotovoltaicos da fabricante DAH, conforme a Figura 3 com potência nominal de 545 W cada, orientados 15 graus ao noroeste. Os módulos estão interligados em 3 strings com 13 módulos e outras 2 strings com 12 módulos, com um inversor modelo Solis 25 KTL-3.0-M, com potência nominal de 25 kW. A potência instalada da usina é de 34,585 kWp.

Figura 15 - Vista superior Usina 03



Fonte: Adaptado do *Google Earth* (2023).

A seguir, na Tabela 02 é apresentada as características de localização e clima e a Tabela 03 resume as especificações de cada sistema fotovoltaico.

Tabela 1 - Descrições das regiões de estudos

Cenários	Região	Cidade	Latitude	Longitude	Tipo de Clima
Usina 01	Ceará	Beberibe	-4.150217	-38.123542	Tropical úmido
Usina 02		Irauçuba	-3.746025	-39.796289	Tropical quente semiárido
Usina 03		Fortaleza	-3.724962	-38.516349	Tropical quente subsumido

Fonte: Autor (2024).

Tabela 03 – Característica do sistema FV

Cenários	Orientação do módulo	Qtd. de módulos	Fab. do módulo	Potência do módulo	Fab. do inversor	String	Potência do Inversor	Potência total do sistema
Usina 01	111° sudoeste e 291° noroeste	90	JA Solar	325W	SMA STP	-3 strings com 19M - 3 string com 11M	25kW	29,25 kWp
Usina 02	15° ao nordeste	880	Trina Solar	335W	SMA SHP	44 strings com 20M	75kW	294,80kW p
Usina 03	15° ao noroeste	63	DAH Solar	545W	Solis	- 3 strings com 13M - 2 strings com 12M	25kW	34,585kW p

Fonte: Autor (2024).

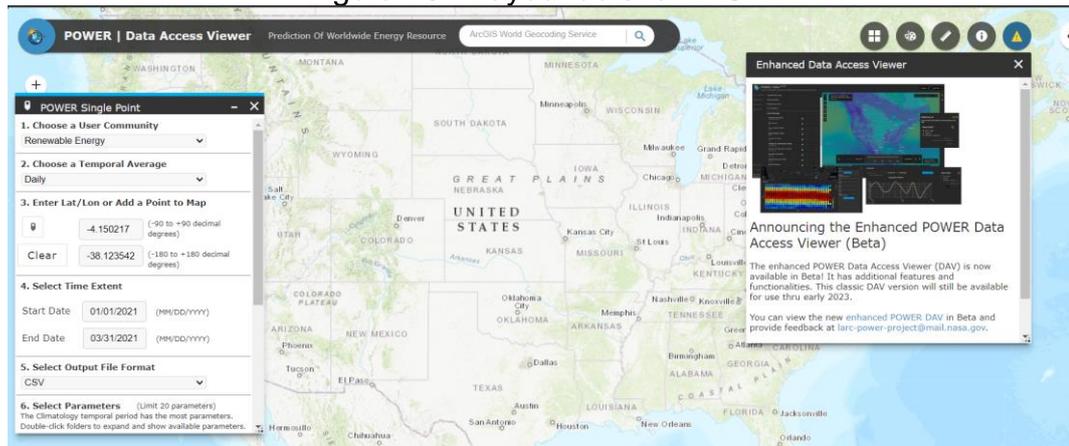
### 3.2 Aquisição de dados

Abaixo serão listadas as bases de dados utilizadas e métodos aplicados para obtenção dos dados para as três usinas de análise.

#### 3.2.1 NASA POWER

Os dados da fonte de dados da NASA Power de irradiação global horizontal e temperatura, foram obtidos por meio de seu site oficial (<https://power.larc.nasa.gov/>). Para isso, foi necessário selecionar a localização por meio de latitude e longitude, o período de estudo, de janeiro de 2023 a dezembro de 2023, e selecionar o parâmetro irradiação global horizontal, ALLSKY\_SFC\_SW\_DWN. Os dados foram extraídos em formato CSV para cada usina apresentada na Tabela 2, com suas respectivas localizações, para analisar os resultados extraídos posteriormente no Excel 2016. A Figura 16 mostra o layout do site NASA onde foi feito a coleta de dados.

Figura 16 - Layout do site NASA



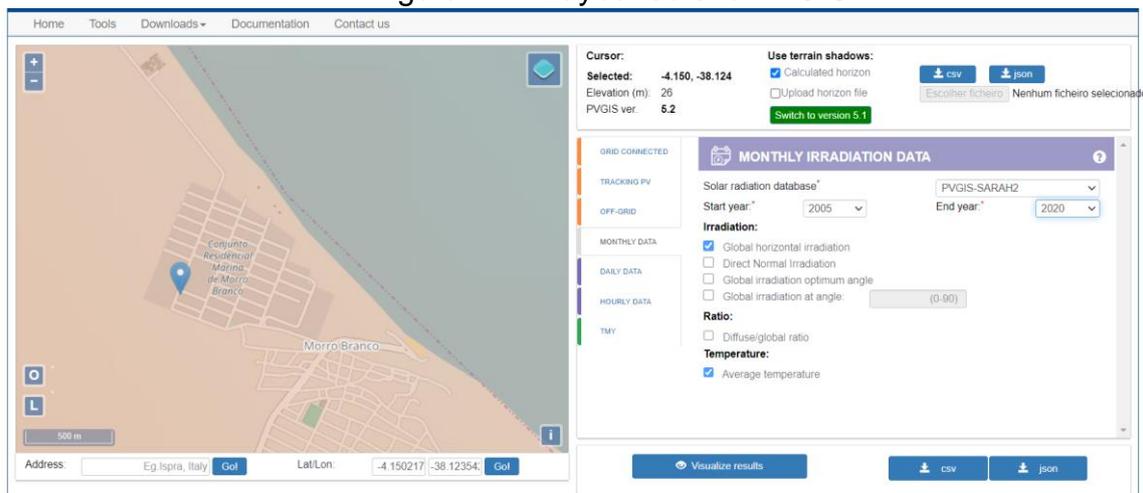
Fonte: Adaptada Nasa (2023).

### 3.2.2 PVGIS

A base de dados de PVGIS, é obtida por meio do site oficial do Joint Research Centre da Comissão Europeia (<https://re.jrc.ec.europa.eu>), sendo necessário fornecer os dados de localização, período de estudo e os parâmetros de interesse, para esse caso a irradiação global horizontal (GHI).

Para o Brasil o modelo disponibiliza dois modelos de dados, NSRDB e SARA. Nesse trabalho foi aplicado o modelo SARA por apresentar mais disponibilidades de dados, para 2005 a 2020.

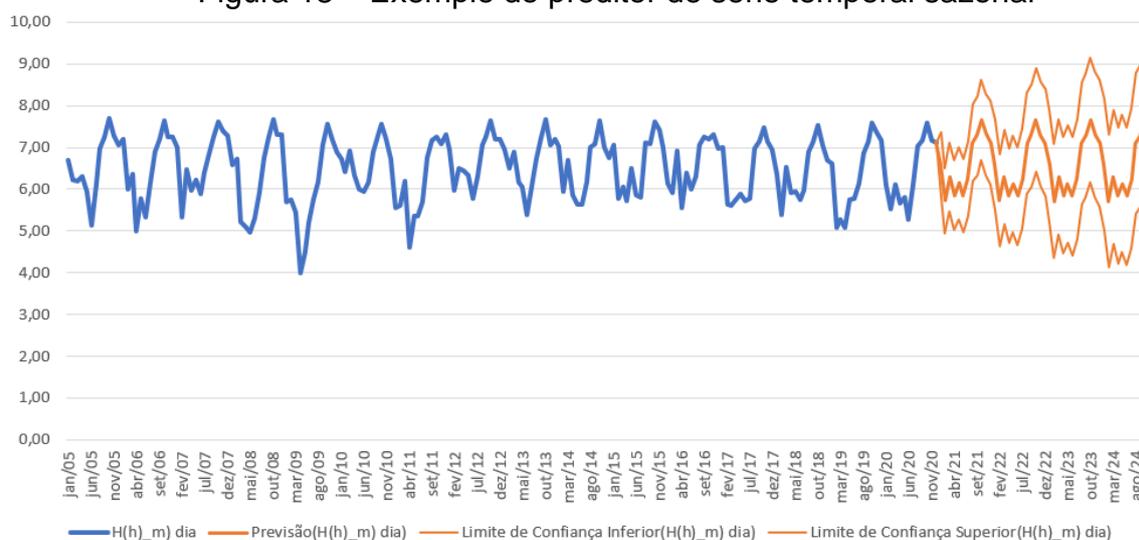
Figura 17 – Layout do site PVGIS



Fonte: Adaptada PVGIS (2023).

Diferentemente da NASA, o PVGIS disponibiliza dados de irradiação solar até o ano de 2020, como o período de estudo deste trabalho é referente ao ano de 2023, foi utilizado um modelo matemático preditor de série para prever os dados deste período para cada mês, com base no histórico de 2005 a 2020, para cada usina de estudo. O preditor de serie aplicado foi do tipo temporal sazonal utilizando o programa Excel 2016.

Figura 18 – Exemplo do preditor de serie temporal sazonal



Fonte: Autor (2024).

### 3.2.3 CRESESB

O processo de obtenção dos dados iniciou-se com o acesso ao portal do CRESESB, acessível em < [cresebs.cepel.br](http://cresebs.cepel.br) > onde se encontra a seção de dados meteorológicos e de radiação solar. Foi selecionado os dados de longitude e latitude de cada usina, em seguida, selecionou a coleta dos dados de GHI em kWh/m²/dia.

Após a seleção dos dados de irradiação, foi realizado o download deles em formato compatível para Excel, facilitando o processamento e uso na plataforma de simulação.

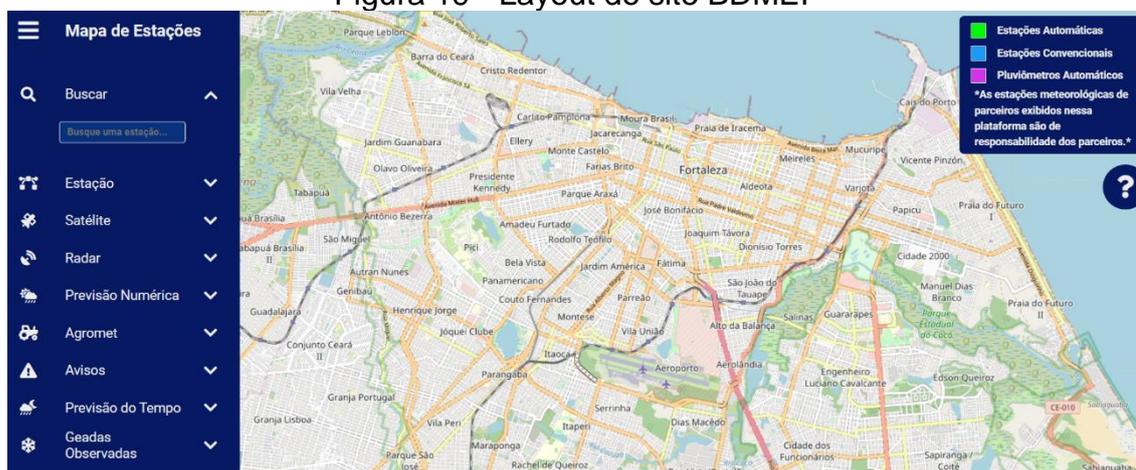
A partir desse processo, obteve-se um conjunto de dados de irradiação solar que fundamenta a análise da Irradiação Global Horizontal para cada uma das usinas estudadas.

### 3.2.4 Instituto Nacional de Meteorologia

Recentemente, os dados históricos anuais de todas as estações meteorológicas do Brasil foram disponibilizados para download no site oficial do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) por meio da plataforma do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), acessível em <https://bdmep.inmet.gov.br/>.

A Figura 23 ilustra o layout do site do BDMEP, onde é possível observar no mapa as estações meteorológicas disponíveis no estado do Ceará. As estações automáticas são indicadas em verde, enquanto as estações convencionais são representadas em azul. As estações automáticas oferecem uma gama mais ampla de dados, incluindo informações detalhadas sobre parâmetros meteorológicos como temperatura, umidade, pressão atmosférica e, especialmente, dados de irradiação solar, que são essenciais para esse estudo. Já as estações convencionais fornecem dados meteorológicos mais tradicionais, coletados manualmente, com informações de temperatura, umidade e precipitação, mas sem os dados adicionais de irradiação. Os dados de GHI foram obtidos através das estações automáticas.

Figura 19 - Layout do site BDMEP



Fonte: Adaptada INMET (2024).

Para a Usina 01, não há uma estação automática próxima disponível para obtenção de dados de referência. Portanto, para suprir essa necessidade, a estação automática A339 de Jaguaruana foi selecionada devido às suas características semelhantes de altitude e proximidade à praia. Esta estação está localizada a aproximadamente 114 km de distância do local da Usina 01.

No caso da Usina 03, há duas estações automáticas próximas: A306 e A359, situadas a 79 km e 60 km de distância, respectivamente. Após a análise dos dados disponíveis de ambas as estações, apenas a estação A306 fornece dados referentes ao ano de 2023.

No caso da Usina 03, há a estação A305 situada aproximadamente 4,7km de distância, apresentando características semelhantes e com todos os dados disponíveis para o ano de 2023.

Os dados de irradiação nas fontes supracitadas são fornecidos em  $\text{Kj/m}^2$  para cada hora do dia. No entanto, para aplicar no programa de simulação PVsyst, é necessário converter em  $\text{Kh/m}^2/\text{dia}$ . Em termos práticos, para converter radiação global de  $\text{Kj/m}^2$  para  $\text{Wh/m}^2$ , ou seja, será necessário dividir por 3600, pois 1 watt-hora (Wh) equivale a 3600 joules (J);

$$\text{Radiação global (Wh/m}^2\text{)} = \text{Radiação global (Kj/m}^2\text{)} / 3600 \quad (7)$$

No arquivo extraído no formato CSV foi aplicado a fórmula acima para cada hora do dia, e em seguida multiplicado por 24h, para obtermos o  $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$ . No Excel transformado os dados em  $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$ , foram obtidos os dados mensais, para posteriormente aplicar no PVsyst

### **3.3 Simulação no PVsyst**

A ferramenta computacional PVsyst necessita dos parâmetros específicos de cada usina, os dados meteorológicos para realizar a simulação e as considerações das perdas para assegurar uma simulação precisa no software PVsyst.

Inicialmente, foi necessário definir os dados meteorológicos para a simulação. Como o foco deste trabalho é exclusivamente a análise do comportamento da Irradiação Global Horizontal, apenas esse dado foi alterado nas diferentes bases de dados simuladas, enquanto a temperatura foi mantida constante. Os valores de temperatura utilizados foram obtidos a partir das medições realizadas pelas estações automáticas do INMET mais próximas de cada usina estudada, conforme descrito no tópico 3.2.4. Assim, os dados apresentados na Seção 3.2 foram aplicados a cada fonte de dados considerada neste estudo.

Após definir os dados meteorológicos, conforme ilustrado na Figura 24, foram projetadas três usinas, levando em consideração os parâmetros específicos necessários para a simulação descritos na seção 3.1.

Figura 20 - Layout do software PVsyst

	Global horizontal irradiation kWh/m <sup>2</sup> /day	Temperature °C
January	3.99	28.1
February	3.85	27.9
March	3.59	26.5
April	3.68	26.1
May	4.23	25.5
June	4.10	26.7
July	4.82	27.7
August	5.51	29.1
September	5.74	29.7
October	5.71	29.7
November	5.34	29.6
December	4.78	29.2
<b>Year</b>	<b>4.62</b>	<b>28.0</b>

**Required Data**

- Global horizontal irradiation
- Average Ext. Temperature

**Extra data**

- Horizontal diffuse irradiation
- Wind velocity
- Linke turbidity
- Relative humidity

**Irradiation units**

- kWh/m<sup>2</sup>/day
- kWh/m<sup>2</sup>/mth
- MJ/m<sup>2</sup>/day
- MJ/m<sup>2</sup>/mth
- W/m<sup>2</sup>
- Clearness Index Kt

Fonte: Autor (2023).

Esses parâmetros incluem a orientação dos módulos solares, o fabricante, a potência, a quantidade de módulos e inversores, além do número de MPPTs e o número de entradas por string para cada inversor em cada usina, a figura 25 apresenta os campos de cada parâmetro.

Figura 21 – Exemplo de parametrização da usina

**Sub-array name and Orientation**

Name: PV Array  
Orient.: Fixed Tilted Plane  
Tilt: 30°  
Azimuth: 45°

**Pre-sizing Help**

No sizing  
Enter planned power: 0.0 kWp  
... or available area (modules): 0 m<sup>2</sup>

**Select the PV module**

Available Now: [Dropdown]  
Filter: All PV modules  
GCL 335 Wp 32V Si-mono GCL-M6/72G-335 Since 2015 Manufacturer 2016 [Open]

Use optimizer  
Sizing voltages : Vmpp (60°C) 32.5 V  
Voc (10°C) 48.6 V

**Select the inverter**

Available Now: [Dropdown]  
Output voltage 400 V Tri 50Hz  
SMA 75 kW 570 - 800 V TL 50/60 Hz Sunny Highpower-SHP 75-10 Since 2020 [Open]

Nb. of inverters: 3  
Operating voltage: 570-800 V Global Inverter's power: 225 kWac  
Input maximum voltage: 1000 V "String" inverter with 2 inputs

**Design the array**

**Number of modules and strings**

Mod. in series: 20 (between 18 and 20)  
Nb. strings: 44  
Overload loss: 1.1 %  
Prom ratio: 1.31 [Show sizing]

**Operating conditions**

Vmpp (60°C) 650 V  
Vmpp (20°C) 772 V  
Voc (10°C) 972 V

Plane irradiance: 1000 W/m<sup>2</sup>  
Imp (STC) 392 A  
Isc (STC) 414 A  
Isc (at STC) 414 A

**The inverter power is slightly undersized.**

Max. in data  
 STC  
Max. operating power (at 1000 W/m<sup>2</sup> and 50°C): 267 kW  
Array nom. Power (STC): 295 kWp

**Nb. modules: 880 Area: 1760 m<sup>2</sup>**

Fonte: Autor (2023).

Após a definição da orientação e das especificações da usina, tornou-se necessário considerar as perdas do sistema para assegurar uma simulação precisa no software PVsyst. Esse processo de simulação inclui tanto a adaptação de alguns parâmetros padrão da plataforma quanto a manutenção de outros valores predefinidos, com o objetivo de refletir as condições reais de operação para cada sistema.

Na plataforma PVsyst, o fator de perda constante (UC) possui um valor padrão que varia de acordo com o tipo de estrutura da instalação. Para instalações em solo, o UC deve ser ajustado para fator 29, enquanto para estruturas de telhado, o valor recomendado é fator 25. Dessa forma, nas usinas 1 e 3, que utilizam estrutura de telhado, o fator UC foi ajustado para fator 25. Já na usina 2, com estrutura em solo, o fator UC foi configurado para fator 29.

Os demais parâmetros de perda foram mantidos nos valores padrão da plataforma PVsyst, incluindo perdas por temperatura, sombras projetadas, perdas elétricas por cabeamento e degradação anual dos módulos.

Após a definição dos três parâmetros obrigatórios para simulação, orientação, sistema e as perdas, finalmente pode ser simulado e obter o relatório completo com as informações do sistema. A Figura 26 resume os dados preenchidos.

Figura 22 - Informações do sistema da Usina 02

The screenshot displays the PVsyst software interface for a project named 'USINA 02'. The interface is divided into several sections:

- Project Section:**
  - Project's name: USINA 02
  - Client name: Not defined
  - Site File: Usina 02\_Nasa .SIT
  - Irradiação 02 - Nasa
  - Brazil
  - Meteo File: USINA 02 - HELIOM CLIM \_SYN.MET
  - IRRADIAÇÃO 02 - HELIOMCLIM
  - Synthetic 0
- Simulation Status:**
  - Simulation done (version 7.2.0, date 14/10/23)
- Variant Section:**
  - Variant n°: VC4 : PVGIS
  - Main parameters: Orientation, System, Detailed losses, Self-consumption, Storage
  - Optional: Horizon, Near Shadings, Module layout, Energy management, Economic evaluation
  - Simulation: Run Simulation, Advanced Simul., Report, Detailed results
- Results overview:**
  - System kind: No 3D scene defined, no shadings
  - System Production: 389 MWh/yr
  - Specific production: 1320 kWh/kWp/yr
  - Performance Ratio: 0.842
  - Normalized production: 3.62 kWh/kWp/day
  - Array losses: 0.62 kWh/kWp/day
  - System losses: 0.06 kWh/kWp/day

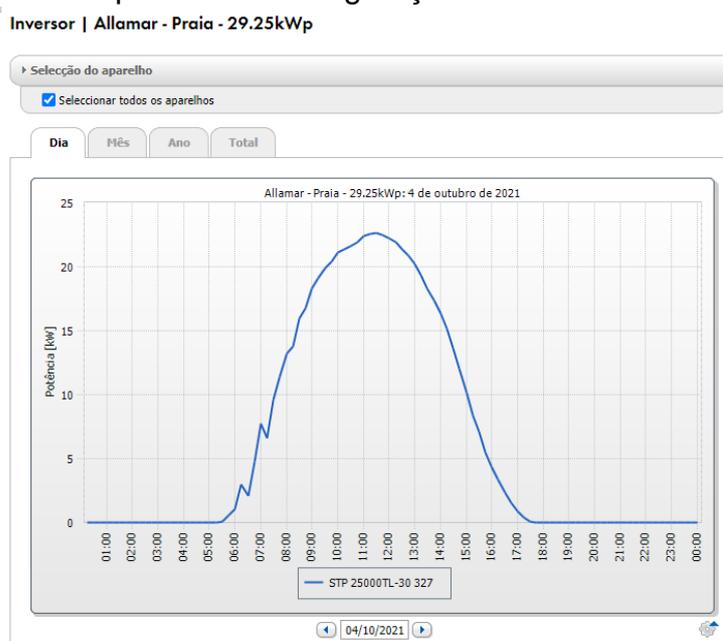
Fonte: Autor (2023).

### 3.4 Obtenção dos Dados de Geração

Esta seção apresenta os dados reais de geração pelo sistema de monitoramento da fabricante de cada inversor. As Usinas 01 e 02 possuem a mesma fabricante dos inversores, SMA. Os dados de geração de energia são medidos a cada 15 minutos, obtidos em kWh e enviados a plataforma de monitoramento, Sunny Portal, por meio da rede *WI-FI* local.

A Figura 27 representa a curva de geração diária de uma das usinas. Por outro lado, a Usina 02 tem-se como fabricante de inversor a Solis. Os dados de geração de energia são obtidos através da plataforma SolisCloud de forma semelhante a fabricante SMA.

Figura 23 – Exemplo da curva de geração do sistema de monitoramento



Fonte: Autor (2023).

Com o objetivo de verificar se não houve nenhuma falha de geração e/ou comunicação no período analisado, foram averiguados os dados diários de geração de cada usina. As Usinas 01 e 03 possuíam todos os dados de geração do período, sem nenhuma falha. Porém, para o caso da Usina 02 apresentou-se perdas de comunicação no período dos dias 12 a 31 de dezembro. Logo, para a obtenção desses dados foi utilizado a média de geração dos dias compreendidos de 1 a 11 do mesmo mês.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos por cada fonte de dados utilizada neste trabalho. Em seguida, será realizado um estudo comparativo entre o valor de energia real e o valor da energia simulada no *Pvsyt*, para avaliar a performance de cada fonte de dados.

As fontes de dados foram selecionadas por disponibilizarem os dados de GHI de forma pública em sites oficiais, a partir das informações de localização, vale ressaltar que as localizações das três usinas foram escolhidas por apresentar cenários diferentes para validar a fonte de dados que mais aproxima da realidade.

Nos sites de cada base de dados, foram extraídos os dados de GHI em kWh/m<sup>2</sup>/dia e eles foram tratados para obter os dados mensais para o ano de 2023. Abaixo apresenta o comportamento de cada usina.

### 4.1 Usina 01

#### 4.1.1 Análise dos Dados de Irradiação

A Tabela 3 apresenta os valores mensais de irradiação solar fornecidos por cada uma das quatro bases de dados analisadas para a Usina 01. É possível observar que todos os dados apresentam um padrão sazonal, com os meses de janeiro a junho registrando maior incidência de chuvas e menor exposição direta à luz solar, o que resulta em irradiações mais baixas. Em contrapartida, nos períodos com menor presença de chuvas, os valores de irradiação são mais elevados.

As diferenças nas medições entre as fontes podem ser atribuídas aos métodos específicos de coleta e modelagem de dados utilizados por cada base. O PVGIS, por exemplo, apresenta valores de GHI (Irradiação Global Horizontal) ligeiramente superiores aos das demais fontes. Essa discrepância pode ser explicada pelo uso de um modelo preditivo sazonal, baseado em médias históricas de 2005 a 2020, que não inclui dados do período estudado. Esse enfoque pode gerar uma margem de erro ao representar o cenário atual. Da mesma forma, o CRESESB também utiliza dados históricos para a estimativa de irradiação, sem considerar medições recentes, o que pode resultar em variações significativas em relação à realidade atual.

Em contraste, as bases de dados da NASA e do INMET mostram valores mais próximos da realidade observada para o período específico analisado, com variações sazonais menores e maior precisão no reflexo das condições climáticas atuais

Tabela 2 – Dados de irradiação da Usina 01

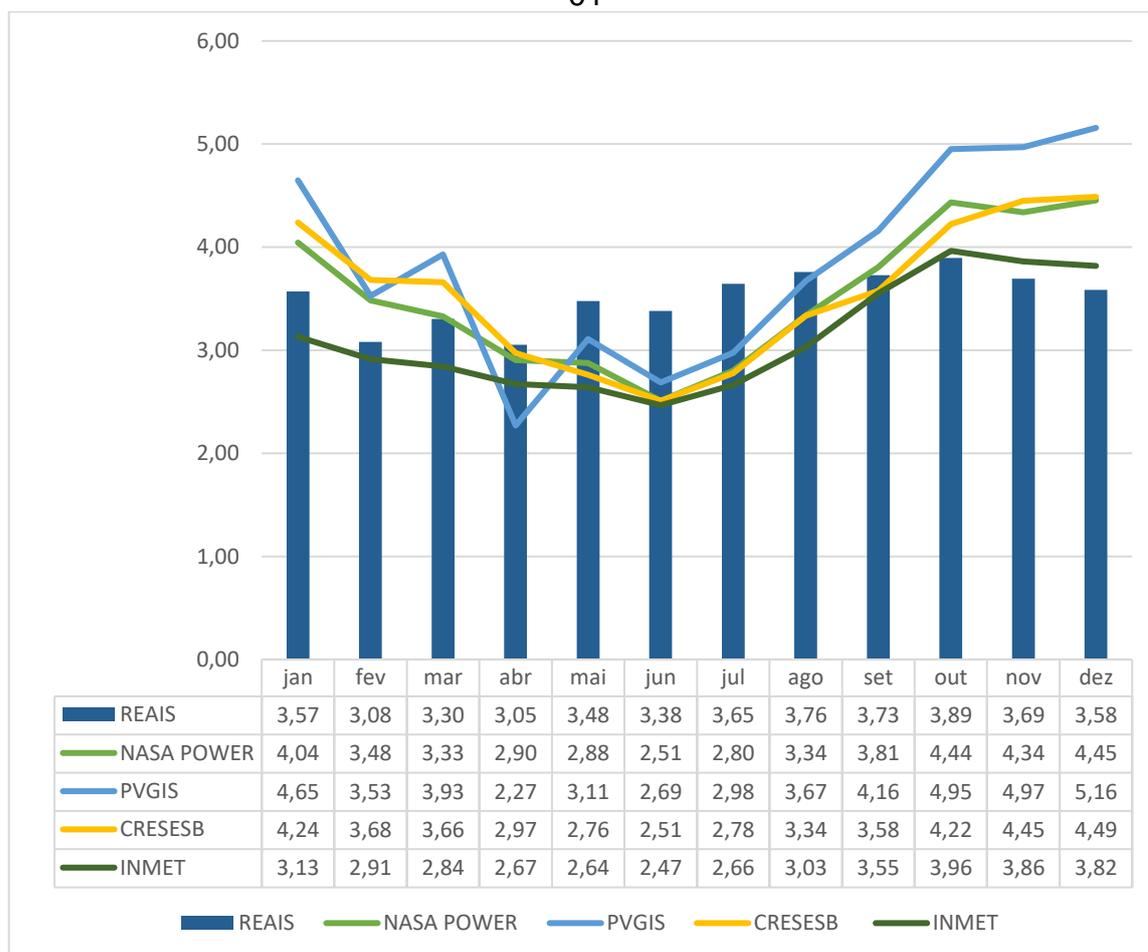
<b>Fonte</b>	<b>NASA</b>	<b>PVGIS</b>	<b>CRESESB</b>	<b>INMET</b>
Janeiro	5,75	6,59	5,95	4,41
Fevereiro	5,6	5,72	6,05	4,65
Março	5,22	6,29	5,81	4,41
Abril	5,06	5,85	5,22	4,57
Maio	5,53	6,13	5,35	5,04
Junho	5,2	5,84	5,31	5,04
Julho	5,7	6,24	5,55	5,35
Agosto	6,14	7,11	6,1	5,54
Setembro	6,63	7,28	6,08	6,01
Outubro	6,73	7,65	6,43	5,94
Novembro	6,45	7,3	6,43	5,55
Dezembro	6,09	7,11	6,18	5,24
Anual	5,84	6,59	5,87	5,15

Fonte: Autor (2024).

#### 4.1.2 Análise dos Indicadores de Desempenho da Usina 01

O Gráfico 1 apresenta a comparação entre os dados de geração simulados e os dados obtidos pelo sistema de monitoramento do inversor SMA, acessados através do Sunny Portal, para a Usina 01.

Gráfico 1 – Comparação entre dados previstos e dados de monitoramento da Usina 01



Fonte: Autor (2024).

A Tabela 4 resume os cinco indicadores estatísticos calculados a partir das fórmulas da seção 2.7, para a Usina 01 aplicados, comparando as estimativas de cada base de dados com os valores reais observados, destacando a variabilidade e as possíveis divergências entre as fontes.

Tabela 3 - Indicadores de Desempenho para a Usina 01

Fonte	RMSE	MAE	r
NASA	0,52	0,38	0,67
PVGIS	1,22	0,9	0,55
CRESESB	1,1	0,73	0,5
INMET	0,52	0,38	0,65

Fonte: Autor (2024).

A base da NASA apresentou menor índice MAE e o maior coeficiente de Pearson de 0,67. Esses valores indicam uma consistência e confiabilidade nos dados fornecidos para a Usina 01, uma vez que os indicadores permanecem dentro de uma faixa relativamente estreita.

O PVGIS, por outro lado, apresentou uma variabilidade mais acentuada em seus indicadores com MAE elevado, sendo 0,9. Esses valores mais extremos sugerem que o PVGIS pode ser menos confiável para a Usina 01 em períodos específicos, possivelmente devido ao uso de modelos históricos e preditivos que podem amplificar as estimativas de irradiação em meses de alta variabilidade climática.

A base do CRESESB também apresenta indicador do MAE elevado em relação as outras bases apresentadas. Esse comportamento sugere que o CRESESB, embora útil em algumas situações, pode introduzir margens de erro consideráveis para a Usina 01, especialmente em meses de maior precipitação ou nuvens densas.

O INMET apresentou um comportamento semelhante ao da NASA, apresentado baixo MAE e coeficiente de Pearson elevado. Esse padrão indica que o INMET, com suas medições locais e atualizadas, oferece dados confiáveis para a Usina 01, capturando as condições atmosféricas sazonais de maneira eficaz.

A análise revela que o NASA por ter menor MAE e elevado a “r”, pode determinar como a fonte de dados mais confiável para a Usina 01, com uma representação precisa da irradiação e do comportamento climático local. O bom desempenho do NASA se deve à alta resolução temporal dos dados fornecidos por satélites, em regiões semiáridas como Irauçuba (Beberibe). Enquanto o PVGIS apresentou desvio acentuado.

## **4.2 Usina 02**

### **4.2.1 Análise dos Dados de Irradiação**

A Tabela 5 apresenta os valores mensais de GHI (Irradiação Global Horizontal) para a Usina 02, obtidos por meio de quatro diferentes fontes de dados: NASA, PVGIS, CRESESB e INMET. Assim como observado para a Usina 01, o comportamento dos dados para a Usina 02 segue um padrão sazonal bem definido.

Diferentemente das observações feitas para a Usina 01, os dados do PVGIS para a Usina 02 não apresentam discrepâncias significativas em relação às demais fontes, mostrando valores bastante próximos, o que sugere uma maior uniformidade entre as bases de dados para sertão central, podendo ser justificado por não ter grandes sombreamento provocado pelas nuvens.

Tabela 4 - Dados de irradiação da Usina 02

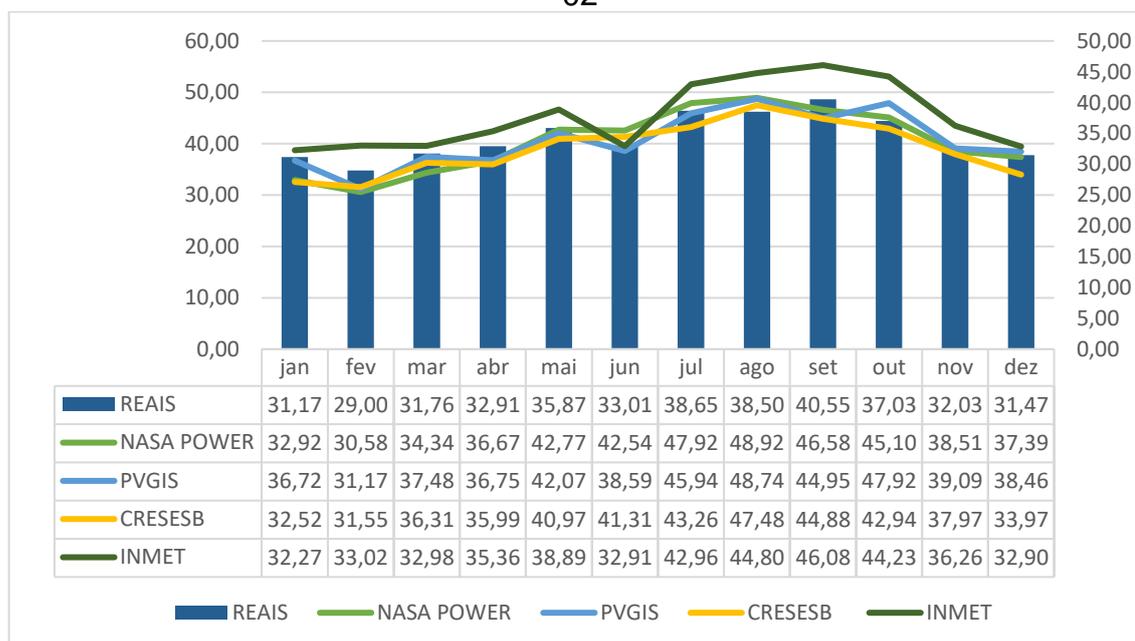
<b>Fonte</b>	<b>NASA</b>	<b>PVGIS</b>	<b>CRESESB</b>	<b>INMET</b>
<b>Janeiro</b>	5,25	5,96	5,22	5,11
<b>Fevereiro</b>	5,09	5,22	5,36	5,49
<b>Março</b>	4,91	5,32	5,24	4,71
<b>Abril</b>	5,04	5,06	4,9	4,88
<b>Mai</b>	5,29	5,17	5,07	4,82
<b>Junho</b>	5,22	4,82	5,09	4,15
<b>Julho</b>	5,79	5,61	5,36	5,25
<b>Agosto</b>	6,29	6,27	6,09	5,72
<b>Setembro</b>	6,88	6,61	6,52	6,71
<b>Outubro</b>	6,76	7,17	6,44	6,57
<b>Novembro</b>	6,48	6,59	6,26	5,96
<b>Dezembro</b>	6,16	6,38	5,63	5,44
<b>Anual</b>	<b>5,76</b>	<b>5,85</b>	<b>5,6</b>	<b>5,4</b>

Fonte: Autor (2024).

#### 4.2.2 Análise dos Indicadores de Desempenho da Usina 02

O Gráfico 2 apresenta a comparação entre os dados de geração simulados e os dados obtidos pelo sistema de monitoramento do inversor SMA, acessados através do Sunny Portal.

Gráfico 2 – Comparação entre dados previstos e dados de monitoramento da Usina 02



Fonte: Autor (2024).

A Tabela 6 resume os cinco indicadores estatísticos calculados a partir das fórmulas da seção 2.7, para a Usina 01 aplicados, comparando as estimativas de cada base de dados com os valores reais observados, destacando a variabilidade e as possíveis divergências entre as fontes.

Tabela 5 - Indicadores de Desempenho para a Usina 02

Fonte	RMSE	MAE	r
NASA	0,23	0,13	0,65
PVGIS	0,57	0,37	0,53
CRESESB	0,15	0,13	0,89
INMET	0,19	0,14	0,88

Fonte: Autor (2024).

Conforme a tabela 6, a base da NASA, com um MAE de 0,13 e um coeficiente de Pearson de 0,65 apresentou desempenho moderado. Esses valores indicam que os dados da NASA conseguem capturar cerca de 25% da variabilidade da irradiação solar real para a Usina 02. Embora esses indicadores sejam relativamente baixos,

precisão dos dados é limitada, não fornecendo a melhor representação das condições de irradiação para a região do sertão central.

O PVGIS apresentou valores mais inconsistentes, o erro quadrático médio (RMSE) de 0,57 e o erro absoluto médio (MAE) de 0,37 refletem um desempenho inferior, com uma confiabilidade reduzida e desvios maiores em relação aos valores observados. O índice de correlação Pearson ( $r$ ) de 0,53, também baixo, corrobora a limitação dos dados do PVGIS para a Usina 02.

Por outro lado, os dados do CRESESB destacam-se com excelente desempenho nos indicadores. O RMSE de 0,15 e o MAE de 0,13 mostram que o CRESESB é bastante eficiente em minimizar os erros de previsão. O índice de correlação Pearson de 0,89 confirma a confiabilidade e a precisão desta base para a Usina 02.

Similar ao CRESESB, o INMET apresenta valores de desempenho elevados, com o RMSE de 0,19 e o MAE de 0,14, ligeiramente superiores aos valores do CRESESB, ainda assim refletem uma alta acurácia, confirmada pelo índice de correlação Pearson ( $r$ ) de 0,88.

### **4.3 Usina 03**

#### **4.3.1 Análise dos Dados de Irradiação**

A Tabela 7 apresenta os valores de GHI fornecidos por quatro fontes de dados analisada na Usina 03. Assim como nas análises das usinas anteriores, observa-se um padrão sazonal característico, com variações mensais na irradiação solar que seguem as mudanças climáticas regionais. No entanto, para a Usina 03, há diferenças mais acentuadas entre as medições de cada base, especialmente em relação aos dados do INMET, que apresentam valores significativamente mais baixos nos meses de maior precipitação (janeiro a junho).

Os dados do PVGIS para a Usina 03 mostram valores consistentemente mais altos, em especial nos meses de agosto (7,08 kWh/m<sup>2</sup>/dia), setembro (7,19 kWh/m<sup>2</sup>/dia) e outubro (7,5 kWh/m<sup>2</sup>/dia), superando as demais fontes e indicando que essa base utiliza modelos históricos e preditivos que podem aumentar as estimativas para esses meses. Esse comportamento pode ser explicado pela metodologia de

modelagem do PVGIS e a grande presença de nuvens por estar próximo de uma região litorânea, que se repete o comportamento com a Usina 01.

Por outro lado, o INMET apresenta os valores mais baixos de irradiação ao longo do ano, especialmente durante os meses de janeiro a junho, com destaque para março (3,91 kWh/m<sup>2</sup>/dia) e abril (3,57 kWh/m<sup>2</sup>/dia).

A NASA, com uma média anual de 5,86 kWh/m<sup>2</sup>/dia, e o CRESESB, com 5,7 kWh/m<sup>2</sup>/dia, apresentam um comportamento mais estável ao longo do ano.

Tabela 6 - Dados de irradiação da Usina 03

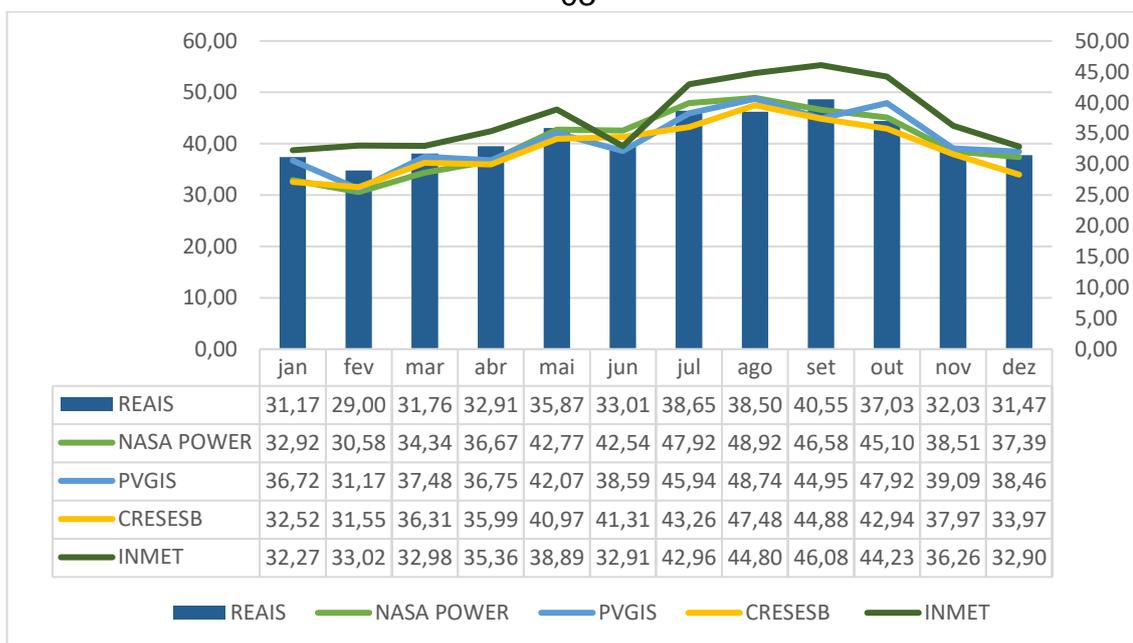
Usina 03				
Fonte	NASA	PVGIS	CRESESB	INMET
Janeiro	5,66	6,36	5,75	4,5
Fevereiro	5,15	5,43	5,77	4,11
Março	5,16	6,01	5,57	3,91
Abril	5,01	5,59	4,86	3,57
Maio	5,41	5,97	5,19	3,89
Junho	5,37	5,79	5,23	3,83
Julho	5,88	6,27	5,45	4,37
Agosto	6,33	7,08	5,89	4,76
Setembro	6,65	7,19	6,05	5,04
Outubro	6,78	7,5	6,3	5,29
Novembro	6,71	7,15	6,34	5,31
Dezembro	6,24	6,97	5,94	4,98
Anual	5,86	6,44	5,7	4,46

Fonte: Autor (2024).

#### 4.3.2 Análise dos Indicadores de Desempenho da Usina 02

O Gráfico 3 apresenta a comparação entre os dados de geração simulados e os dados obtidos pelo sistema de monitoramento do inversor Solis, acessados através do portal SolisCloud.

Gráfico 3 – Comparação entre dados previstos e dados de monitoramento da Usina 03



Fonte: Autor (2024).

A Tabela 8 apresenta os resultados para as fontes NASA, PVGIS, CRESESB e INMET para a Usina 03.

Tabela 7 - Indicadores de Desempenho para a Usina 03

Fonte	RMSE	MAE	r
NASA	0,1	0,6	0,8
PVGIS	0,41	0,45	0,57
CRESESB	0,16	0,13	0,9
INMET	0,18	0,14	0,89

Fonte: Autor (2024).

A análise dos dados da NASA mostra um desempenho notável para a Usina 03. O erro quadrático médio (RMSE) de 0,1 e o erro absoluto médio (MAE) de 0,6 indicam uma boa precisão na estimativa dos dados, com pequenos desvios em relação aos valores reais.

O índice de correlação Pearson (r) de 0,8 também reforça a qualidade e consistência dos dados da NASA, destacando essa base como uma boa escolha para a Usina 03, especialmente para estudos de longo prazo ou para análise de tendência de irradiação solar. Esses resultados indicam que, assim como para a Usina 01, a

NASA se mantém uma fonte confiável e precisa, com alta confiabilidade nos dados fornecidos.

Por outro lado, o PVGIS apresenta um desempenho significativamente inferior, com o RMSE de 0,41 e o MAE de 0,45 indicam que os erros de previsão são consideráveis, com desvios significativos em relação aos valores observados. O índice de correlação Pearson ( $r$ ) de 0,57 também é relativamente baixo, o que reforça a limitação do PVGIS para a todos os sistemas FV analisados.

Já os dados do CRESESB apresentam um desempenho excelente, com RMSE de 0,16 e o MAE de 0,13 refletem uma baixa margem de erro, com uma acurácia notável nas estimativas. O índice de correlação Pearson ( $r$ ) de 0,9 confirma a alta confiabilidade dos dados, tornando o CRESESB uma das fontes mais precisas e recomendadas para a Usina 03.

O INMET, por sua vez, apresentou resultados muito semelhantes aos do CRESESB, com o RMSE de 0,18 e o MAE de 0,14 são ligeiramente superiores aos do CRESESB, mas ainda assim indicam uma precisão bastante alta nas estimativas

## 5 CONCLUSÃO

A análise dos indicadores de desempenho das três usinas proporcionou importantes evidências sobre a precisão e a confiabilidade das diferentes bases de dados de irradiação solar. Para as Usinas 02 e 03, as fontes CRESESB e INMET apresentaram a mais adequada, com coeficientes de Pearson elevados e baixos erros de previsão ( $r$  e MAE), demonstrando alta confiabilidade e consistência nas estimativas. Essas fontes se destacaram por sua capacidade de explicar a maior parte da variabilidade observada, tornando-as as mais recomendadas para o planejamento e análise de sistemas solares.

A NASA apresentou resultados satisfatórios, destacando-se pela alta precisão na Usina 01, com baixos índices de erro. No entanto, os erros foram ligeiramente superiores nas demais usinas, posicionando-a como uma opção válida, embora menos precisas em comparação com as bases de dados do CRESESB e do INMET.

O PVGIS, por outro lado, apresentou os piores resultados em todas as usinas, com coeficientes de Pearson e MAE, além de erros substanciais, indicando que esta fonte é inadequada para estimativas precisas de irradiação solar nos três sistemas FV analisados.

Portanto, para todas as usinas, os dados provenientes do CRESESB e INMET são os mais recomendados, oferecendo a melhor precisão e acurácia. A NASA pode ser uma alternativa viável em alguns casos, enquanto o PVGIS deve ser evitado devido à sua baixa confiabilidade. Esses resultados desempenham um papel essencial na determinação das fontes de dados mais adequadas para projetos de energia solar, assegurando maior confiabilidade e eficiência no desempenho dos sistemas fotovoltaicos.

## REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. **Maior entidade representativa do setor solar fotovoltaico no Brasil**. Disponível em: < <https://www.absolar.org.br/>>. Acesso em: 29 de outubro de 2023.
- ANGELA, Juliana D'; LIMA, Jair. **Energia Fotovoltaica Solar: Princípios Fundamentais**. 1. ed. Curitiba: Atena Editora, 2022.
- ANTUNES JÚNIOR, E.; CASAROLI, D.; ALVES JUNIOR, J.; EVANGELISTA, A. W. Ajuste dos parâmetros da equação de Angström-Prescott na estimativa da radiação global em municípios goianos. In: **Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem**, v.26, Fortaleza, 2017.
- ALVES, F. L., DA SILVA, A. F.; SOUZA, M. S. **Avaliação do desempenho de sistemas fotovoltaicos residenciais no Brasil utilizando o software PVSyst**. Revista Brasileira de Energia Solar, v.12, n.2, p.29-38, 2022.
- AZEVEDO, R. M.; MARTINS, M. P. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Blucher, 2020.
- BAVARESCO, M. R.; SILVA, R. S.; RODRIGUES, A. L.; COSTA, R. H.; ALVES, A. B. **Semicondutores: princípios e aplicações**. 1. ed. Curitiba: Intersaberes, 2017.
- BRITO E SILVA, J. C. de. **A energia solar como solução para a matriz energética brasileira**. Revista Brasileira de Energia Solar, v.12, n.2, p.1-14, 2023.
- CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS. **Atlas Eólico e Solar: Ceará**. Curitiba: Camargo Schubert; Fortaleza: ADECE: FIEC: SEBRAE, 2019.
- CENTRO COMUM DE PESQUISA DA COMISSÃO EUROPEIA. **PVGIS: Sistema de Informação Geográfica Fotovoltaica**. 2023. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>>. Acesso em: 28 de outubro de 2023.
- CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 09 nov. 2024.
- CHOU, M.D.; SUAREZ, M. J. An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models, Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation, Tech. Memo. 104606, v. 3, **Goddard Space Flight Center**, Greenbelt, Md., 1994.
- CHOU, M.D.; SUAREZ, M. J. A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) developed at Goddard Climate and Radiation Branch for Atmospheric Studies, **Goddard Space Flight Center**, Greenbelt, NASA Tech. Memo, V.15, 1999.
- COSTA, E. S.; SOUZA, L. P.; SOUSA, M. S. Análise da geração de energia elétrica de usinas fotovoltaicas no estado do Ceará utilizando o software PVSyst. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v.12, n.2, p.15-28, 2022.

DE BIASIO, A.; CARUSO, G.; D'AMATO, F.; PALMA, F.; D'ANNA, M. F.; LA ROCCA, M.; SPERTINO, L. PVGIS 5: A new web-based tool for photovoltaic assessment. **Solar Energy**, v.190, p.888-904, 2019.

FREITAS, L. C. **Sistemas fotovoltaicos: princípios e aplicações**. São Paulo: Elsevier, 2022.

FREITAS, J. F.; MELLO, A. C. C.; SILVA, R. L.; BAVA, F. C. Monitoramento de sistemas fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 6, n. 1, p. 38-44, 2021.

GODILLOT, Y.; NGHIEM, M.; DUBOIS, T. HelioClim-3: A new satellite-derived solar radiation database for global applications. **Solar Energy**, v.190, p.905-918, 2019.

HARTMANN, R. P. **Potencial técnico de produção de eletricidade por solar PV em Almada e complementaridade entre geração e consumo em edifícios sintéticos de uso misto**. Dissertação. Mestrado em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2018.

HAYKIN, S. **Neural networks: A comprehensive foundation: 2ª ed.** Upper Sanddle River: Prentice Hall, 1998.

HUANG, M.; JIANG, H.; JU, W.; XIAO, Z. Ultraviolet radiation over two lakes in the Middle and lower reaches of the Yangtze River, China: an innovative model for UV estimation. **Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences**, v. 22, n. 5, p. 491-506, 2011.

JACOVIDES, C.P.; TYMVIOS, F.S.; BOLAND, J.; TSITOURI, M. Artificial Neural Network models for estimating daily solar global UV, PAR and broadband radiant fluxes in an eastern Mediterranean site. **Atmospheric Research**. v. 152, p. 138-145, 2015.

LEAL, S. S.; TIBA, C.; PIACENTINI, R. Daily UV radiation modeling with the usage of statistical correlations and artificial neural networks. **Renewable Energy**. v. 36, p. 3337-3344, 2011.

MENDES, H. A. **Integração de dados e modelos de previsão de produção fotovoltaica do Nordeste brasileiro**. 2023. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, PE, 2023.

MESSENGER, R. A. ; VENTRE, J. **Photovoltaic Systems Engineering**. 4a ed. London: Routledge, 2023.

MORAES, E. C. **Parametrização dos processos radiativos em modelo climático simples**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, INPE, São José dos Campos, 2002.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística Básica**. 7. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

NASA Power. 2023. Disponível em: <<https://power.larc.nasa.gov/>>. Acesso em: 28 de outubro de 2023.

OLIVEIRA, C. A.; SILVA, J. P.; LIMA, E. A. Inversores para sistemas fotovoltaicos: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Energia Solar**, 10(2), 215-232, 2021.

OLIVEIRA, T. A.; SOUZA, C. A. M.; ALMEIDA, M. V. S.; SOARES, C. E. C. Monitoramento e controle da temperatura de células fotovoltaicas para otimização da produção de energia elétrica. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v.12, n.4, p.1-12, 2023.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017.  
INMET. **Estações Automáticas**. 2023. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/>>. Acesso em: 28 de outubro de 2023.

PEREIRA, M. A.; OLIVEIRA, A. M.; SILVA, M. L. Desenvolvimento de um sistema de monitoramento para sistemas fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v.11, n.2, p.1-12, 2020.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, CRESEB, 2014.

PORTAL ENERGIA. **Em que consiste um sistema seguidor solar fotovoltaico**. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/em-que-consiste-sistema-seguidor-solar-fotovoltaico/>> Acesso em: 19 nov. 2023.

RUMELHART, D.E.; HINTON G.E.; WILLIAMS, R.J. Learning representations by back-propagation errors. **Nature**, v. 323, p. 533-536, 1986.

SANTOS, E. L.; SILVA, G. G.; OLIVEIRA, R. F. Eficiência de inversores para sistemas fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 6, n. 3, p. 182-191, 2021.

SANTOS, M.A.; PEREIRA, J.A.; SILVA, J.J.; BATISTA, D. S. Rede de estações meteorológicas automáticas do INMET: uma ferramenta para o monitoramento climático no Brasil. **Ciência e Natura**, v.39, n.1, p.127-138, 2017.

SANTOS, H. F. L.; COSTA, P. V. M.; ARAÚJO, M. L. L.; PIRES, F. O. T. S. B.; REGNIER, L. O. Que fonte de dados meteorológicos utilizar no Brasil? Que incerteza esperar? Uma comparação entre diferentes abordagens e variadas fontes de dados. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS)**, 2020.

SILVA, A. M.; GOMES, A. C. Análise do impacto da temperatura na geração de energia elétrica fotovoltaica. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v.12, n.1, p.1-12, 2022.

\_\_\_\_\_. Avaliação da viabilidade técnica e econômica de uma usina fotovoltaica no Brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v.12, n.3, p.1-12, 2023.

SILVA, A. S.; CARVALHO, P. C. M.; PEREIRA, E. B. Fontes de Dados para Avaliação do Potencial Solar no Brasil. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 10, n. 1, p. 34-45, 2021.

SILVA, F. M.; ROCHA, J. J.; FERNANDES, A. B. Avaliação dos dados meteorológicos simulados por diferentes fontes de dados para o Oeste Paulista. **Renewable Energy**, v.162, p.543-554, 2021.

SILVA, W. R.; ALMEIDA, A. F. Simulação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede utilizando o software PVSyst. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v.12, n.2, p.39-48, 2022.

SILVA, A. M.; GOMES, A. C. Uso de bases de dados ambientais para avaliação da viabilidade técnica e econômica de usinas fotovoltaicas. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v.12, n.4, p.1-12, 2023.

SILVA, M. B. P.; ESCOBEDO, J. F.; ROSSI, T. J.; SANTOS, C. M.; SILVA, S. M. G. Desempenho do Modelo Angström-Prescott (AP) e das Técnicas MVS e RNA na Estimativa da Irradiação Solar Global em Botucatu/SP/Brasil. In: **reunión de trabajo de la Asociación Argentina de energías renovables y medio ambiente**, v. 39, Buenos Aires, 2016.

SOARES, C. E. C.; SILVA, P. A. C.; SILVA, J. C. B. E. Dimensionamento e operação de usinas fotovoltaicas: considerações ambientais. **Revista Brasileira de Energia Solar**, 12(2), 1-12, 2022.

\_\_\_\_\_. Bases de dados ambientais para avaliação e planejamento de usinas fotovoltaicas. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v.12, n.4, p.1-12, 2023.

\_\_\_\_\_. Análise da variação da irradiação solar na geração de energia elétrica fotovoltaica. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v.12, n.2, p.1-12, 2022.

SOARES, C. E. C.; SILVA, P. A. C. A energia solar como fonte de energia renovável e sustentável para o Brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v.12, n.1, p.1-12, 2022.

TERAMOTO, E. T. et al. Comparação de Métodos de Estimativa da Radiação Solar Ultravioleta Horária: Modelos Empíricos, Redes Neurais Artificiais e Máquina de Vetores de Suporte. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, 2020.

WANG, F.; ZHEN, Z.; MIA, Z.; SUN, H.; SU, S.; et al. Solar irradiance feature extraction and support vector machines based weather status pattern recognition model for shortterm photovoltaic power forecasting. **Energy and Buildings**, v. 86, p. 427-438, 2015.