



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



ADONIAS ALENCAR DE AZEVEDO NETO

**ANÁLISE DE FONTES DE INCERTEZA NO
LEVANTAMENTO E ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE
GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA**

JOÃO PESSOA - PB
2025

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / N° XX

ADONIAS ALENCAR DE AZEVEDO NETO

**ANÁLISE DE FONTES DE INCERTEZA NO
LEVANTAMENTO E ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE
GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA**

Dissertação de Mestrado apresentada à
Universidade Federal da Paraíba, como parte
das exigências do Programa de Pós-Graduação
em Energias Renováveis, área de concentração
em Energias Renováveis, para a obtenção do
título de Mestre.

Orientador
Prof. Dr. Felipe Vigolvino Lopes

Co-Orientador
Prof. Dr. Raphael Abrahão

**JOÃO PESSOA - PB
2025**

FICHA CATALOGRÁFICA

Catálogo na publicação Seção de Catalogação e Classificação

A994a Azevedo Neto, Adonias Alencar de.

Análise de fontes de incerteza no levantamento e
estimativa da capacidade de geração solar fotovoltaica
/ Adonias Alencar de Azevedo Neto. - João Pessoa, 2025.
113 f. : il.

Orientação: Felipe Vigolvino Lopes.

Coorientação: Raphael Abrahão.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Energia solar fotovoltaica. 2. Bases de dados -
Georreferenciados. 3. Eficiência energética. 4.
Inversores fotovoltaicos. 5. Mudanças climáticas. I.
Lopes, Felipe Vigolvino. II. Abrahão, Raphael. III.
Título.

UFPB/BC

CDU 502.21:523.9(043)

Elaborado por Larissa Silva Oliveira de Mesquita - CRB-15/746

Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis – PPGER

**ANÁLISE DE FONTES DE INCERTEZA NO
LEVANTAMENTO DE CAPACIDADE DE GERAÇÃO
SOLAR FOTOVOLTAICA**

por

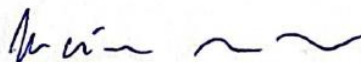
ADONIAS ALENCAR DE AZEVEDO NETO
Dissertação aprovada em 24 de fevereiro de 2025



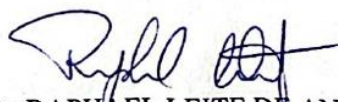
Prof. Dr. FELIPE VIGOLVINO LOPES
Orientador - UFPB



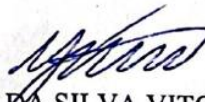
Prof. Dr. RAPHAEL ABRAHÃO
Coorientador – UFPB



Prof. Dr. LUCIANO SALES BARROS
Examinador Interno – UFPB



Prof. Dr. RAPHAEL LEITE DE ANDRADE REIS
Examinador Interno – UFPB



Prof. Dr. FLAVIO DA SILVA VITORINO GOMES
Examinador Externo - UFPB

João Pessoa – PB
2025

DEDICATÓRIA

A DEUS!

E aos meus pais, gratidão por serem a base sólida dos meus sonhos e a inspiração que guia os meus passos...

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, quero dedicar estas primeiras linhas àquela presença que, para mim, vai além do que palavras podem explicar, Deus todo poderoso. Nos momentos em que o cansaço batia à porta ou as incertezas pareciam maiores que eu, foi na força que vem do invisível que encontrei fôlego para seguir. A jornada acadêmica, com seus altos e baixos, me ensinou que perseverança e clareza nas escolhas muitas vezes nascem de um lugar que a razão não entende.

À minha família, pai (Álvaro), mãe (Maria das Graças), Fernanda e Maria Clara (irmãs), não tenho como medir o quanto cada um de vocês moldou essa conquista. Lembro dos diversos dias em que meus pais insistiam para que eu descansasse, enquanto eu revisava textos, das minhas irmãs mandando mensagens só para dizer “você consegue”. Vocês não foram apenas apoio; foram a voz que me lembrava quem eu era quando eu mesmo esquecia. Cada abraço, cada “estamos orgulhosos” no telefone, ficaram guardados aqui, e são parte do que hoje comemoro.

Professores Felipe e Raphael, orientadores desta caminhada, quero agradecer não só pelo que ensinaram, mas como ensinaram. Nas vezes em que eu duvidei se valia a pena insistir numa metodologia ou uma ideia, foram os “vamos tentar de novo” e a maneira como vocês pegaram na minha mão e me ajudaram a caminhar que fizeram toda a diferença. Mais do que mentores, foram parceiros de uma pesquisa que, hoje, carrega a marca do rigor de vocês e da paciência que nem sempre eu tinha comigo.

Ao Centro de Energias Renováveis, meu reconhecimento por ter criado um espaço onde números e gráficos convivem com debates sobre o futuro do planeta. Durante o mestrado, descobri que uma tabela de dados pode esconder histórias de comunidades, de inovação e de falhas que ensinam mais que os acertos. E isso só foi possível porque o programa não se limitou a fórmulas: trouxe pessoas que pensam a energia como algo que alimenta não só máquinas, mas sonhos.

Por fim, se me permitem um último pensamento: que este trabalho não seja apenas uma conquista individual, mas um lembrete de que até os passos mais solitários são sustentados por uma rede invisível de gente que acredita. A todos, meu mais sincero obrigado.

RESUMO

Esta dissertação investiga as fontes de incerteza na estimativa da capacidade de geração de energia solar FV (fotovoltaica) do estado da Paraíba, a partir de dados georreferenciados, falhas de rede ocasionando ocorrências em inversores FV e variações das variáveis climáticas. A pesquisa adota uma abordagem quantitativa, com foco na confiabilidade de diferentes séries de dados meteorológicos, visando compreender como afetam a previsibilidade de geração FV. Foi realizada uma comparação entre as bases geoclimáticas considerando dados de fontes como INMET, NASA-POWER e OPEN-METEO em confronto com dados reais medidos de sistemas instalados na prática. Os resultados mostraram que INMET e NASA-POWER tendem a terem forte correlação com os dados reais medidos, enquanto a OPEN-METEO obteve uma menor correlação. Esse fato evidencia a relevância da escolha de bases meteorológicas que adequadamente refletem a realidade na melhoria das estimativas da capacidade de geração FV. Complementarmente, foi realizado um estudo empírico para checar o impacto das falhas na rede e os seus impactos em inversores FV na eficiência dos sistemas. Dados reais da operação dos inversores em estudo foram analisados, mostrando que os meses com ocorrências apresentaram perda de eficiência na capacidade de geração entre 10,03% e 14,67%, enquanto meses, sem falhas, obtiveram perdas de capacidade de geração de apenas 2,55%. A partir desses dados, foi proposta uma equação que considera a duração da inatividade dos inversores em relação as falhas na rede em sua estimativa da geração FV, proporcionando previsões mais corretas, úteis aos projetistas e integradores de sistemas FV. O impacto das variáveis climáticas na geração FV foi analisado ao longo de uma década, através da variabilidade ao longo do tempo. A análise mostrou que o aumento da temperatura e a diminuição da velocidade do vento impactam negativamente a geração FV. O modelo estatístico mostrou que 65% da variabilidade na capacidade de geração FV podem ser explicadas por essas flutuações, o que ressalta a relevância de considerá-las com mais pertinência nos estudos de viabilidade técnica e econômica. Assim, a dissertação ajuda a compreender as incertezas na previsão da geração FV, oferecendo insumos para otimizar a escolha de bases meteorológicas, reduzir os impactos da inatividade dos inversores devido a falhas na rede e aprimorar metodologias de previsão, favorecendo um planejamento mais eficiente de sistemas FV.

Palavras-Chave: Bases de Dados Georreferenciados; Eficiência Energética; Energia Solar Fotovoltaica; Inversores Fotovoltaicos e Mudanças Climáticas.

ABSTRACT

This dissertation investigates the sources of uncertainty in estimating the photovoltaic (PV) solar energy generation capacity in the state of Paraíba, considering georeferenced data, grid failures causing events in PV inverters, and variations in climatic variables. The research adopts a quantitative approach, focusing on the reliability of different meteorological data series to understand their impact on PV generation predictability. A comparison was conducted among geoclimatic databases, considering data from sources such as INMET, NASA-POWER, and OPEN-METEO, contrasted with real measurements from installed systems. The results showed that INMET and NASA-POWER tend to have a strong correlation with real measured data, while OPEN-METEO exhibited a lower correlation. This finding highlights the importance of selecting meteorological databases that accurately reflect reality to improve PV generation capacity estimates. Additionally, an empirical study was conducted to assess the impact of grid failures and their effects on PV inverters' efficiency. Real operational data from the studied inverters were analyzed, revealing that months with failure occurrences experienced a generation capacity efficiency loss between 10.03% and 14.67%, whereas months without failures had losses of only 2.55%. Based on these findings, an equation was proposed that incorporates inverter downtime due to grid failures into PV generation estimates, enabling more accurate forecasts that benefit system designers and integrators. The impact of climatic variables on PV generation was analyzed over a decade, considering temporal variability. The analysis indicated that increasing temperature and decreasing wind speed negatively affect PV generation. The statistical model demonstrated that 65% of the variability in PV generation capacity could be explained by these fluctuations, emphasizing the importance of incorporating them more rigorously in technical and economic feasibility studies. Thus, this dissertation contributes to understanding uncertainties in PV generation forecasting, providing insights to optimize the selection of meteorological databases, mitigate the impacts of inverter downtime due to grid failures, and refine forecasting methodologies, ultimately supporting more efficient PV system planning.

Keywords: Georeferenced Databases; Energy Efficiency; Photovoltaic Solar Energy; Photovoltaic Inverters; and Climate Change.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Diagrama unifilar representativo do funcionamento de um sistema FV interligado a rede (On-grid).....	27
Figura 2.1 - Distribuição dos tipos de Publicação nos documentos analisados, junto com suas respectivas quantidades e porcentagens.....	37
Figura 2.2 - Distribuição dos Idiomas Dominantes nos Documentos Analisado, juntamente com suas respectivas quantidades e porcentagens.....	37
Figura 2.3 - O desempenho geral da produção científica anual das publicações resultantes da pesquisa realizada na base de dados ao longo do tempo.....	38
Figura 2.4 - Análise da distribuição do número de documentos escritos por autores e sua proporção em uma amostra de pesquisas científicas: uma exploração dos padrões de colaboração e produtividade seguindo a lei de Lotka.....	42
Figura 2.5 - Distribuição da produção científica por países: análise da frequência de publicações em diferentes regiões do mundo.....	43
Figura 2.6 - Resumo das características das bases de dados estudadas, considerando a análise do tipo de acesso e da natureza dos dados que representam bases de dados espaciais e georreferenciados.....	48
Figura 3.1 - Configuração do sistema fotovoltaico analisado, com módulos inclinados a 10° e orientados nas direções oeste e leste na cidade de João Pessoa – PB.....	62
Figura 3.2 - Fluxograma metodológico para análise comparativa de bases de dados FV...	65
Figura 3.3 - Comparação da geração média mensal de energia entre o sistema real e diferentes fontes de geração estimada.....	67
Figura 3.4 - A matriz de correlação apresenta os coeficientes de Pearson que indicam a intensidade e a direção das relações lineares entre os conjuntos de dados analisados: INMET, OPEN-METEO e NASA-POWER, com o Sistema Real como referência.....	68
Figura 3.5 - Gráficos de dispersão entre os dados do sistema real e as bases INMET, OPEN-METEO e NASA-POWER, com os respectivos coeficientes de correlação de Pearson (r). As letras identificam os pares analisados: (A) Sistema Real x INMET, (B) Sistema Real x OPEN-METEO, (C) Sistema Real x NASA-POWER, (D) INMET x OPEN-METEO, (E) INMET x NASA-POWER e (F) OPEN-METEO x NASA-POWER.....	69

Figura 4.1 - Fluxo do processo de análise de falhas em sistemas fotovoltaicos, desde a etapa de coleta de dados até as recomendações de melhoria.....	77
Figura 4.2 - Comparação da geração média mensal de energia solar FV em 2023 entre um caso real, utilizando dados do CRESESB, e um caso estimado, utilizando dados do INMET.....	81
Figura 4.3 - Comparação entre a geração de energia real e estimada para Março de 2023, destacando picos significativos causados por falhas nos inversores.....	82
Figura 4.4 - Comparação entre a geração de energia real e estimada para Junho de 2023, destacando picos significativos causados por falhas nos inversores.....	82
Figura 4.5 - Comparação entre a geração de energia real e estimada para Dezembro de 2023, destacando picos significativos causados por falhas nos inversores.....	83
Figura 4.6 - Análise das perdas e ganhos de eficiência na capacidade de geração solar fotovoltaica do Sistema 2 durante os meses específicos de março, junho e dezembro de 2023.....	88
Figura 5.1 - Representação geográfica de João Pessoa, Paraíba, destacando sua localização e distribuição espacial.....	93
Figura 5.2 - Gráfico da variação das variáveis climáticas ao longo da década de 2013-2023, oferecendo uma visão geral das flutuações climáticas durante o período analisado onde (A) Irradiância (W/m^2), (B) Temperatura ($^{\circ}C$), (C) Umidade Relativa (%), (D) Velocidade do Vento (m/s), (E) Precipitação Corrigida (mm), (F) Irradiância Céu Claro (W/m^2) e (G) Diferença Irradiância (W/m^2).....	98
Figura 5.3 - Evolução anual da irradiância solar (W/m^2) e da temperatura média ($^{\circ}C$) entre os anos de 2013 e 2023.....	100
Figura 5.4 - Comparação entre a geração de energia fotovoltaica e os dados climáticos para o período de 2013-2023 em João Pessoa.....	101
Figura 5.5 - Os valores climáticos de longo período de (A) Irradiação Solar Total (W/m^2), (B) Irradiação Solar Sob Céu Claro (W/m^2), (C) Irradiação Solar Difusa (W/m^2), (D) Temperatura Média ($^{\circ}C$), (E) Umidade Relativa Média (%), (F) Precipitação Total Anual (mm), (G) Velocidade Média do Vento (m/s) para o período (2013-2023).....	102
Figura 5.6 - Regressão linear para a variável dependente Geração de Energia FV ao longo dos anos, com base nas variáveis independentes: (A) Geração FV x Irradiação Solar Total, (B) Geração FV x Irradiação Solar Céu Claro, (C) Geração FV x Irradiação Solar Difusa, ,	

(D) Geração FV x Temperatura, (E) Geração FV x Umidade Relativa, (F) Geração FV x Precipitação Total e (G) Geração FV x Velocidade do Vento..... 104

Figura 5.7 - O gráfico representa a Regressão Linear Múltipla entre a Geração Fotovoltaica Real (kWh) e a Geração Fotovoltaica Predita (kWh) a partir das variáveis climáticas fornecidas..... 104

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Critérios utilizados na busca e seleção de artigos científicos na base de dados Scopus.....	35
Tabela 2.2 - Classificação das principais revistas científicas de energia, sustentabilidade e publicações relacionadas com base na lei de Bradford.....	39
Tabela 2.3 - Contribuição dos autores em termos de artigos científicos publicados e a fração desses artigos que são altamente citados na literatura.	41
Tabela 2.4 - Bases de dados climáticos e energéticos internacionais e nacionais e seus <i>links</i> de acesso.....	49
Tabela 3.1 - Coleta e distribuição das informações meteorológicas utilizadas para a análise de recursos solares e eólicos de cada banco de dados.....	64
Tabela 3.2 - Geração total anual e análise comparativa	66
Tabela 4.1 - Análise de falhas em sistemas fotovoltaicos (INV1 e INV2).....	79
Tabela 5.1 - Coeficientes das variáveis climáticas observadas na Regressão Linear Múltipla para previsão de geração de energia solar fotovoltaica.....	103

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBERS - China-Brazil Earth Resources Satellite
CA - Corrente Alternada
CC - Corrente Contínua
CER - Taxa de Emissão de Carbono
COP26 - Conference of the Parties 26
CRESESB - Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
DOI - Digital Object Identifier
EUA - Estados Unidos da América
EURO-CORDEX - European Coordinated Regional Downscaling Experiment
FV - Conjuntos Fotovoltaicos
FY-4A - Fengyun-4A
GEE - Gases de Efeito Estufa
GIS - Sistemas de Informação Geográfica
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INV - Inversor Fotovoltaico
IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ISO - International Organization for Standardization
ISSN - International Standard Serial Number
MPPT - Maximum Power Point Tracking
NASA - National Aeronautics and Space Administration
NCEI - National Centers for Environmental Information
NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration
NSMC - National Satellite Meteorological Center
NREL - National Renewable Energy Laboratory
ONU - Organização das Nações Unidas

OMM - Organização Meteorológica Mundial

SCOPUS - Base de dados bibliográfica

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SFA - Análise de Fronteira Estocástica

TE - Turbinas Eólicas

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change

Sumário

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO GERAL.....	17
1 INTRODUÇÃO GERAL DA DISSERTAÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	20
1.1.1 Objetivo geral da dissertação	20
1.1.2 Objetivos específicos da dissertação	21
1.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA DISSERTAÇÃO.....	21
1.2.1 Clima no Brasil, no Nordeste e na Paraíba.....	21
1.2.2 Importância da análise espacial na geração de energia solar FV.....	23
1.2.3 Contribuições de bases de dados georreferenciados para estudos de geração solar FV.....	24
1.2.4 Avaliação das incertezas de falhas na rede e o seu impacto nos inversores diante do dimensionamento e projeção de geração de sistemas FV	25
1.2.5 Análises de incertezas das variações de variáveis geoclimáticas em correlação com a estimativa da capacidade de geração FV.....	25
1.2.6 Funcionamento e vulnerabilidades de sistemas FV: Inversores e a influência das condições climáticas na geração de energia.....	26
CAPÍTULO II: O PAPEL DO USO DAS BASES DE DADOS GEORREFERENCIADOS EM ESTUDOS CLIMÁTICOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA E EÓLICA: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA ..	30
2 RESUMO	30
2.1 ABSTRACT	31
2.2 INTRODUÇÃO	32
2.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE AS BASES DE DADOS.....	33
2.4 METODOLOGIA APLICADA NO ESTUDO DAS BASES DE DADOS	34
2.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES DO ESTUDO DAS BASES DE DADOS	36
2.6 CONCLUSÕES	50
CAPÍTULO III: ANÁLISE COMPARATIVA DAS INCERTEZAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: IMPACTO DAS MEDIÇÕES REAIS E DAS BASES DE DADOS METEOROLÓGICOS.....	52
3 RESUMO	52
3.1 ABSTRACT	53

3.2	INTRODUÇÃO	54
3.3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	55
3.3.1	Bancos de dados meteorológicos.....	55
3.4	METODOLOGIA APLICADA NO ESTUDO COMPARATIVO DAS BASES DE DADOS.....	56
3.4.1	Análise de séries temporais nos repositórios de dados históricos utilizando os bancos de dados: INMET, CRESESB, OPEN-METEO e NASA-POWER, para estimativa de capacidade de geração de energia solar FV.....	56
3.4.2	Representação do cálculo simplificado de estimativa de capacidade de geração dos sistemas FV atualmente utilizado no mercado brasileiro.....	56
3.4.3	Representação do cálculo baseado na estimativa ideal de capacidade de geração de energia de um sistema FV com base nos repositórios de dados históricos dos bancos de dados georreferenciados.....	58
3.4.4	Análise da correlação entre estimativas ideais e dados reais observados de capacidade de geração de energia solar FV utilizando o coeficiente de correlação de Pearson.....	60
3.4.5	Descrição do sistema FV e fontes de dados meteorológicos.....	61
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
3.6	CONCLUSÕES	70
CAPÍTULO IV: ANÁLISE RETROSPECTIVA DOS EFEITOS DAS VARIAÇÕES CLIMÁTICAS NA ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA.....		70
4	RESUMO	73
4.1	ABSTRACT	74
4.2	INTRODUÇÃO	75
4.3	METODOLOGIA	76
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
4.5	CONCLUSÕES	87
CAPÍTULO V: ANÁLISE RETROSPECTIVA DOS EFEITOS DAS VARIAÇÕES CLIMÁTICAS NA ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA.....		87
5	RESUMO	90
5.1	ABSTRACT	91

5.2	INTRODUÇÃO	92
5.3	METODOLOGIA EMPREGADA NO ESTUDO DE VARIAÇÕES CLIMÁTICAS	93
5.3.1	Descrição da área analisada.....	93
5.3.2	Aquisição de dados.....	94
5.3.3	Análise dos dados e cálculo de eficiência.....	94
5.3.4	Métodos estatísticos.....	95
5.3.4.1	Regressão linear múltipla.....	95
5.3.4.2	Erro quadrático médio (RMSE), erro médio absoluto (MAE) e coeficiente de determinação (R^2).....	96
5.3.4.3	Teste de Mann-Kendall.....	96
5.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
5.5	CONCLUSÃO	106
6	PUBLICAÇÕES.....	107
7	CONCLUSÕES GERAIS DA DISSERTAÇÃO	107
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA DISSERTAÇÃO	108

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO GERAL DA DISSERTAÇÃO

O crescimento exponencial da população, aliado aos avanços tecnológicos e econômicos, tem impulsionado uma demanda cada vez maior por fontes de energia limpas e sustentáveis. Dessa forma, essas fontes, conhecidas como energias renováveis, têm o propósito de substituir gradativamente os combustíveis fósseis, que são notoriamente responsáveis por significativos impactos ambientais e climáticos.

De acordo com Maka e Alabid (2022), a Conferência sobre Alterações Climáticas, conhecida como COP26, foi realizada pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2021, na cidade de Glasgow, Reino Unido. O evento reuniu representantes de 197 países e estabeleceu um consenso sobre a necessidade de priorizar, com urgência, medidas voltadas para redução da dependência de combustíveis fósseis. Além disso, destacou-se a importância de promover soluções que integrem saúde, equidade e desenvolvimento sustentável no contexto de ações climáticas globais.

Levando em consideração os acordos internacionais, como a Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris, é importante mencionar que eles desempenham um papel fundamental no impulso da luta contra as mudanças climáticas. Esses são compromissos específicos que incentivam a implementação de políticas em vários níveis de governança, facilitando tanto a redução de emissões quanto o fortalecimento das capacidades de relatório de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Gielen *et al.*, 2019).

Segundo Sandén e Azar (2005), o Protocolo de Kyoto, por exemplo, mostrou-se como uma excelente resposta em relação à redução de emissões em algumas nações e no fortalecimento das habilidades essenciais em contabilidade de GEE. Enquanto isso, o Acordo de Paris obteve uma expansão de metas e transparência nas ações climáticas, refletindo a urgência global de mitigar os impactos climáticos. A importância dessas iniciativas é enfatizada no relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), que ressalta a necessidade urgente de reduzir as emissões e promover adaptações para enfrentar os desafios climáticos globais.

De acordo com Jin *et al.* (2015), um sistema de Geração Distribuída (GD), também referido como produção de energia localizada, gera eletricidade por meio de diversas Fontes de Energia Descentralizadas (DERs). Em contraste com a geração centralizada, uma unidade DER pode ser instalada em proximidade ao consumidor final, exemplos comuns de unidades

DER incluem Turbinas Eólicas (TEs), Conjuntos Fotovoltaicos (FVs), células a combustível, microturbinas e motores a diesel, entre outras tecnologias. Com isso, a combinação de unidades TE e FV em um sistema de GD não apenas alivia sobrecargas na transmissão durante os horários de pico, mas também reduz a produção de CO_2 em comparação com outros tipos de fontes.

Em ambientes modernos de Sistemas de Informação Geográfica (GIS), que representam um conjunto de ferramentas e tecnologias utilizadas para capturar, armazenar, processar, analisar e visualizar dados geoespaciais, encontram-se disponibilizados repositórios de dados climáticos georreferenciados de diversas fontes. Neste contexto, a integração desses dados é crucial, sendo tema central de estudos, especialmente em relação a aplicações de alocação de geração. Exemplos comuns incluem GIS autônomos, arquivos brutos de dados geográficos e páginas web relacionada ao GIS (Dimuccio *et al.*, 2011).

Pode-se observar que a disseminação ampla de fontes de informação climática georreferenciadas na Internet, impulsionada por aplicações baseadas em serviços da *Web* e *Grid*, torna a gestão desses sistemas mais complexa. Com isso, a crescente popularidade desses repositórios em sistemas modernos, como *Web*, *Grid* e *P2P*, que são arquiteturas computacionais para o compartilhamento e processamento de dados, e cria oportunidades para estudos futuros e para o avanço industrial de sistemas de banco de dados espaciais.

No entanto, a heterogeneidade entre essas fontes, determinada por diferenças em modelos de dados e formatos, apresenta desafios significativos e compreender o papel e superar os desafios na integração de bases de dados espaciais é crucial para a eficiência e o sucesso dos sistemas modernos de informação climática (Cuzzocrea; Nucita, 2011).

Um dos elementos críticos dos sistemas FV é o inversor em si, que consiste na conversão de Corrente Contínua (DC), produzida pelos módulos FV, em Corrente Alternada (CA), própria para injeção na rede elétrica ou para utilização direta nas instalações. O grande desafio consiste em maximizar a eficiência da conversão de energia, atenuar perdas e garantir a presença da energia gerada em uma qualidade compatível com os requisitos da rede elétrica e da aplicação final (Koutroulis; Blaabjerg, 2012).

Segundo Koutroulis e Blaabjerg (2012), as falhas nos inversores FV são comuns e podem vir a impactar de forma considerável na capacidade de produção de energia e na operação global dos sistemas FV, uma vez que esses defeitos normalmente estão ligados aos componentes internos (capacitores de barramento DC, transistores de porta isolada de bandgap (IGBTs) e ventiladores de resfriamento) que podem prejudicar a eficiência do

inversor, esses problemas no inversor podem causar reduções ou paradas na produção. Além disso, existem custos de manutenção envolvidos com reparos e substituições.

Nesse contexto, compreender o papel dos bancos de dados georreferenciados, a avaliação de incertezas das falhas na rede que impactam nos inversores e incertezas decorrentes de variações climáticas é crucial para tratar da melhoria da estimativa de capacidade de geração FV e como consequência da otimização da eficiência de geração dos sistemas. A variabilidade geoclimática dos recursos solares exige uma abordagem refinada na análise e estimativa da capacidade de geração de energia solar FV, tornando essa pesquisa essencial para preencher essa lacuna e melhorar a confiabilidade das estimativas, considerando incertezas em bases de dados, falhas em componentes e variabilidade climática, contribuindo para a otimização do planejamento e implementação dos sistemas de GD.

Por isso, a dissertação pretende analisar formas de aumentar a confiabilidade e a produtividade dos sistemas FV. Para tanto, o estudo encontra-se organizado em torno de três eixos principais: a seleção e utilização de bases de dados climáticas georreferenciadas; a análise das incertezas associadas a falhas em inversores; e o impacto das variáveis climáticas sobre as estimativas de capacidade de geração de energia. A pesquisa visa adotar uma abordagem na busca de uma contribuição científica e prática aos componentes que possam reduzir incertezas e proporcionar maiores e melhores estratégias de planejamento e operação de sistemas FV.

Tal abordagem, combinando análises comparativas, sugestões de aplicações práticas e reflexões teóricas, se submete ao objetivo de apresentar uma contribuição relevante para o avanço dos sistemas FV. A discussão e resultados encontrados consistem em implicações diretas no tratamento de desafios técnicos e, em última instância, no desenvolvimento da geração de energia mais sustentável e eficiente no setor, destacando a relevância de uma abordagem multidisciplinar e cuidadosa sobre o tema.

1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

1.1.1 Objetivo geral da dissertação

O objetivo principal desta dissertação consiste na investigação de maneira aprofundada sobre o impacto das bases de dados georreferenciadas na estimativa de geração

de energia solar FV, investigando o potencial de geração no estado da Paraíba, com ênfase nas incertezas relacionadas a avaliação dessas bases, impacto das falhas na rede em inversores FV e variações temporais das variáveis climáticas, visando aprimorar a capacidade de previsibilidade e estruturalmente o desempenho dos sistemas FV.

1.1.2 Objetivos específicos da dissertação

Para reproduzir o objetivo geral, os objetivos específicos da dissertação são divididos em:

- Realizar uma revisão bibliométrica sobre o uso de dados geoclimáticos georreferenciados, identificando fontes confiáveis de repositórios de informações, essenciais para estudos climáticos e energéticos;
- Avaliar a relação entre diferentes bases de dados geoclimáticos e dados reais de sistemas de geração FV, destacando a importância da escolha correta dessas bases para estimativas de capacidade de geração mais precisas.
- Estudar as incertezas associadas ao impacto das falhas da rede e o seu impacto em inversores FV, analisar seus efeitos sobre a estimativa de capacidade de geração e propor uma equação para estimar a geração FV considerando a duração das falhas.
- Investigar o impacto das variações temporais das variáveis climáticas na geração de energia FV, utilizando modelagem estatística para avaliar a influência dessas variáveis nas estimativas de capacidade de geração.
- Contribuir para o entendimento das incertezas na geração de energia solar FV, fornecendo esclarecimentos para otimização de sistemas FV e sugerindo metodologias mais robustas para melhorar o planejamento e o desempenho desses sistemas.

1.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA DISSERTAÇÃO

1.2.1 Clima no Brasil, no Nordeste e na Paraíba

De acordo com Pidgeon (2012), com as mudanças climáticas acontecendo em todo o mundo, lidar com o clima está ficando cada vez mais importante para todos, incluindo

governos, e isso está levando a um chamado por ações urgentes para reduzir as emissões de gases que causam o aquecimento global. Ao mesmo tempo, embora saibamos mais sobre como as coisas que fazemos afetam o clima, ainda existem muitas incertezas sobre o que vai acontecer no futuro com diferentes formas de reduzir as emissões e se adaptar às mudanças.

No Brasil, é apresentada uma expressiva diversidade de tipos climáticos, convenientemente moldados por sua extensão territorial, relevo e localização. Essa diversidade climática, que abarca desde o clima equatorial úmido da Amazônia e clima semiárido do Nordeste, pode oferecer diferentes potenciais para aproveitar as fontes de energia renovável, tal como a FV. Nas regiões em torno da linha do equador, como as regiões Norte e parte do Nordeste, a quantidade de radiação solar é particularmente grande, o que possibilita o uso da energia solar FV como opção adequada e eficiente. Porém, mesmo em áreas com menor irradiação solar, como o Sul do Brasil, a tecnologia FV tem se mostrado promissora, por conta dos avanços tecnológicos e da adequação dos sistemas às condições da localidade (Oliveira *et al.*, 2022).

Conforme Lima *et al.* (2022), a região Nordeste do Brasil, destaca-se por sua vastidão territorial e diversidade climática e é tradicionalmente dividida em três climas predominantes: o clima úmido costeiro, abrangendo a costa da Bahia ao Rio Grande do Norte; o clima tropical, presente em áreas dos estados da Bahia, Ceará, Maranhão e Piauí; e o clima tropical semiárido, predominante no interior nordestino. Essa diversidade climática é marcada por duas estações distintas, a chuvosa (março, abril e maio) e a seca (setembro, outubro e novembro), com temperaturas anuais médias variando de 20 a 28 °C.

Com isso, além da riqueza climática, a região Nordeste do Brasil possui um recurso solar excepcional, com uma irradiação global média de aproximadamente 5.9 kWh/m². O estado da Paraíba, situado na região Nordeste do Brasil, abrange uma área de 56.372 km², correspondendo a 0,662% do território nacional e sua localização varia entre os paralelos 6°02'12" e 8°19'18" S, e entre os meridianos de 34°45'54" e 38°45'45" W. Nesta região, verifica-se uma diversidade climática, com características específicas que desempenham um papel crucial na geração de energia solar FV do estado (Francisco *et al.*, 2015).

O estudo de Rigoberto Moreira de Matos e Djail Santos (2015), utilizou a classificação climática de Köppen e Thornthwaite para analisar o clima do estado, considerando variáveis como precipitação, temperatura e os regimes climáticos predominantes. Na Paraíba, são identificados três grupos climáticos principais: úmido, subúmido e semiárido. Vale ressaltar que a importância do clima paraibano vai além da

caracterização geográfica, influenciando positivamente na geração de energias renováveis, como a própria energia solar fotovoltaica. De fato, o estado possui uma incidência solar significativa ao longo do ano, especialmente nas áreas semiáridas, o que o torna uma região promissora para investimentos em usinas FV (Rolim *et al.*, 2007).

O Atlas Solarimétrico da Paraíba (2023) destaca uma grande variedade climática no nordeste brasileiro, especialmente na Paraíba. Este estudo examinou de perto os padrões de chuva e temperatura ao longo do tempo. Elementos como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e os fenômenos *El Niño* e *La Niña* foram essenciais para entender o clima regional. Uma descoberta importante se deu pela identificação de dois tipos diferentes de chuvas, cada um com suas características sazonais distintas. Ao analisar onde chove mais e como as temperaturas variam, foi possível entender melhor as diferenças em diferentes partes da Paraíba, com isso, essas informações são cruciais para o planejamento e a gestão ambiental na região.

1.2.2 Importância da análise espacial na geração de energia solar FV

No contexto da importância da análise espacial da capacidade de geração de energia solar FV, destaca-se a significativa contribuição do estudo de Pietras-Szewczyk (2017). O termo "*solar cadastre*" tem ganho relevância na literatura, referindo-se à delimitação de áreas urbanas com as melhores condições solares, ou seja, é um registro de identificação que delimitam as regiões com potencial de geração de energia solar FV.

O estudo de Pietras-Szewczyk (2017) propõem uma nova forma de criar mapas que mostram como a irradiação solar é distribuída em diferentes lugares, levando em conta a cobertura de nuvens. Eles usam dados meteorológicos acessíveis do Ogimet e destacam a importância de olhar para as nuvens, que são consideravelmente importantes quando se estuda a irradiância solar. A pesquisa também aponta que visualizar melhor algum parâmetro como a qualidade do ar ajuda a tornar os resultados mais próximos da realidade, o que é útil para planejar onde gerar energia solar FV em cidades.

Além disso, Bedewy e Al-Timimy (2023), falam sobre como é importante usar tecnologias de SIG para escolher os melhores lugares para projetos de energia solar FV, levando em conta critérios técnicos, ambientais e econômicos. Também é dito por eles que é importante observar os parâmetros como a irradiância solar, a inclinação do terreno e quanto perto fica das cidades e das estradas principais.

1.2.3 Contribuições de bases de dados georreferenciados para estudos de geração solar FV

Os dados meteorológicos são fundamentais na análise da eficiência de geração de energia e na avaliação da viabilidade de projetos FV. No estudo de Sadio *et al.* (2017), foram utilizadas informações climáticas, como velocidade do vento, temperatura ambiente e irradiância solar, para avaliar a disponibilidade de energia solar em um determinado local. Esses parâmetros climáticos são essenciais para entender o comportamento da geração de energia solar, auxiliando no planejamento e otimização de sistemas FV.

De acordo com Sengupta *et al.* (2021), os dados meteorológicos, como a irradiância solar, estão disponíveis por meio de diferentes provedores que utilizam informações obtidas via satélite. Enquanto algumas fontes oferecem cobertura em escala global, outras são restritas a determinadas regiões. Para tornar as estimativas de recursos solares mais precisas, é essencial considerar uma análise baseada em pelo menos dez anos de registros históricos.

A contribuição das bases de dados georreferenciados para estudos de geração de energia solar FV se destaca no trabalho de Polo *et al.* (2008), o texto ressalta que, embora os dados de irradiância no solo seja o método mais preciso para caracterizar o recurso solar em um local específico, a densidade espacial desses dados muitas vezes é limitada. Partindo desse contexto, a radiação solar derivada de imagens de satélite surge como uma ferramenta valiosa para quantificar a irradiância solar em grandes áreas, proporcionando uma abordagem mais abrangente para estudos de energia solar FV.

O desenvolvimento de algoritmos e modelos, como discutido por Polo *et al.* (2008), representa avanços recentes na forma como estudamos a radiação solar na Terra. Eles usam dados de satélites para entender melhor como a energia solar FV é distribuída e ajudam a melhorar a maneira como a produzimos.

De acordo com Topylko *et al.* (2018), a metodologia para analisar o potencial de energia solar FV baseia-se na relação entre a quantidade de sol direto e a cobertura de nuvens em um local e período específicos. Esse método de análise é útil para pesquisadores e profissionais que trabalham com energias renováveis e dados georreferenciados.

1.2.4 Avaliação das incertezas de falhas na rede e o seu impacto nos inversores diante do dimensionamento e projeção de geração de sistemas FV

Segundo Teodorescu *et al.* (2011), o inversor FV assume função crucial para os sistemas de energia solar interligados à rede na medida em que são eles que transformam a energia elétrica, gerada em DC a partir dos módulos FV, em CA, adequada à tensão utilizada pela rede elétrica. De acordo com as características da planta FV, existem diferentes inversores utilizados, como os inversores integrados ao módulo, que são empregados em plantas extremamente pequenas, os inversores de *string*, que são usados em instalações de menor porte, onde encontram-se módulos conectados em uma única *string*, os inversores *multistring*, que têm serventia para plantas de tamanho médio, inversores mini centrais e centrais, que são empregados em plantas de maior porte, com potência podendo ter variação de 6 kW até mais de 1000 kW. Esses inversores variam também em complexidade, sendo que os inversores centrais são mais robustos e são eles que mais comumente são utilizados em grandes plantas FV, enquanto os de menor capacidade servem sistemas residenciais e comerciais.

Nas infraestruturas de geração de energia renovável, como os sistemas FV, a perda de geração de energia associada a falhas pode conduzir a impactos substanciais. Quando ocorre uma falha, em especial com os inversores, a produção é interrompida ou prejudicada, sendo o retorno financeiro esperado afetado diretamente. Em sistemas FV, por possuírem alta modularidade e variabilidade em termos de tamanho e capacidade, os inversores possuem um papel crucial. As falhas nesses componentes, frequentemente a causa primária das interrupções no funcionamento dos sistemas, podem comprometer a eficiência do sistema, acarretando em perdas financeiras pela energia não gerada e necessidade de reparos, impactando nas previsões de custo e desempenho ao longo do ciclo de vida do sistema FV (Ristow *et al.*, 2008).

1.2.5 Análises de incertezas das variações de variáveis geoclimáticas em correlação com a estimativa da capacidade de geração FV

À medida que a energia solar FV se torna cada vez mais significativa, compreender como a variabilidade espacial e temporal dessa fonte é influenciada pelas mudanças climáticas é de extrema importância. Investigações recentes, como as realizadas por Osman

et al. (2023), sugerem que a geração de energia FV deve aumentar nas próximas décadas, apresentando taxas de produção mais elevadas, mesmo sob diferentes cenários climáticos. Paralelamente, estudos conduzidos por Gil *et al.* (2019) indicam que, embora a irradiância solar global possa se intensificar em algumas regiões, a energia solar FV se revela uma das fontes menos afetadas pelas mudanças climáticas. Entretanto, apesar da tendência predominantemente positiva, existem exceções a serem consideradas. Em certas áreas inicialmente propícias, como algumas regiões tropicais, a produção de energia solar FV pode sofrer uma diminuição devido a alterações nos padrões de nuvens e na radiação solar. Estas observações ressaltam a necessidade urgente de revisar e adaptar políticas energéticas, assegurando que a energia solar continue a ser uma solução sustentável, mesmo frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Conforme apontado por Gernaat *et al.* (2021), muitos estudos realizados até agora se concentram em regiões ou tecnologias específicas, negligenciando as incertezas associadas às mudanças climáticas. Esses trabalhos frequentemente se dedicam a analisar o impacto no potencial energético, sem avaliar as repercussões para os sistemas de energia de maneira integrada. Nesse sentido, torna-se imprescindível a execução de análises abrangentes que considerem o efeito das mudanças climáticas no potencial de energia renovável, levando em conta tanto cenários globais quanto regionais, e utilizando diversos modelos climáticos.

1.2.6 Funcionamento e vulnerabilidades de sistemas FV: Inversores e a influência das condições climáticas na geração de energia

Conforme Pearsall (2017), os sistemas FV convertem a energia da luz solar em eletricidade e podem ser implementados em diferentes escalas. Eles variam desde instalações pequenas, capazes de suprir as necessidades de dispositivos como sensores e iluminação em residências, até projetos de maior porte que injetam energia na rede elétrica. Não distante, a estrutura fundamental do sistema é bastante simples. No seu núcleo, encontra-se a planta FV, composta por módulos que operam em conjunto e tem por função absorver a luz. O balanço de sistema inclui todos os componentes de montagem, suporte, condicionamento e armazenamento de energia, sistemas de monitoramento e dispositivos de segurança que asseguram o funcionamento correto do sistema conforme ilustrado na exemplificação no diagrama da Figura 1.1 a seguir.

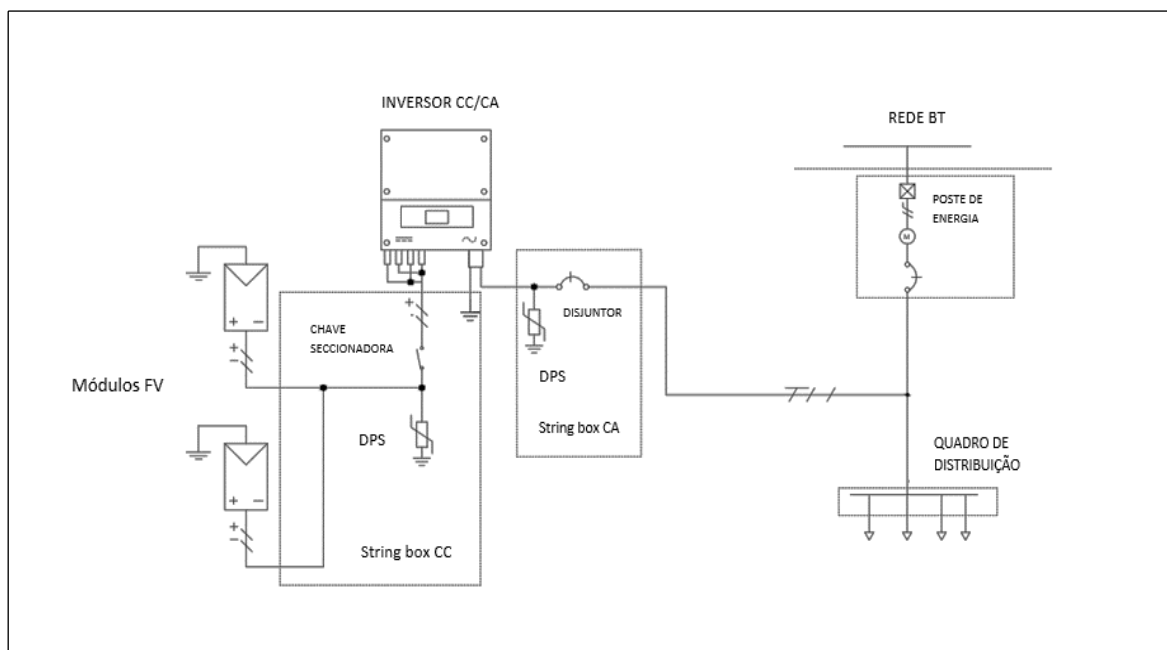


Figura 1.1 – Diagrama unifilar representativo do funcionamento de um sistema FV interligado a rede (On-grid)

Com isso, segundo Eltawil; Zhao (2010), os inversores FV apresentam falhas críticas que impactam sua funcionalidade. Destacam-se a degradação de capacitores por estresse térmico cíclico, erros no Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) devido a falhas sensoriais ou algoritmos imprecisos, e corrosão de componentes internos acelerada por umidade e contaminantes ambientais. O superaquecimento de semicondutores, associado à dissipação térmica inadequada, e danos por surtos elétricos na rede complementam as vulnerabilidades. Essas falhas exigem projetos robustos, seleção adequada de materiais e protocolos de manutenção preventiva para mitigar riscos operacionais.

Portanto, A geração FV enfrenta desafios em relação as variações climáticas, que alteram diretamente seu desempenho. Temperaturas elevadas reduzem a eficiência das células FV, enquanto a irradiação solar irregular e sombreamentos imprevisíveis que são causados por nuvens, poeira ou estruturas próximas, podem gerar flutuações abruptas na produção de energia. Essas incertezas, somadas a falhas técnicas como degradação de componentes ou desgaste precoce de inversores, tornam a energia FV menos estável que fontes tradicionais, exigindo estudos contínuos sobre como mudanças climáticas futuras podem intensificar esses efeitos (Pham *et al.*, 2022).

Além disso, a expansão de sistemas FV em larga escala traz riscos à rede elétrica. A injeção excessiva de energia em horários de alta irradiação pode elevar tensões locais além

dos limites operacionais, comprometendo a qualidade do fornecimento. Essa instabilidade, aliada à natureza intermitente da geração solar FV, demanda soluções inteligentes de armazenamento e gestão de carga para equilibrar oferta e demanda, garantindo segurança ao sistema mesmo em cenários climáticos adversos (Altamimi; Jayaweera, 2017).

CAPÍTULO II

O PAPEL DO USO DAS BASES DE DADOS GEORREFERENCIADOS EM ESTUDOS CLIMÁTICOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA E EÓLICA: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

O PAPEL DO USO DAS BASES DE DADOS GEORREFERENCIADOS EM ESTUDOS CLIMÁTICOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA E EÓLICA: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

2 RESUMO

Este capítulo apresenta uma revisão bibliométrica sobre bases de dados climáticos georreferenciados úteis para estudos de geração de energia solar fotovoltaica e eólica. Esse tipo de banco de dados ganhou rapidamente importância em várias áreas tecnológicas, embasando pesquisas e soluções que requerem o conhecimento de dados climáticos históricos para levantamento da capacidade de geração solar/eólica. Para isso, documentos da literatura foram primeiramente analisados e, em seguida, avaliados estatisticamente em relação aos autores, tópicos e bases de dados utilizadas. A Lei de Bradford e a Lei de Lotka foram aplicadas para identificar as revistas e autores mais relevantes, permitindo a verificação da distribuição geográfica das publicações e autores. Com isso, tornou-se possível identificar os autores e países mais produtivos em estudos climáticos e de geração renovável, tendo como resultado a identificação das bases de dados mais utilizadas nesses trabalhos. Desse modo, como resultados do capítulo, fornece-se uma base sólida para pesquisas futuras e desenvolvimentos tecnológicos nas áreas de geração de energia climática e solar/eólica no que se refere à revisão de bases de dados climáticos georreferenciados que podem auxiliar em tais estudos.

Palavras-Chave: Base de Dados Espaciais; Energia Renovável; Energia Sustentável; Políticas Energéticas e Revisão Bibliométrica.

2.1 ABSTRACT

This chapter originated the article which presents a bibliometric review of georeferenced climate databases useful for studies on solar photovoltaic and wind energy generation. This type of database has rapidly gained importance in various technological fields, supporting research and solutions that require knowledge of historical climate data for assessing solar/wind generation capacity. For this purpose, literature documents were first analyzed and then statistically evaluated in terms of authors, topics, and databases used. Bradford's Law and Lotka's Law were applied to identify the most relevant journals and authors, allowing for the verification of the geographical distribution of publications and authors. Thus, it became possible to identify the most productive authors and countries in climate and renewable generation studies, resulting in the identification of the most used databases in these works. Therefore, as results of the chapter, a solid foundation is provided for future research and technological developments in the areas of climate and solar/wind energy generation regarding the review of georeferenced climate databases that can assist in such studies.

Keywords: Bibliometric Review; Energy Policies; Renewable Energy; Spatial Databases and Sustainable Energy.

2.2 INTRODUÇÃO

À medida que os impactos das mudanças climáticas se intensificam, as iniciativas para impulsionar a aplicação de recursos de energia renovável ganham importância em todo o mundo. Após o Protocolo de Kyoto, que estabelece que os países desenvolvidos devem reduzir as emissões de dióxido de carbono, as investigações sobre questões ambientais e formas sustentáveis de aplicar gerações baseadas em energia solar FV e eólica foram intensificadas, incentivando assim diversas rotas de pesquisas na área de recursos de energia renovável (Bach Gasparin *et al.*, 2022).

No contexto atual, o uso de energia solar fotovoltaica e eólica desempenha um papel importante na redução das emissões de gases de efeito estufa e na conservação dos recursos hídricos. Por exemplo, estudos como os apresentados por Wang e Fan (2021), destacam que a energia solar FV traz benefícios, como a redução do potencial de aquecimento global, a prevenção da acidificação do ecossistema, a minimização da toxicidade humana e a diminuição do consumo de recursos hídricos. Além disso, de acordo com o relatório do IPCC, a análise climática é crucial para as decisões relacionadas à mitigação e adaptação às mudanças climáticas, incluindo o uso de fontes de energia renovável. Portanto, a análise das condições climáticas e sua relação com a energia renovável são relevantes e de grande importância para o desenvolvimento de soluções de geração sustentável.

No contexto mencionado, a importância de estudos sobre condições climáticas associadas a aplicações de geração de energia solar fotovoltaica e eólica é evidente. No entanto, devido à grande diversidade de bancos de dados existentes, selecionar fontes apropriadas de informações sobre condições climáticas é geralmente o primeiro desafio a ser superado por profissionais interessados em trabalhar na área de fontes de geração sustentável e renovável.

Para facilitar estudos e desenvolvimentos que exigem bancos de dados climáticos, neste capítulo, é realizada uma revisão das fontes existentes de informações solares/eólicas e, para isso, realiza-se uma revisão bibliométrica da literatura, por meio da qual se quantificam as publicações acadêmicas na área por meio de técnicas matemáticas e estatísticas que medem sua quantidade e desempenho (Pritchard 1969; Zhang *et al.*, 2015).

Em seguida, são identificados os bancos de dados usados pelos autores mais produtivos em todo o mundo, fornecendo informações úteis, como *links* de acesso e tipo de dados climáticos. Assim, oferece-se um bom ponto de partida para trabalhos sobre geração renovável e sustentável, facilitando a busca por informações sobre condições climáticas georreferenciadas e, conseqüentemente, sobre a capacidade de geração solar fotovoltaica/eólica que seja útil para desenvolvimentos nesta área.

2.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE AS BASES DE DADOS

O contínuo crescimento das fontes renováveis motivou o desenvolvimento de diversas soluções que dependem de aspectos climáticos, entre as quais várias exigem a previsão da geração de energia solar FV e eólica. De fato, antecipar a capacidade de geração de energia renovável em diferentes regiões com climas diversos é crucial para o desenvolvimento de vários tipos de aplicações, destacando-se aquelas focadas no dimensionamento de plantas de geração.

Conforme Mohsin *et al.* (2022), o aumento do consumo de energia resultou inicialmente no aumento da utilização de combustíveis fósseis, que são fontes não renováveis. Por exemplo, carvão, gás natural e petróleo são conhecidos como recursos de energia "marrom" e ainda são amplamente utilizados em todo o mundo, com custos elevados e impactos ambientais significativos. Em contraste, a energia "verde" é gerada a partir de Fontes de Energia Renovável (FER), sendo mais acessível e geralmente amplamente disponível. Essas fontes renováveis apresentam uma taxa de Emissão de Carbono (CER), significativamente menor em comparação com fontes de energia não renováveis, sendo geralmente indicadas para a descarbonização das redes existentes.

O Protocolo de Kyoto, ocorrido em 1997, destacou-se como um marco internacional significativo para abordar a questão urgente do aquecimento global. Então, complementando a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima realizada na Cúpula do Rio de Janeiro em 1992, concentrou-se em restringir e diminuir as emissões globais de gases de efeito estufa no período entre 2008 e 2012. Essencialmente, seu objetivo era garantir que, até o final do referido período, as emissões não ultrapassassem os níveis registrados em 1990. Portanto, para alcançar essa meta, o protocolo preconiza a adoção de uma redução global de emissões de pelo menos 5%, definindo cotas específicas de emissão para cada nação (Moise Tsayem Demaze, 2009).

Ao longo da história, o progresso das economias centradas na agricultura esteve vinculado a solos férteis, recursos hídricos abundantes e intensa exposição solar. Em tais contextos, o conhecimento das condições climáticas também é crucial em diferentes aspectos. Por exemplo, para atender áreas semiáridas, foram feitos investimentos substanciais em tecnologia e sistemas de irrigação com base em dados climáticos, como visto nos casos da Califórnia e Israel (Nobre *et al.*, 2019).

Segundo Šašak *et al.* (2019), o uso de GIS é valioso para avaliar efetivamente os recursos solares em níveis que variam de supranacionais a regionais, o mesmo se aplicando aos recursos eólicos. Definitivamente, o uso de GIS é crucial para lidar com o intrincado processamento de informações espaciais, permitindo integrar fatores climáticos relevantes que podem apoiar uma variedade de aplicações.

Uma vez contextualizada e reconhecida a importância das bases de dados georreferenciados, o estudo proposto neste capítulo tem como objetivo fornecer informações úteis sobre as bases de dados existentes, destacando aquelas mais utilizadas por pesquisadores produtivos ao redor do mundo. Para isso, foi definida uma metodologia de avaliação de documentos científicos, com a listagem das bases de dados ocorrendo em um segundo momento.

2.4 METODOLOGIA APLICADA NO ESTUDO DAS BASES DE DADOS

Para conduzir o estudo proposto, realizou-se uma análise bibliométrica em documentos científicos relacionados às gerações renováveis/sustentáveis e aplicações baseadas em climatologia. A análise bibliométrica é um método de pesquisa que examina as contribuições científicas através de diversos procedimentos, como a análise de publicações em diferentes revistas, países, instituições e autores, investigando o número de citações e a relevância de cada contribuição. Além disso, visa identificar tendências de pesquisa e a evolução de conteúdo específicos ao longo do tempo. De acordo com Liu *et al.* (2011), isso possibilita a identificação de informações úteis sobre fluxos de pesquisa, colaborações entre autores e instituições, e, mais importante para este trabalho, sobre ferramentas utilizadas para obter dados georreferenciados climáticos e de geração solar FV/eólica.

Inicialmente fundamentada em termos relacionados a bancos de dados espaciais georreferenciados e condições climáticas, assim como relacionadas a fontes de energia solar FV e eólica. Para identificar estudos relevantes, o mapeamento da produção científica

considerou trabalhos indexados na base de dados Scopus, conhecida por ser uma fonte abrangente e confiável de informações sobre produção científica (Campoverde-molina *et al.*, 2023)

Na Tabela 2.1, os critérios de busca utilizados são resumidos. Os termos de pesquisa na base de dados Scopus foram definidos como "banco de dados espacial", "análise climática", "energia renovável", "energia solar" e "energia eólica", combinando-os da seguinte forma: "banco de dados espacial OR análise climática OR energia renovável AND energia solar OR energia eólica". Esses critérios foram aplicados com o objetivo de filtrar os resultados de acordo com o objetivo do estudo proposto. Na Tabela 1, exibem-se os critérios de busca utilizados, os quais foram definidos a partir da seleção dos termos em inglês “*spatial database*”, “*climate analysis*”, “*renewable energy*”, “*solar power*” e “*wind power*” na base de dados, sendo aplicado da seguinte forma: “*spatial database OR climate analysis OR renewable energy AND solar power OR wind power*”.

Tabela 2.1 - Critérios utilizados na busca e seleção de artigos científicos na base de dados Scopus.

Critérios de busca	
Tipo de publicação	Artigos; Anais; Revisão; Editorial; Nota; Errata; Capítulo de Livro
Booleano	OR; AND
Abrangência	Título dos artigos; resumo; palavras-chave
Período de cobertura	Sem limitação temporal

Para realizar a análise bibliométrica de maneira confiável, foram adotados princípios fundamentais das leis bibliométricas. O primeiro consiste na Lei de Lotka (1926), que aborda a produtividade dos autores e sua contribuição para o avanço científico em seus respectivos campos de conhecimento, seguindo o princípio do quadrado inverso. Esse princípio elucida uma relação inversa, na qual uma minoria de autores contribui significativamente com mais produções científicas em comparação com a maioria. O segundo princípio é baseado na Lei de Bradford, de 1934, que permite medir a dispersão do conhecimento publicado em revistas científicas sobre um tópico específico (Rodrigues e Godoy, 2016).

Um dos indicadores amplamente utilizados na análise bibliométrica realizada é o índice h, que tem sido uma métrica importante de produção científica em vários campos de pesquisa. O índice h, introduzido por Hirsch (2005), é definido como o número "h" de artigos de um determinado autor que foram citados pelo menos "h" vezes. Com isso, este indicador fornece uma medida objetiva do desempenho dos cientistas, considerando tanto a quantidade quanto a qualidade de suas contribuições (Hirsch; Buela-Casal, 2014).

Em relação aos critérios de busca, vale mencionar que não foram aplicadas limitações temporais, abrangendo a busca desde os primeiros trabalhos do passado até as publicações realizadas até 15 de fevereiro de 2023, quando os resultados foram coletados. Cabe ressaltar que as buscas de interesse foram conduzidas exclusivamente em títulos, resumos e palavras-chave, resultando em documentos relevantes dentro do escopo proposto.

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES DO ESTUDO DAS BASES DE DADOS

Por meio do emprego criterioso das palavras-chave impostas como norteadoras da pesquisa, foram recuperados dados de publicações científicas sem limitação temporal no passado até a data mais recente de uma publicação. As buscas foram realizadas apenas nos títulos, resumos e palavras-chave, resultando em um total de 1.051 documentos relevantes para o escopo proposto.

A análise dos 1.051 documentos listados mostra que o tipo de publicação mais comum no período analisado ocorreu no formato de artigos em periódicos, com um total de 74,5% (783), seguidos por publicações em anais de eventos com 16,7% (176) e em menor escala artigos de revisão e outros tipos de publicações com 8,7% (92) (Figura 2.1). Entre eles, a língua dominante é o inglês com 99,1% (1042), seguido do espanhol com 0,2% (3), francês com 0,1% (2), japonês com 0,1% e chinês com 0,09% (1) (Figura 2.2).

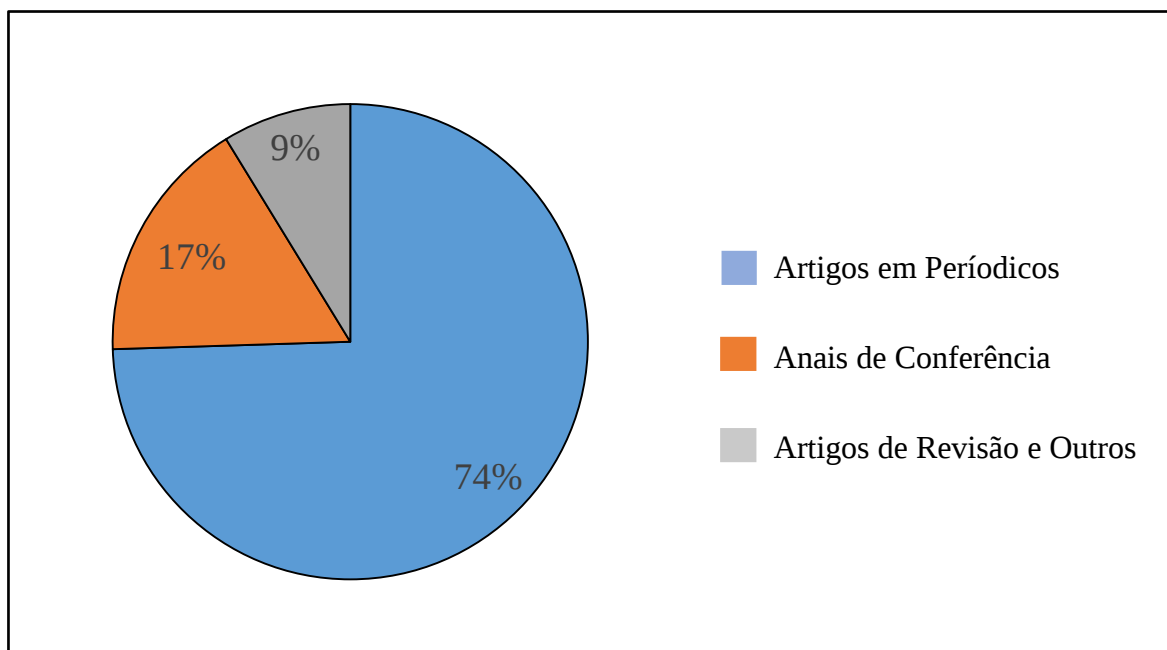


Figura 2.1 - Distribuição dos tipos de publicação nos documentos analisados, junto com suas respectivas quantidades e porcentagens.

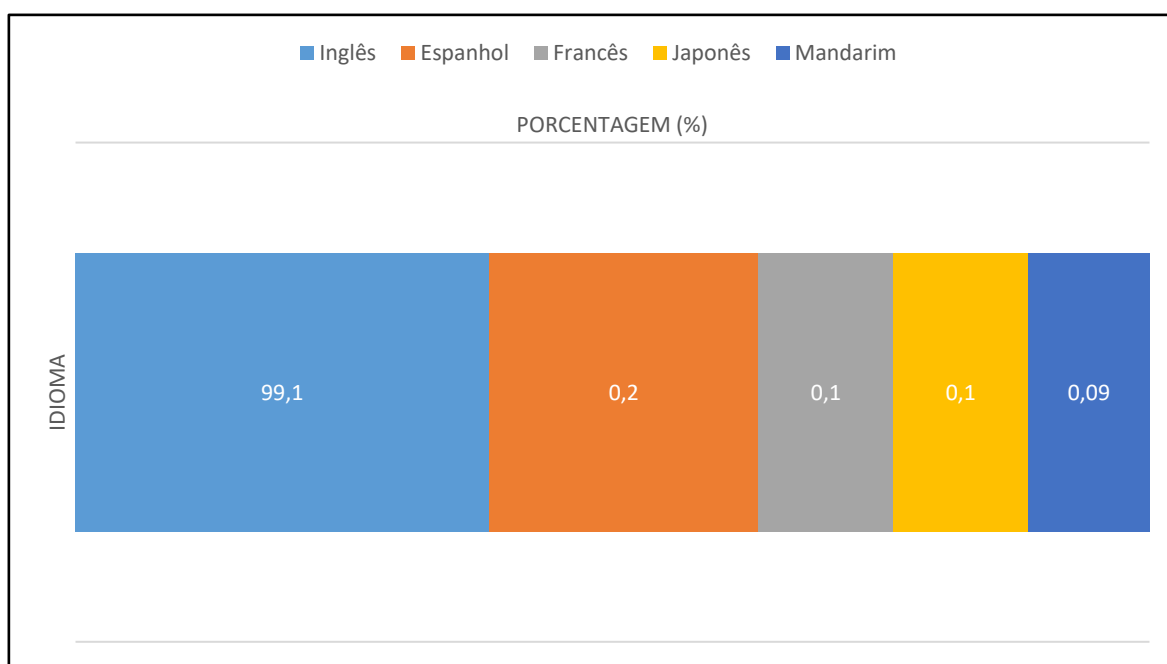


Figura 2.2 - Distribuição dos idiomas dominantes nos documentos analisados, juntamente com suas respectivas quantidades e porcentagens.

Com o objetivo de refinar e delimitar a busca de forma precisa, foi realizada uma etapa subsequente abarcando apenas artigos e considerando seletivamente o idioma de língua inglesa (775 artigos), o que aprimorou a precisão dos resultados obtidos. Com esse critério de exclusão aplicado, considerando o limite temporal mínimo do estudo, observou-se uma mudança significativa e inicialmente, estabeleceu-se o ano de 1977 como ponto de partida para a busca de artigos relevantes. No entanto, devido à aplicação do critério de exclusão, o limite temporal mínimo foi ajustado para abril de 2006, significando que foram incluídos na análise apenas os artigos publicados a partir desse período até fevereiro de 2023.

Apresenta-se, na Figura 2.3, a produção científica anual de artigos ao longo do tempo das 775 publicações de 2006 a 15 de fevereiro de 2023, observando um aumento constante na produção de artigos ao longo do tempo, com algumas variações anuais. Em 2006, foram publicados 2 artigos, seguidos por 3 artigos em 2007 e apenas 1 em 2008. Já a partir de 2009, a produção científica começa a mostrar um crescimento mais significativo, com 3 artigos em 2009, 4 em 2010 e 3 novamente em 2011. Houve um aumento significativo na produção de artigos a partir de 2012, com 15 publicados naquele ano. Esse crescimento continuou nos anos seguintes, atingindo o pico em 2022, com 143 artigos publicados, já até fevereiro de 2023, foram identificados 49 artigos.

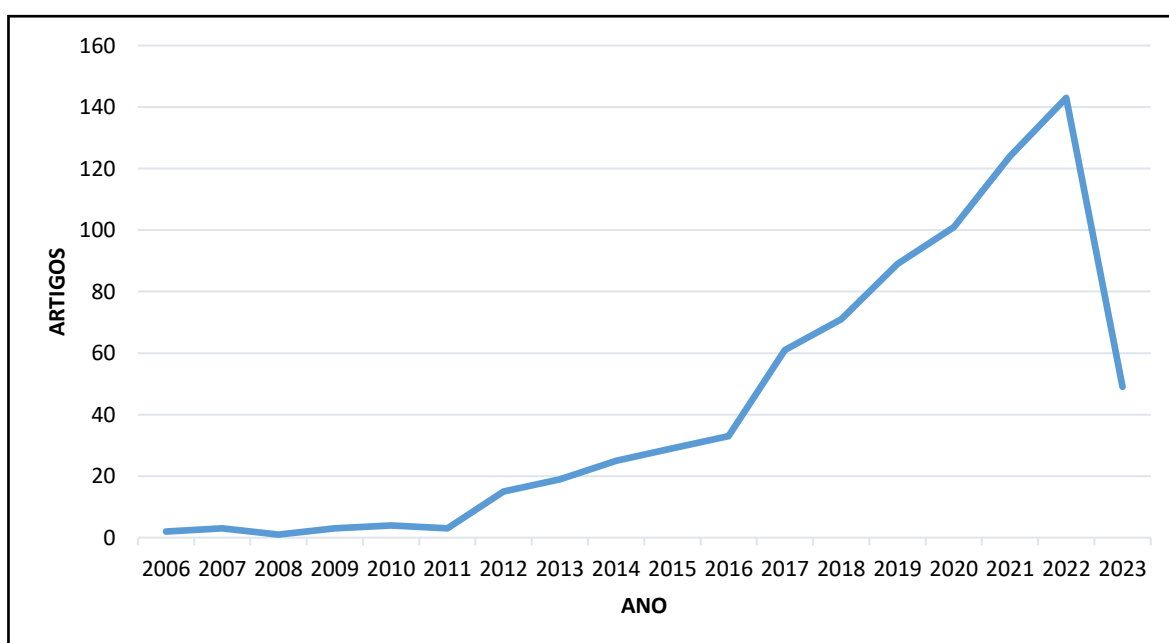


Figura 2.3 - O desempenho geral da produção científica anual das publicações resultantes da pesquisa realizada na base de dados ao longo do tempo.

Esses resultados sugerem um aumento progressivo na produção científica ao longo dos anos analisados, indicando um interesse crescente na área de estudo abordada pela revisão bibliométrica. Essa tendência pode refletir a importância do tema e a relevância das pesquisas relacionadas. É importante ressaltar que esses números são resultado da análise e síntese dos estudos incluídos na revisão bibliométrica, representando uma base sólida para as discussões e conclusões apresentadas neste trabalho.

Conforme discutido por Alvarado (2016), a utilização da Lei de Bradford oferece uma abordagem prática para a seleção de periódicos científicos, visando não apenas aqueles com maior produção, mas também os mais pertinentes para abranger uma área específica de conhecimento. A aplicação dessa lei permite identificar as publicações mais relevantes e significativas dentro de um determinado campo, auxiliando na busca por informações valiosas e atualizadas. Neste contexto, foram apresentados os resultados obtidos por meio da aplicação da Lei de Bradford na análise bibliométrica em questão sobre publicações científicas relacionadas. A Tabela 2.2 resume os principais achados dessa análise, fornecendo informações sobre as revistas mais relevantes na área e sua distribuição nas diferentes zonas determinadas pela Lei de Bradford.

Tabela 2.2 - Classificação das principais revistas científicas de energia, sustentabilidade e publicações relacionadas com base na lei de Bradford.

REVISTA	CLASSIFICAÇÃO	FREQUÊNCIA	FREQ. ACUMULATIVA	ZONA
Energies	1	96	96	Zona 1
Sustainability (Switzerland)	2	50	146	Zona 1
Renewable Energy	3	44	190	Zona 1
Applied Energy	4	37	227	Zona 1
Energy Policy	5	36	263	Zona 1
IEEE Access	6	34	297	Zona 2
Energy	7	32	329	Zona 2
Energy Economics	8	23	352	Zona 2
Environmental Research Letters	9	16	368	Zona 2
Renewable and Sustainable Energy Reviews	10	13	381	Zona 2

Na Tabela 2.2, o ranking de periódicos reflete uma hierarquia derivada de suas frequências de citações inerentes em trabalhos relevantes nas temáticas de energia e sustentabilidade. A coluna "Frequência" refere-se à quantidade de menções atribuídas a cada periódico nas publicações analisadas, enquanto a coluna "Freq. Cumulativa" exhibe a soma acumulada das frequências, ou seja, o total acumulado de citações à medida que se avança na análise dos periódicos. Já a coluna "Zona", por sua vez, categoriza a divisão dos periódicos em estratificações distintas de acordo com a imposição da Lei de Bradford, elucidando sobre quais veículos editoriais oferecem uma contribuição proeminente no contexto da produção científica pertencente ao campo de pesquisa abordado.

De acordo com essa categorização, observa-se que os periódicos na "Zona 1" apresentam as taxas de citação mais significativas. Além disso, publicações alocadas na "Zona 2" também contribuem substancialmente para a pesquisa em andamento na área de conhecimento investigada, embora apresentem frequências de citação menos relevantes.

Ao analisar a Tabela 2.2, torna-se evidente que o periódico "ENERGIES" alcançou a posição mais alta, ocupando o primeiro lugar na lista. Durante a análise bibliométrica, constatou-se que entre os trabalhos identificados na pesquisa, 96 foram publicados neste periódico. Além disso, a frequência acumulada para este periódico foi de 96 citações. De acordo com a Lei de Bradford, o periódico "ENERGIES" foi categorizado como um periódico da "Zona 1", significando seu status como um meio de publicação relevante dentro da academia e com impacto significativo no campo estudado.

Em resumo, os resultados da análise bibliométrica, conforme apresentados na tabela, fornecem uma visão abrangente das revistas científicas mais influentes e relevantes na área de energia, sustentabilidade e renováveis. No âmbito de dados ambientais, a aplicação da Lei de Bradford permitiu a identificação das publicações de maior destaque, classificando-as em diferentes zonas com base em sua frequência de citações. Essas informações são valiosas para pesquisadores, profissionais e tomadores de decisão, pois auxiliam na identificação das principais fontes de conhecimento e na compreensão do cenário científico nesse campo em particular.

Apresenta-se na Tabela 2.3, o número total de publicações e os 10 principais autores com o maior volume de produção científica nos meios de publicação mais relevantes. Com isso, um valor de fator h mais elevado reflete um maior avanço científico do pesquisador, indicando maior relevância e impacto de sua pesquisa.

Os resultados obtidos revelam que o autor Breyer C. possui um total de 11 artigos publicados e um valor elevado de 2,84 para seu impacto fracionado. "Artigos fracionados" referem-se à fração ou proporção dos artigos científicos publicados por um autor que são considerados altamente citados na literatura. Em seguida, Greiner M. aparece com 8 artigos e um valor de impacto fracionado de 1,97, seguido por Wiser R., com 7 artigos e um valor de impacto fracionado de 1,54.

Outros pesquisadores que também se destacam nesse campo incluem Bogdanov D. e Zhang X., ambos com 6 artigos publicados e valores de impacto fracionado de 1,05 e 1,45, respectivamente, além de Andresen G.B., Blakers A., Gils H.C. e Hodge B-M., que possuem 5 artigos publicados cada, com valores de impacto fracionado variando de 0,8 a 1,4.

A partir da aplicação da Lei de Lotka, foi possível compreender a distribuição de autores em relação ao número de documentos publicados. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 2.4, revelando uma relação inversa entre o número de autores e a proporção de autores em cada categoria. De acordo com a Lei de Lotka, é esperado ter autores com uma menor quantidade de publicações e menos autores em categorias de maior produtividade, com publicações mais relevantes. Isso resulta em uma distribuição assimétrica, onde uma minoria de pesquisadores contribui efetivamente para o total de trabalhos publicados no campo.

Tabela 2.3 - Contribuição dos autores em termos de artigos científicos publicados e a fração desses artigos que são altamente citados na literatura.

AUTORES	H-INDEX	ARTIGOS	ARTIGOS FRACIONADOS
BREYER C	59	11	2.84
GREINER M	31	8	1.97
WISER R	40	7	1.54
BOGDANOV D	39	6	1.05
ZHANG X	19	6	1.45
ANDRESEN GB	35	5	1.40
BLAKERS A	37	5	1.23
CALDEIRA K	81	5	0.92
GILS HC	14	5	1.27
HODGE B-M	47	5	0.80

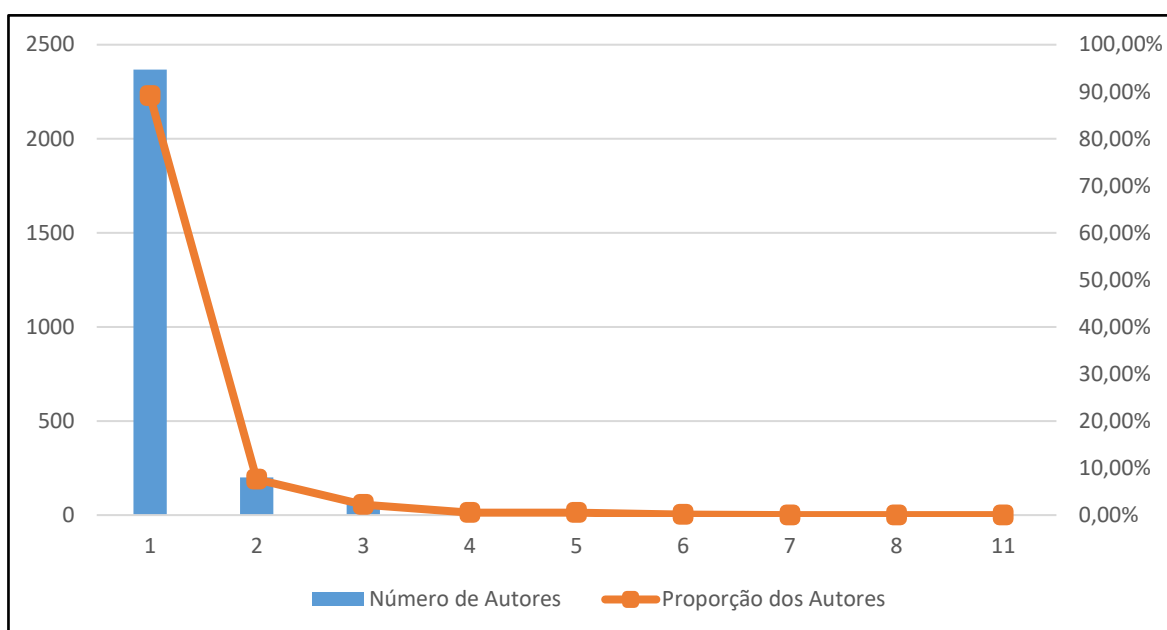


Figura 2.4 - Análise da distribuição do número de documentos escritos por autores e sua proporção em uma amostra de pesquisas científicas: uma exploração dos padrões de colaboração e produtividade seguindo a lei de Lotka.

Observa-se que a categoria de documento único (Documentos Escritos = 1) é a mais predominante, representando 89,1% dos documentos analisados. Isso indica que a maioria dos autores produziram apenas um único documento. No entanto, é interessante observar que há uma crescente relevância com relação à quantidade de documentos escritos e uma diminuição da quantidade de autores. Considerando inicialmente as posições de destaque, a categoria com dois documentos (Documentos Escritos = 2), que passa a iniciar as posições de relevância na distribuição, devido ao fator de que documentos nessa categoria, representam 7,6% do total de trabalhos científicos, ou seja, apenas 7,6% dos autores dispostos como resultante da pesquisa produziram a partir de dois trabalhos científicos. Conforme o número de documentos escritos aumenta, a proporção de autores correspondentes diminui significativamente. Por exemplo, apenas 0,001% dos autores produziram seis documentos científicos (Documentos Escritos = 6).

Esses achados confirmam a conformidade dos dados obtidos da Lei de Lotka, que descreve uma distribuição desigual da produtividade científica. A concentração de autores individuais com alta produtividade é uma característica reconhecida na literatura científica, fazendo com que a análise da produtividade por meio da Lei de Lotka ofereça informações essenciais sobre o cenário da pesquisa e o papel dos autores no cenário científico atual.

Essa abordagem contribui para uma compreensão mais ampla das características no campo de estudo, incluindo padrões de colaboração entre autores, a distribuição do número de autores por documento e a aderência a princípios científicos reconhecidos. Diante dessas conclusões, é oportuno mencionar que a produção científica dos países desempenha um papel fundamental no avanço do conhecimento e na promoção do desenvolvimento científico global. A compreensão da distribuição geográfica e da magnitude dessa produção é essencial para identificar tendências, oportunidades e lacunas na pesquisa científica. Por isso, apresentam-se na Figura 2.5 os resultados de uma revisão bibliométrica que analisou a produção científica de diversos países, evidenciando os que possuem maior número de publicações científicas.

De acordo com os resultados da revisão bibliométrica realizada nesta pesquisa, com base na contagem de publicações encontradas na literatura científica, revela-se que os Estados Unidos (EUA) e a China lideram a produção científica, com 440 e 411 ocorrências, respectivamente. Em seguida, nota-se a Alemanha (202), o Reino Unido (187) e a Índia (155) como os países com maior número de publicações científicas na área do conhecimento em estudo.

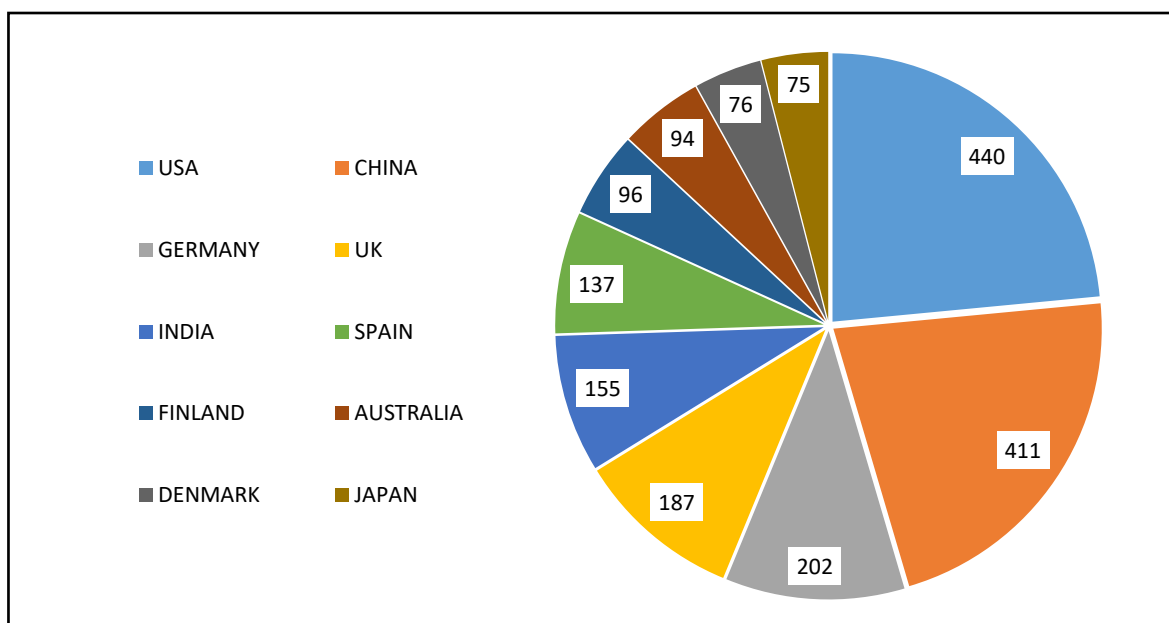


Figura 2.5 - Distribuição da produção científica por países: análise da frequência de publicações em diferentes regiões do mundo.

Esses dados evidenciam o papel central na produção científica global desempenhado por países como os Estados Unidos, China, Alemanha e Reino Unido. No entanto, é importante destacar que outros países emergentes, como a Índia, também estão desempenhando um papel significativo nesse cenário.

Com base no estudo bibliométrico apresentado, cujo objetivo foi obter uma compreensão abrangente das bases de dados espaciais comumente utilizadas por autores considerados relevantes em todo o mundo. As publicações científicas que as mencionam, links de acesso para uma compreensão mais ampla, informações sobre a acessibilidade dessas bases de dados e uma comparação com as principais bases de dados usadas no contexto brasileiro consistem em aspectos também analisados.

Para identificar os principais autores, adotou-se como métrica o valor do fator h especificado na Tabela 2.3. Como fator de afunilamento da pesquisa, os cinco primeiros autores foram selecionados para determinar as bases de dados climáticos georreferenciados mais frequentemente referenciadas na literatura. Das análises realizadas, foi possível identificar os seguintes autores: Breyer, C.; Greiner, M.; Wiser, R.; Bogdanov, D. e Zhang, X.

Inicialmente, foram avaliados os autores Breyer, C. e Bogdanov, D., os quais compartilham coautoria em um artigo intitulado "Radical transformation pathway towards sustainable electricity via evolutionary steps". Nesse artigo, foi identificado o uso de uma base de dados georreferenciados para o desenvolvimento do objetivo do estudo, sendo essa base de dados conhecida como "National Centers for Environmental Information" (NCEI). A base é de acesso livre, podendo o site ser acessado por meio do link: (<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/>). Ressalta-se que o NCEI faz parte da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA) nos Estados Unidos e a citação específica no contexto da pesquisa refere-se a dados e análises climáticas relacionadas ao aquecimento global e às tendências de temperatura global.

No trabalho científico de Greiner M., intitulado "The impact of climate change on a highly renewable and cost-optimized electrical grid in Europe", foi revelado o uso do EURO-CORDEX (<https://euro-cordex.net/>), um recurso de acesso restrito que requer credenciais de login para acessar os dados. O EURO-CORDEX é um projeto de modelagem climática regional que faz parte da iniciativa internacional Experimento de Coordenamento de Descascamento Climático Regional (CORDEX). Com isso, o objetivo principal do EURO-CORDEX é aprimorar a compreensão das mudanças climáticas em escala regional na

Europa, fornecendo projeções climáticas detalhadas e refinadas. O projeto EURO-CORDEX envolve colaboração entre diversos institutos de pesquisa climática e universidades na Europa, ele se concentra em realizar simulações climáticas usando modelos climáticos regionais de alta resolução, o que permite analisar os efeitos das mudanças climáticas em escalas menores, como regiões geográficas específicas ou bacias hidrográficas.

Em seu trabalho científico intitulado "Estimating the value of offshore wind energy along the East Coast of the United States", Wiser, M. identificou que a conclusão proposta do objeto de estudo necessitou do uso da base de dados do Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL), um laboratório de pesquisa dos Estados Unidos que se dedica ao desenvolvimento de tecnologias e soluções relacionadas a energias renováveis e é de acesso livre (<https://nsrdb.nrel.gov/>). Utilizando o "Wind Toolkit" do NREL, que se refere a um conjunto de recursos e dados disponibilizados por essa instituição para análise e avaliação dos recursos e do potencial de energia eólica em diferentes regiões geográficas, o Wind Toolkit do NREL fornece informações detalhadas sobre o vento em várias partes dos Estados Unidos, incluindo dados de velocidade e direção do vento em diferentes alturas, análises de tendências e variações sazonais, entre outros aspectos relevantes para a geração de energia eólica, esses dados são cruciais para avaliar a viabilidade de projetos de energia eólica e para o planejamento de parques eólicos.

Por fim, o autor Zhang, X. em seu trabalho científico intitulado "Ultra-Short-Term Forecasting of Photovoltaic Solar Energy Based on Cloud Displacement Vector Using Multi-Channel Satellite Data and NWP", reconheceu a importância da base de dados do Centro Nacional de Meteorologia por Satélite National Satellite Meteorological Center (NSMC). O NSMC é uma instituição chinesa responsável por operar satélites meteorológicos e fornecer dados e informações meteorológicas por meio de observações via satélite. Também é conhecido como o Centro Nacional para Clima Espacial (National Center for Space Weather), pois monitora as condições no espaço que podem afetar sistemas de comunicação e navegação. Seus dados não estão disponíveis para o público em geral e podem estar sujeitos a restrições e regulamentações. Ainda, ressalta-se que no artigo do autor Zhang, X., são utilizados os dados do satélite FY-4A, que por sua vez é operado pela China como parte do programa Fengyun (FY) de satélites meteorológicos do país. O FY-4A é encontrado no NSMC e desempenha um papel fundamental na geração de dados georreferenciados, uma vez que coleta informações sobre a Terra a partir do espaço. Esses dados podem ser usados para criar e atualizar bases de dados georreferenciadas, alimentando

sistemas GIS e outras aplicações relacionadas.

Ao contextualizar essas descobertas com as principais bases de dados usadas no Brasil, é importante mencionar que o país faz extenso uso dessas bases e mecanismos de coleta de informações georreferenciadas. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), encabeçando a lista, fornece dados muitas vezes de acesso aberto ao público. Isso permite que pesquisadores, estudantes e o público em geral acessem informações demográficas, georreferenciadas e estatísticas sobre o Brasil. Embora a coleta desses dados consista principalmente em pesquisa de campo, suas informações georreferenciadas podem ser usadas em conjunto com dados de satélites, podendo ser acessado no seguinte link: (<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/climatologia/15817-clima.html>).

Além do IBGE, o Brasil conta com uma base de dados especializada em estudos ambientais mantida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (<https://previsaonumerica.cptec.inpe.br/>), onde encontram-se informações sobre clima, vegetação e recursos naturais. O INPE é conhecido por operar satélites de monitoramento da Terra, como o satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS). Os dados específicos fornecidos pelo Instituto são de acesso aberto ao público, sendo produzidos por meio de coletas de informações por satélites e observações de campo (ou seja, são de natureza espacial e geoespacial).

Outra instituição notável é o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (<https://bdmep.inmet.gov.br/>), que é responsável por coletar e disseminar informações meteorológicas no Brasil. O INMET oferece dados sobre temperatura, umidade, precipitação, ventos e outras variáveis meteorológicas, operando uma ampla rede de coleta de dados de campo e satélite por todo o país. Esses dados são coletados em terra, e por satélites, fornecendo informações meteorológicas em tempo real em várias regiões do Brasil.

Uma ferramenta também amplamente utilizada no Brasil para a coleta de dados espaciais sobre condições meteorológicas e climáticas é a Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos (NASA). Apesar de não ser nacional, a NASA fornece dados por meio de satélites e contribui com o acesso aberto ao público para a maioria de suas informações, sendo utilizada como base de dados de pesquisas nacionais. Ela conta com programas e recursos específicos para uma variedade de dados e informações, sendo um desses programas o projeto Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>), gerenciado pela NASA.

Dada a sua importância, no artigo acadêmico intitulado "A new index to evaluate renewable energy potential: A case study on solar, wind, and hybrid generation in Northeast Brazil", a base de dados da NASA foi utilizada para fundamentar a pesquisa, dedicando-se à coleta e disponibilização de dados meteorológicos e climáticos globais, bem como reunindo várias fontes de dados de satélites, de estações meteorológicas terrestres e de modelos climáticos. Os dados abrangem informações sobre temperatura, umidade, radiação global, velocidade dos ventos e outras variáveis meteorológicas.

Em conclusão, mas não menos importante, é crucial considerar no contexto brasileiro o Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB) (<http://www.cresesb.cepel.br/>). O CRESESB dedica-se ao avanço e defesa das energias renováveis, especialmente a solar e eólica. Vale ressaltar que é uma instituição situada dentro do INPE, ativamente envolvida no desenvolvimento de tecnologias e iniciativas relacionadas a fontes de energia limpa.

Este centro desempenha um papel crucial ao fornecer informações acessíveis, projetos e estudos para o público em geral. Uma ampla variedade de pesquisas, relatórios e dados está disponível para acesso e uso público, o que torna o CRESESB uma fonte de dados importante para pesquisas nacionais na área de projetos fotovoltaicos.

A aplicação do CRESESB envolve a utilização de parâmetros georreferenciados para coleta de dados. Esse método possibilita a obtenção de informações espaciais abrangentes, incluindo coordenadas geográficas, mapas e outros dados georreferenciados, auxiliando na compreensão e exploração do potencial de energia solar e eólica em diversas localidades. Além disso, a participação do CRESESB no desenvolvimento e execução de projetos de usinas fotovoltaicas em todo o Brasil tem contribuído significativamente para o avanço das práticas de energia sustentável no país. Por meio de sua *expertise* e ênfase em dados georreferenciados, tem auxiliado na identificação de locais ótimos para a instalação de usinas de energia solar, garantindo maior eficiência e melhor aproveitamento dos recursos de energia renovável.

O OPEN-METEO (<http://OPEN-METEO.com>) é uma plataforma que se propõe a compartilhar dados meteorológicos de forma gratuita e bastante acessível a desenvolvedores e pesquisadores. Mas o que mais se destaca é o seu tipo de fornecimento, em todo o mundo e com potencial amplo, de previsões do tempo, incluindo temperatura, precipitação, vento e outros elementos. Fornecendo uma API que é fácil de implementar, permite que todos, independentemente da localização e da natureza do projeto, acessem dados atuais e de

qualidade de forma gratuita.

Como resultado do estudo bibliométrico realizado, na Figura 2.6 apresentou-se um resumo das características das bases de dados climáticos georreferenciados estudados, com um foco mais conciso nos aspectos mais comumente considerados pelos pesquisadores. Dentre esses aspectos, destacam-se características como: base aberta ou fechada para acesso, dados de campo ou dados satelitais ou ambos.

Com isso, a contextualização entre bancos de dados internacionais e nacionais é essencial para obter uma compreensão abrangente dos desafios e oportunidades enfrentados nos contextos de pesquisa global e local. Assim, essa comparação ajuda a identificar lacunas, beneficiando significativamente pesquisadores iniciantes na área e profissionais interessados em explorar essa projetos e pesquisas no âmbito das energias renováveis.

Bases de Dados	OPEN-METEO	Aberto	Dados de satélite
	CRESESB	Aberto	Dados de satélite
	INPE	Aberto	Dados de campo e satélite
	IBGE	Aberto	Dados de campo
	NSMC	Fechado	Dados de satélite
	NREL	Aberto	Dados de satélite
	EURO-CORDEX	Fechado	Dados de satélite
	NCEI	Aberto	Dados de campo
	INMET	Aberto	Dados de campo e satélite
	NASA-POWER	Aberto	Dados de satélite

Figura 2.6 - Resumo das características das bases de dados estudadas, considerando a análise do tipo de acesso e da natureza dos dados que representam bases de dados espaciais e georreferenciados.

Na análise de recursos para estudos climáticos e energéticos, torna-se essencial mapear as principais bases de dados utilizadas global e nacionalmente. A Tabela 2.4 sintetiza plataformas reconhecidas na literatura, detalhando suas aplicações, acessibilidade e vinculação institucional. Observa-se desde conjuntos abertos, como os disponibilizados pela NASA e IBGE, até sistemas restritos voltados a modelagens regionais específicas, a exemplo do EURO-CORDEX. A comparação entre fontes internacionais e brasileiras revela tanto

sinergias quanto lacunas, oferecendo aos pesquisadores um panorama crítico para orientar escolhas metodológicas em projetos de energia renovável. Organizada por descrição, link e tipo de acesso, a tabela busca facilitar a identificação de recursos adequados a diferentes contextos investigativos.

Tabela 2.4 - Bases de dados climáticos e energéticos internacionais e nacionais e seus *links* de acesso

Base de Dados	Descrição	Link	Acesso
NCEI/NOAA	Dados climáticos históricos e projeções de aquecimento global	https://www.ncei.noaa.gov	Livre
EURO-CORDEX	Modelagens climáticas regionais para Europa	https://euro-cordex.net	Restrito
NREL	Dados de energia eólica nos EUA (velocidade, direção do vento)	https://nsrdb.nrel.gov	Livre
NSMC/FY-4A	Dados meteorológicos via satélite Fengyun (China)	Acesso restrito (não disponível)	Restrito
IBGE	Dados climáticos e georreferenciados do Brasil	https://www.ibge.gov.br	Livre
INPE	Dados ambientais e de satélites (ex: CBERS)	https://previsaonumerica.cptec.inpe.br	Livre
INMET	Dados meteorológicos em tempo real	https://bdmep.inmet.gov.br	Livre
NASA-POWER	Dados globais de energia solar, eólica e climáticos	https://power.larc.nasa.gov	Livre
CRESESB	Recursos para energia solar e eólica no Brasil	http://www.cresesb.cepel.br	Livre
OPEN-METEO	Previsões meteorológicas globais via API	https://open-meteo.com	Livre

2.6 CONCLUSÕES

A revisão bibliométrica cobriu um longo período de pesquisa e análise de dados sobre energia sustentável e políticas energéticas, indicando um crescente interesse nessa área. Encontraram-se revistas importantes e autores relevantes, que ofereceram informações sobre fontes de conhecimento e contribuições científicas nos campos da energia solar fotovoltaica e eólica. Isso mostrou que as abordagens científicas têm se beneficiado de fontes confiáveis e acessíveis de dados climáticos georreferenciados, como o 'National Centers for Environmental Information' (NCEI), EURO-CORDEX e o 'Wind Toolkit' do NREL, cruciais para estudos internacionais. O reconhecimento do banco de dados do National Satellite Meteorological Center (NSMC) em pesquisas georreferenciadas ressalta a importância dos sistemas de informações geográficas para entender completamente os fenômenos climáticos. Por último, foram identificados bancos de dados amplamente utilizados no Brasil, destacando fontes potenciais de informação para pesquisadores iniciantes e profissionais interessados em soluções climáticas, como a geração solar FV e eólica.

Por fim, concluiu-se que as bases de dados georreferenciadas estudadas, devido às particularidades inerentes a cada repositório de informações climáticas, podem variar de uma para outra aplicadas na estimativa de capacidade de geração FV. Diante disso, torna-se importante a realização do estudo efetivamente demonstrado no capítulo 3, para aprofundar a análise comparativa entre essas bases de dados e medições reais. Esse estudo busca verificar o impacto dessas diferenças e avaliar quão críticas elas podem ser no contexto do dimensionamento e desempenho real de sistemas FV, destacando os desafios e as implicações para o planejamento de projetos mais precisos e eficientes.

CAPÍTULO III

ANÁLISE COMPARATIVA DAS INCERTEZAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: IMPACTO DAS MEDIÇÕES REAIS E DAS BASES DE DADOS METEOROLÓGICOS

ANÁLISE COMPARATIVA DAS INCERTEZAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: IMPACTO DAS MEDIÇÕES REAIS E DAS BASES DE DADOS METEOROLÓGICOS

3 RESUMO

O estudo proposto analisa a capacidade de geração de energia de um sistema FV instalado em João Pessoa, PB, utilizando dados históricos de 2023, e compara diferentes fontes para as estimativas meteorológicas. O sistema analisado foi dimensionado a partir de dados meteorológicos do CRESESB, onde o sistema apresentou uma geração média mensal de 1200 kWh, assim, para o aprimoramento da estimativa de precisão da capacidade de geração de energia solar FV, foram integrados dados de quatro bancos de dados meteorológicos: CRESESB, INMET, OPEN-METEO e NASA-POWER, cada um deles com características e com resoluções espaciais distintas. A análise comparativa entre os dados reais do sistema e as estimativas da capacidade de geração FV desses dados, feita utilizando as equações simplificada e ideal, revelou que os dados do INMET e do NASA-POWER apresentaram forte correlação com os valores observados do sistema real, com os coeficientes de correlação de Pearson de 0,978 e 0,982, respectivamente, e as estimativas do OPEN-METEO apresentaram uma correlação negativa de -0,089 em relação ao sistema real, o que mostra a discrepância entre as bases de dados. A utilização conjunta de diferentes fontes de dados meteorológicos conferiu uma análise mais precisa e robusta, o que comprova a importância da utilização em conjunto de dados meteorológicos de diferentes plataformas para melhorar as estimativas das previsões da capacidade de geração de energia solar FV, por isso, o estudo conclui que as bases de dados do INMET e do NASA-POWER foram as mais indicadas para representar o comportamento do sistema real e que a OPEN-METEO requer ajustes metodológicos para garantir maior precisão. Portanto, o uso de fontes de dados adequadas é fundamental para otimizar o desempenho e consequentemente vir a melhorar a eficiência dos sistemas FV, oferecendo um norteamento para projetistas e operadores do setor de energia solar FV.

Palavras-Chave: Bancos de Dados Georreferenciados; Coeficiente de Correlação de Pearson; Energia Solar Fotovoltaica e Estimativa de Geração.

3.1 ABSTRACT

The proposed study analyzes the energy generation capacity of a PV system installed in João Pessoa, PB, using historical data from 2023 and compares different sources for meteorological estimates. The analyzed system was designed based on meteorological data from CRESESB, where it demonstrated an average monthly generation of 1200 kWh. To enhance the accuracy of solar PV energy generation capacity estimates, data from four meteorological databases were integrated: CRESESB, INMET, OPEN-METEO, and NASA-POWER, each with distinct characteristics and spatial resolutions. The comparative analysis between the actual system data and the PV generation capacity estimates from these sources revealed that INMET and NASA-POWER data showed a strong correlation with the observed values of the real system, with Pearson correlation coefficients of 0.978 and 0.982, respectively. In contrast, the OPEN-METEO estimates exhibited a negative correlation of -0.089 with the real system, highlighting the discrepancy between the datasets. The combined use of different meteorological data sources provided a more precise and robust analysis, demonstrating the importance of integrating meteorological data from multiple platforms to improve solar PV generation capacity forecasts. Therefore, the study concludes that the INMET and NASA-POWER databases are the most suitable for representing the real system's behavior, whereas OPEN-METEO requires methodological adjustments to ensure greater accuracy. Thus, selecting appropriate data sources is essential for optimizing performance and ultimately improving the efficiency of PV systems, offering valuable guidance for designers and operators in the solar PV energy sector.

Keywords: Generation Estimation; Georeferenced Databases; Pearson Correlation Coefficient and Solar Photovoltaic Energy.

3.2 INTRODUÇÃO

A energia solar FV abrange uma variedade de tecnologias e configurações de sistemas. A escolha da solução mais adequada depende, entre outros aspectos, da região geográfica, uma vez que o desempenho de um sistema FV é influenciado pela irradiação solar e outros fatores climáticos (Suri *et al.*, 2008).

Segundo Yu *et al.* (2021), a eficiência na geração de energia renovável, especialmente em fontes FV, busca entender e quantificar as diferenças regionais nessa eficiência. Isso envolve identificar impulsionadores específicos e delinear o potencial de desenvolvimento em diversas áreas. Portanto, é importante analisar a capacidade de geração com base nas suas particularidades operacionais, o que destaca a necessidade de compreender o clima nas regiões de interesse, além de outros fatores como presença de nuvens, umidade, poluição atmosférica e composição química do ar. Além disso, é necessário considerar anomalias climáticas para avaliar os impactos no potencial energético local. No contexto da geração FV, a irradiação solar é o fator principal, e estudá-la é essencial para atender às demandas de energia por meio de fontes FV (Rudniak, 2020).

De acordo com Fröhlich (2013), a irradiância solar é importante para muitas aplicações. Um de seus principais aspectos é a constante solar, que varia em torno de 1365 W/m². Esse valor afeta diretamente a quantidade de energia solar que chega à superfície da Terra, sendo crucial para analisar o uso da energia solar FV e para estudos climáticos. Quando a irradiação solar atravessa a atmosfera, ela pode ser direta ou indireta (difusa ou refletida). A soma desses tipos é chamada de radiação solar global, importante para a geração de energia. No entanto, a radiação direta é o elemento mais relevante nesse contexto (Woloszyn *et al.*, 2009).

O objetivo principal deste estudo é avaliar as incertezas associadas ao uso de diferentes repositórios de dados históricos para a previsão de capacidade de geração de energia solar FV, por meio de uma análise comparativa entre medições reais de um sistema e dados obtidos de bases de dados meteorológicos como INMET, CRESESB, OPEN-METEO e NASA-POWER.

3.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.3.1 Bancos de dados meteorológicos

Em complemento às informações já apresentadas no capítulo II é importante e oportuno destacar que os bancos de dados meteorológicos com características espaciais e geográficas são uma base essencial na estimativa do potencial de geração de energia solar FV em diversas localidades. A aplicação de dados meteorológicos permite uma análise mais abrangente, uma vez que várias variáveis são levadas em consideração na previsão, o que aprimora a gestão da energia (Miloca *et al.*, 2015).

Segundo Urraca *et al.* (2017), a utilização de diferentes fontes de dados torna possível a construção de resultados, a procura de padrões, e, como consequência, a maiores análises. Segundo a ISO 9060:1990 (ISO, 1990) e a Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2008), desenvolvedores utilizam um esquema de tríplice classificação para irradiação solar: alta qualidade, média e baixa. Essas qualificações permitem armazenar dados com base em determinados padrões internacionais e aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos.

Neste capítulo, serão comparadas diferentes bases de dados meteorológicos, como os dados fornecidos pelo INMET, CRESESB, a plataforma OPEN-METEO e o projeto NASA-POWER, com o objetivo de analisar as diferenças nas estimativas da capacidade de geração de energia solar FV. O INMET oferece dados meteorológicos históricos e atuais essenciais para modelos geoespaciais e estatísticos, como os modelos bayesianos e aditivos gerais (GAMs), para detectar padrões climáticos (Musah *et al.*, 2022).

O CRESESB, em colaboração com o INMET, utiliza esses dados para aprimorar estudos sobre energias renováveis Pinto *et al.* (2020). A plataforma OPEN-METEO disponibiliza dados meteorológicos de diversos modelos globais, como ICON, GEM Global e Meteo France, facilitando o acesso a informações sobre variáveis climáticas essenciais (Jankauskas *et al.*, 2024).

Por fim, o projeto NASA-POWER fornece dados globais de 30 anos sobre variáveis como temperatura do ar, umidade, velocidade do vento e irradiação solar, que podem ser usados em conjunto com as outras bases para uma análise mais robusta e para aprimorar a previsão da capacidade de geração de energia solar FV, de acordo com Negm *et al.* (2018). Essas bases serão integradas para avaliar a precisão das estimativas e compreender melhor os padrões climáticos que impactam a geração solar FV em diferentes regiões.

3.4 METODOLOGIA APLICADA NO ESTUDO COMPARATIVO DAS BASES DE DADOS

3.4.1 Análise de séries temporais nos repositórios de dados históricos utilizando os bancos de dados: INMET, CRESESB, OPEN-METEO E NASA-POWER, para estimativa de capacidade de geração de energia solar FV.

Nesta fase da pesquisa, adota-se uma abordagem investigativa para analisar séries temporais de dados fornecidos pelos bancos de dados do INMET, CRESESB, OPEN-METEO e NASA-POWER, com o objetivo de estimar a capacidade de geração de energia solar FV. A análise comparativa envolve um sistema real instalado pela empresa SunLumen Engenharia em João Pessoa-PB, que foi dimensionado utilizando o cálculo simplificado amplamente utilizado no mercado FV brasileiro, utilizando dados do CRESESB. O cálculo de estimativa ideal, por outro lado, que faz parte da análise comparativa, leva em consideração a eficiência ideal do sistema, ajustando dados de irradiância e temperatura fornecidos pelos bancos de dados do INMET, OPEN-METEO e NASA-POWER, considerando também no cálculo o coeficiente de temperatura do módulo FV, obtido a partir do *datasheet* do mesmo módulo utilizado no sistema real. O estudo tem como objetivo identificar as variações climáticas e suas implicações na *performance* da capacidade de geração de energia do sistema FV ao longo do tempo.

3.4.2 Representação do cálculo simplificado de estimativa de capacidade de geração dos sistemas FV atualmente utilizado no mercado brasileiro.

Villalva e Gazoli (2012) propuseram um modelo simplificado chamado método da insolação, que estima a energia produzida por um módulo solar com base na quantidade de radiação solar recebida e na eficiência do módulo. Na Equação (1) é mostrado como calcular a energia gerada por cada módulo (E_p) em um mês, levando em conta a capacidade de geração comumente aceita no mercado e uma estimativa de perdas do sistema de 20%.

Pinho e Galdino (2014) sugerem acrescentar um fator adicional a essa equação, chamado de "*Performance Ratio*", que normalmente varia entre 70% e 80%, representando os mesmos 20% estipulados como perdas do sistema FV.

Assim, considerando I_d como a Irradiação Diária e levando em conta a potência de pico (W) do módulo e um período de 30 dias (Equação 1)

$$E_p = \frac{I_d . P_m . N_d}{1000} \quad (1)$$

Sendo:

- I_d (Irradiação Diária): Quantidade de irradiação solar que incide em um módulo solar em um dia medido em kWh/m²/dia;
- P_m (Potência do Módulo): Capacidade máxima de geração de energia do módulo solar, medida em W.
- N_d : Número de dias no mês

Na Equação (2), calcula-se a Quantidade Total de Módulos (QTP) necessários, utilizando o Consumo Mensal Médio e a Energia Gerada por Cada Módulo (E_p).

$$QTP = \frac{CMM}{E_p} \quad (2)$$

Sendo:

- CMM (Consumo Médio Mensal): Quantidade média de energia elétrica consumida em um mês medido em kWh/mês.
- E_p (Energia Gerada por Cada Módulo): Energia produzida por um módulo solar em um mês medido em kWh/mês.

A terceira fase envolve a Correção da Quantidade Total de Módulos (QTPC) na Equação (3), ajustando a QTP para considerar as Perdas Estimadas do Sistema (PES), estabelecidas em 20%.

$$QTPC = QTP . (100\% + PES) \quad (3)$$

Sendo:

- *QTP* (Quantidade Total de Módulos): Número de módulos solares necessários sem considerar as perdas do sistema;
- *PES* (Perdas Estimadas do Sistema): Porcentagem que representa as perdas típicas de um sistema FV, geralmente estabelecida em 20%.

Por fim, calcula-se a Potência Total do Sistema (PTS), multiplicando a Quantidade Total de Painéis Corrigidos (QTPC) pela Potência do Pannel, (Equação 4).

$$PTS = QTPC \cdot Pm \quad (4)$$

Sendo:

- *QTPC* (Quantidade Total de Módulos Corrigido): Número de módulos solares considerando as perdas estimadas do sistema;
- *Pm* (Potência do Módulo): Capacidade máxima de geração de energia de um módulo solar, medida em Wp.

Nota-se que a utilização desse método parte de uma abordagem mais simplificada, não considerando fatores como o cálculo de eficiência do sistema e o coeficiente de temperatura do módulo, tornando-o menos preciso.

3.4.3 Representação do cálculo baseado na estimativa ideal de capacidade de geração de energia de um sistema FV com base nos repositórios de dados históricos dos bancos de dados georreferenciados.

Nesta etapa, a pesquisa utiliza dados do INMET, OPEN-METEO e NASA-POWER para realizar cálculos que aprimoram a estimativa ideal de capacidade de geração FV. O modelo considera ajustes na eficiência ideal do sistema com base em variações de irradiância

e temperatura. A equação emprega um coeficiente de temperatura de -0,35, conforme especificado no *datasheet* do módulo. Além disso, considera a temperatura de referência de 25 °C (condições STC), incluindo perdas de fabricação e instalação. Esse método reflete a influência de fatores climáticos locais, fornecendo estimativas mais precisas.

A Equação (5), descreve como a eficiência do sistema é ajustada em relação à variação da temperatura média local, com relação à temperatura de referência (25°C) considerada uma temperatura em condições de teste (STC) fornecida pelo fabricante, levando em consideração o coeficiente de temperatura (CT) de -0.35. Geralmente, o coeficiente de temperatura é fornecido no *datasheet* dos módulos FV, com isso, o mesmo foi incluso na equação para incorporar a influência da variação da temperatura, bem como para contemplar as perdas relacionadas à fabricação e instalação dos módulos, entre outros fenômenos, como destacado por (Crook *et al.*, 2011).

Para o estudo de caso com base em simulações, foi adotado o coeficiente de temperatura de um módulo FV com potência nominal entre 530 W e 555 W. A marca foi omitida por questões de segurança, mas o módulo utilizado é comumente empregado nesse tipo de análise devido às suas características técnicas amplamente reconhecidas no mercado, sendo o mesmo módulo também empregado na instalação do sistema real.

Assim, considerando T_M como a temperatura média local, temos:

$$N_{real} = 1 + \gamma \cdot (T_M - 25) \quad (5)$$

Sendo:

- N_{real} : Eficiência do sistema FV;
- γ : Coeficiente de temperatura do módulo, fornecido no *datasheet*;
- T_M : Temperatura média local durante o período de análise.

A eficiência real do sistema FV é influenciada pela temperatura de operação dos módulos, que depende da temperatura ambiente, da irradiação solar e das características térmicas do módulo. Quando a temperatura de operação do módulo está próxima de 25°C, referência padrão para testes pelos fabricantes, o impacto na eficiência é menor. Desvios dessa referência exigem ajustes proporcionais. Essa sensibilidade às variações de

temperatura, relacionam tensão e corrente com as mudanças de temperatura e irradiação, com base nos dados do *datasheet* do módulo (Crook *et al.*, 2011).

A Equação (6) quantifica a estimativa ideal da capacidade mensal de geração de energia FV (Ep) considerando a irradiação solar (Id) e a eficiência real do sistema (ER). O valor de Id é calculado a partir dos dados de irradiância fornecidos pelos bancos de dados OPEN-METEO, INMET e NASA-POWER. Além disso, a eficiência ideal do sistema é ajustada conforme a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), também proveniente dessas fontes. Essa metodologia assegura maior precisão, ao integrar variáveis climáticas locais para avaliar o desempenho do sistema (Duffie; Beckman, 2013; Sawadogo *et al.*, 2020).

$$Ep = Id \cdot PT \cdot Nreal \quad (6)$$

Sendo:

- Ep : Energia gerada por cada módulo (kWh/mês)
- Id : Irradiação solar (kWh/m²/dia)
- PT : Potência total do sistema (kWp)
- $Nreal$: Eficiência real do sistema

3.4.4 Análise da correlação entre estimativas ideais e dados reais observados de capacidade de geração de energia solar FV utilizando o coeficiente de correlação de Pearson.

A correlação entre os dados ideais calculados e os dados reais obtidos foi realizada usando o coeficiente de correlação de Pearson. Este método tem se mostrado útil na literatura, indicando que é uma competente ferramenta que quantifica a intensidade e o caráter da dependência linear entre duas amostras quantitativas. A Equação (7) é utilizada para a determinação do coeficiente de correlação (r) (Cohen, 2013).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (7)$$

Sendo:

- X_i e Y_i : Representam os valores individuais de cada conjunto de dados;

- $\bar{X}$ e $\bar{Y}$: Médias dos conjuntos x e y, respectivamente;
- n : corresponde ao número de observações nos conjuntos analisados.

Os cálculos foram feitos utilizando o conjunto de dados de referência, que foi extraído da observação do sistema real, comparando com os seguintes conjuntos: as estimativas que foram feitas de acordo com o INMET, estimativas feitas com a plataforma OPEN-METEO, e as estimativas com os dados obtidos do sistema NASA-POWER.

Os valores de (r) variam de -1 a 1 , e se os valores estão próximos de 1 , a indicação é que existe forte correlação positiva, isso denota que as diferenças entre os próprios conjuntos andam na mesma direção. Valores próximos de -1 indicam uma forte correlação negativa a uma relação inversa entre os conjuntos. Valores que se aproximam de 0 demonstram a ausência de uma correlação estatística entre os dados que foram analisados para os parâmetros em questão.

Após o cálculo do coeficiente de correlação para cada par de conjuntos de dados, os resultados foram analisados para identificar padrões de similaridade ou divergência entre as estimativas e os valores observados. Esses resultados forneceram informações para avaliar a precisão dos modelos utilizados nas plataformas OPEN-METEO, NASA-POWER e INMET em comparação com o sistema real.

3.4.5 Descrição do sistema FV e fontes de dados meteorológicos

O estudo comparativo proposto incluiu a identificação das diferenças entre a geração estimada pelo cálculo simplificado, que utiliza dados convencionais do CRESESB, e estimativas mais detalhadas baseadas nos bancos de dados meteorológicos do INMET, OPEN-METEO e NASA-POWER, considerados como estimativa ideal.

O sistema FV analisado, localizado em João Pessoa - PB, é um sistema real e foi utilizado como sistema de base para o estudo. Os dados históricos de geração desse sistema, são referentes ao ano de 2023, e foram analisados mensalmente. Composto por 16 módulos, o sistema apresenta uma geração média de 1200 kWh/mês. Os módulos estão instalados com uma inclinação de 10° , conforme recomendado para a região, e posicionados em direções opostas, oeste e leste, para otimizar a captação da radiação solar ao longo do dia, Figura 3.1.



Figura 3.2 - Configuração do sistema fotovoltaico analisado, com módulos inclinados a 10° e orientados nas direções oeste e leste na cidade de João Pessoa – PB.

A análise dos dados de capacidade de geração de energia solar FV foi enriquecida pela utilização de diferentes fontes de dados meteorológicos, já mencionados. Para aprimorar a precisão das estimativas de capacidade de geração do sistema FV em questão, foram integrados dados de repositórios. Cada uma dessas bases de dados meteorológicos oferece características distintas que contribuem para uma visão mais completa e detalhada do comportamento do sistema FV, levando em consideração as variações climáticas e as condições ambientais locais.

No Brasil, o INMET, áreas urbanas, é responsável por mais de 750 estações meteorológicas que estão posicionadas nas suas 6 divisões de meteorologia, que abrangem todo o país. Segundo o INMET, a previsão é baseada em parâmetros atmosféricos, como precipitação, ventos, umidade relativa e pressão atmosférica, observações meteorológicas, modelos numéricos de previsão, imagens de satélite e radares meteorológicos.

Por outro lado, o OPEN-METEO se destaca por uma abordagem baseada em modelos climáticos globais, utilizando dados que são provenientes de satélites principalmente. Embora sua resolução espacial possa ser mais ampla, variando de 11 km^2 para previsões globais a 1 km^2 para modelos de previsões de clima local, sua capacidade de fornecer dados de alta qualidade para regiões remotas e de difícil acesso torna-o uma ferramenta valiosa para complementar os dados de estações fixas. A flexibilidade da plataforma permite

simulações precisas para qualquer ponto geográfico, independentemente da presença de estações meteorológicas locais. Já o NASA-POWER, desenvolvido pela NASA, é uma das fontes mais confiáveis de dados globais de irradiância solar, proveniente de satélites e modelos de previsão climática. Com uma resolução espacial de cerca de $0,5^\circ$ de latitude x $0,625^\circ$ de longitude, o NASA-POWER tende a oferecer uma excelente cobertura para facilitar análises em grande escala e é particularmente útil em locais onde as estações meteorológicas convencionais estão escassas.

Por fim, o CRESESB, com sua base de dados voltada para a energia solar e eólica, pode utilizar informações de mais de 200 estações meteorológicas espalhadas pelo território Brasileiro. A resolução espacial dessas estações pode variar, mas geralmente permite uma visão detalhada das condições climáticas nas principais regiões produtoras de energia solar FV do país. Esse repositório se torna especialmente relevante para análises focadas no contexto brasileiro, sendo bastante utilizada no dimensionamento de projetos FV, principalmente considerando as GDs.

A combinação desses dados de diferentes fontes permitiu uma análise mais precisa da capacidade de geração do sistema FV instalado tomado como estudo de base, ao comparar os resultados obtidos a partir do cálculo simplificado, utilizando os dados convencionais do CRESESB, com as estimativas mais detalhadas baseadas nos bancos de dados georreferenciados do INMET, OPEN-METEO e NASA-POWER.

As diferentes bases de dados utilizadas desempenham papéis complementares, cada uma com suas características e limitações, conforme apresentado na Tabela 3.1. A combinação dessas fontes permite uma visão abrangente e robusta do potencial de geração FV. A integração de dados meteorológicos de fontes diversas é essencial para a melhoria da precisão nas estimativas de geração de energia FV, importante para projetistas e operadores de sistemas FV que buscam otimizar o desempenho e a eficiência de suas instalações.

Tabela 3.1 - Coleta e distribuição das informações meteorológicas utilizadas para a análise de recursos solares e eólicos de cada banco de dados.

Banco de Dados	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Quantidade de Estações	Áreas de Atuação
CRESESB	100 km ² (Aproximadamente)	Mensal e Diárias	~ 200	Brasil
INMET	1 km ² a 5 km ² (Em áreas urbanas)	Horária a Mensal	~ 750	Brasil
OPEN-METEO	1 km ² (Local) 11 km ² (Global)	Horária a Mensal	Independente	Global
NASA-POWER	~ 100 km ² (1° de lat/long)	Diária, Mensal	Independente	Global

Portanto, o objetivo da abordagem como um contexto geral, consiste na identificação de padrões de similaridade ou divergência entre os dados do sistema real de geração de energia mensal e as estimativas geradas pelos bancos de dados INMET, OPEN-METEO e NASA-POWER. A análise estatística foi conduzida considerando os valores do sistema real como referência, de forma a compreender a precisão e a confiabilidade das plataformas em replicar o comportamento medido no sistema real.

O estudo adota uma metodologia estruturada em cinco etapas interligadas para comparar estimativas de geração de energia solar FV entre bases de dados georreferenciadas e um sistema real. A Figura 3.2 ilustra o fluxo metodológico, iniciando pela coleta de dados climáticos históricos, passando por modelos de cálculo simplificado e ideal, e culminando na análise estatística de correlação. A abordagem integra variáveis como irradiância, temperatura e coeficientes técnicos, visando identificar discrepâncias entre projeções teóricas e desempenho operacional de um sistema FV instalado em João Pessoa-PB. A metodologia busca equilibrar precisão técnica e aplicabilidade prática, alinhando-se a padrões reconhecidos na literatura internacional.

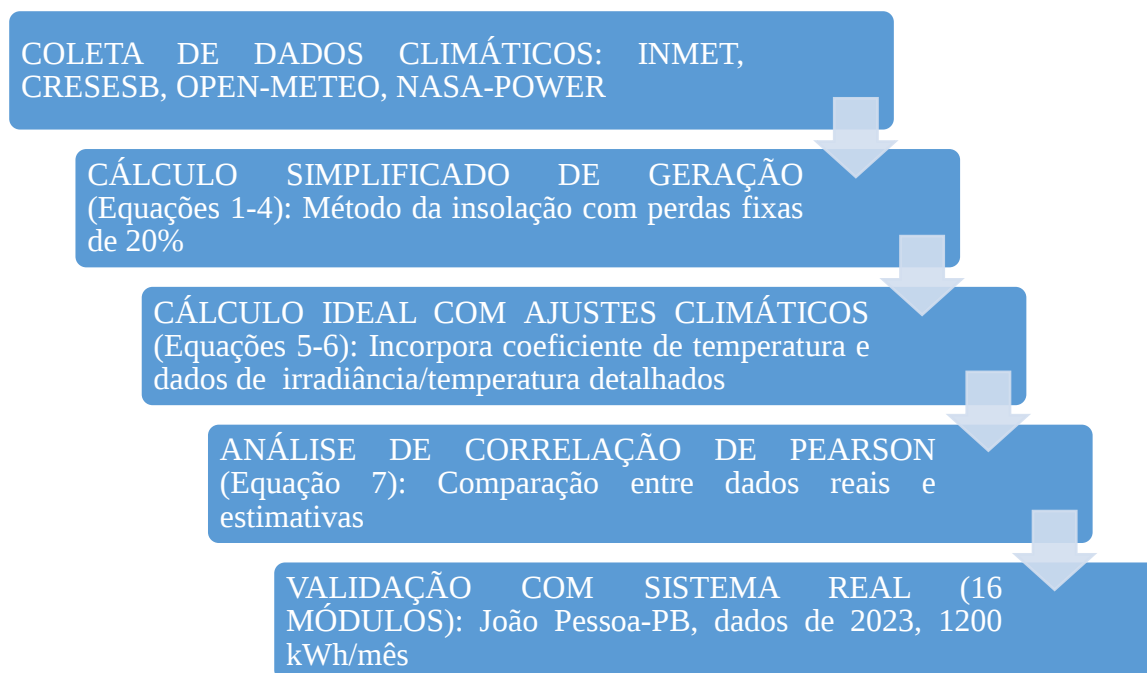


Figura 3.2 - Fluxograma metodológico para análise comparativa de bases de dados FV.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo Araújo *et al.* (2024) a importância da escolha criteriosa dos modelos meteorológicos se torna relevante no apontamento para a necessidade de estudos locais que possam calibrar e validar as previsões de capacidade de geração FV, contribuindo assim para o aprimoramento da eficiência e do dimensionamento desses sistemas. A avaliação dos impactos ambientais dos sistemas FV tem diferentes abordagens e chega a diferentes conclusões, refletindo diferentes contextos e metodologias.

Por isso, de acordo com Medeiros *et al.* (2021), entende-se que variações climáticas inesperadas podem influenciar significativamente o potencial de geração de energia solar FV, destacando a importância de análises climáticas detalhadas antes da implementação de usinas FV. Esse achado complementa a pesquisa do capítulo, que já evidencia a relevância da manutenção preventiva e do monitoramento contínuo para reduzir perdas operacionais. Ao integrar tanto aspectos técnicos quanto variáveis ambientais, torna-se possível uma avaliação mais precisa da viabilidade e do desempenho dos sistemas FV, contribuindo para uma geração de energia renovável mais eficiente e confiável.

Apresenta-se na Figura 3.3 uma análise comparativa da geração média mensal de energia entre diferentes fontes de dados. Antes de detalhar a análise mensal, é relevante ressaltar os totais anuais de produção para cada banco de dados representados na Tabela 3.2. O sistema real, com medições concretas, apontou uma produção total de 15.489,27 kWh em 2023. Comparativamente, as previsões do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), cuja estação está localizada na latitude -7,16 e longitude de -34,81, com a distância entre a estação e o local onde os módulos FV estão instalados é de aproximadamente 18km e obtiveram uma produção total de 16.648,59 kWh, em oposição a estimativas obtidas através da plataforma OPEN-METEO e os valores obtidos do sistema NASA-POWER, obtendo os respectivos totais de 13.866,69 kWh e 14.882,25 kWh. Os totais mencionados demonstram as diferenças totais estimativas x real, sendo esses os primeiros valores que darão contexto para a análise mensal.

Tabela 3.2 - Geração total anual e análise comparativa

Fonte de Dados	Geração Total Anual (kWh)	Diferença em Relação ao Sistema Real (kWh)	Comportamento em Relação ao Sistema Real
Sistema Real	15.489,27	-	Referência
INMET	16.648,59	+1.159,32	Superestimou
OPEN-METEO	13.866,69	-1.622,58	Subestimou
NASA-POWER	14.882,25	-607,02	Subestimou

A análise mensal considera quatro conjuntos de informações: os dados observados do sistema real com medições reais, utilizados como referência para validação, as estimativas fornecidas pelo INMET, projeções geradas pela plataforma OPEN-METEO, e os valores derivados do sistema NASA-POWER. Cada conjunto de dados reflete um esforço em caracterizar o potencial de capacidade de geração de energia solar FV ao longo dos meses do ano.

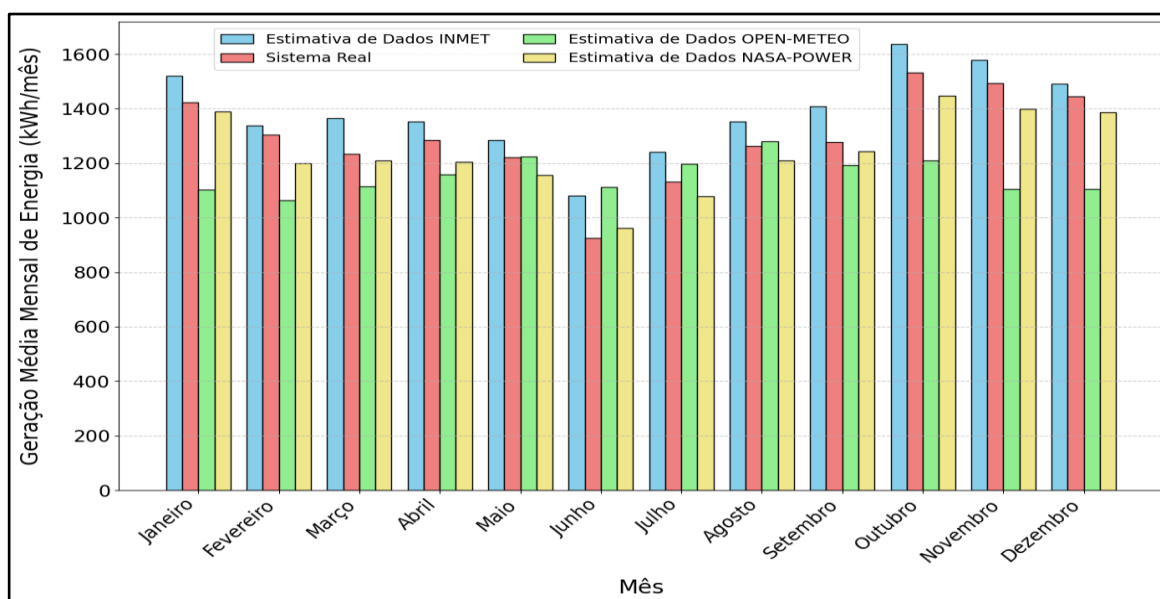


Figura 3.3 - Comparação da geração média mensal de energia entre o sistema real e diferentes fontes de geração estimada para o sistema estudado, no ano de 2023 na cidade de João Pessoa – PB.

O objetivo do gráfico é destacar as diferenças de comportamento entre as estimativas e os valores reais, permitindo uma avaliação mais criteriosa da precisão e aplicabilidade das fontes de dados externas na modelagem da capacidade de geração, onde os conjuntos analisados, evidenciam tanto as similaridades quanto as respectivas divergências. De modo a avaliar a relação entre os dados do sistema real e as estimativas calculadas com base em diferentes fontes de repositórios meteorológicos, aplicou-se a análise do coeficiente de correlação de Pearson.

A análise dos coeficientes de correlação de Pearson revelou que os conjuntos de dados fornecidos pelas plataformas INMET (0,978) e NASA-POWER (0,982) apresentam uma alta correlação positiva com os valores observados do sistema real, indicando uma forte concordância nas variações mensais de geração de energia FV. Por outro lado, o conjunto de dados estimados pela OPEN-METEO demonstrou baixa correlação negativa (-0,089), sugerindo uma discrepância significativa em relação ao comportamento real do sistema. Esses resultados destacam a superioridade das estimativas do INMET e NASA-POWER para análises de sistemas FV.

A matriz de correlação apresentada na Figura 3.4 oferece uma visão ampla e detalhada das relações lineares entre os diferentes conjuntos de dados avaliados. Foi possível identificar a intensidade e a direção das associações entre os valores estimados pelas fontes estudadas e analisadas, em comparação com o desempenho registrado pelo sistema real.

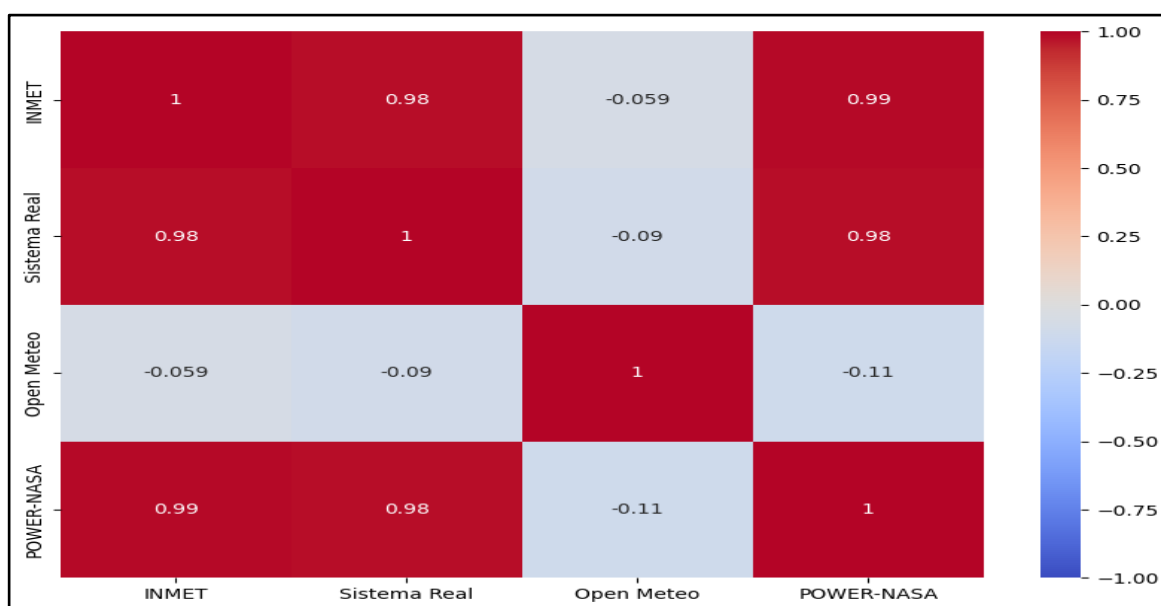


Figura 3.4 - A matriz de correlação apresenta os coeficientes de Pearson que indicam a intensidade e a direção das relações lineares entre os conjuntos de dados analisados: INMET, OPEN-METEO e NASA-POWER, com o Sistema Real como referência.

A disposição visual da matriz destaca o comportamento das variáveis em relação umas às outras, com valores variando de -1 a 1, para maior entendimento, tons mais próximos do vermelho intenso refletem uma correlação positiva forte, enquanto os tons azulados indicam correlações negativas, já as áreas em branco ou tons neutros sugerem a ausência de associação significativa.

O sistema real mostrou-se altamente correlacionado com as estimativas do INMET e do NASA-POWER, evidenciando a proximidade desses modelos aos dados observados de forma prática. Por outro lado, os resultados provenientes da OPEN-METEO revelaram uma correlação muito baixa, indicando discrepâncias entre as estimativas dessa fonte e os valores medidos no sistema. Como padrão observado enquanto o sistema real tem picos de geração nos meses de outubro, novembro e dezembro, o OPEN-METEO mostra uma queda nesses mesmo meses. Essa divergência tende a criar uma correlação negativa quando considerada a série temporal completa. Por isso, essa análise visual e quantitativa é fundamental para compreender a confiabilidade de cada modelo e guiar decisões informadas no uso de ferramentas de previsão para sistemas FV.

A análise da correlação entre diferentes fontes de dados meteorológicos é uma etapa crucial para avaliar a precisão e a consistência das estimativas em relação aos valores reais

medidos no sistema. Na Figura 3.5, são apresentados os gráficos de dispersão que comparam o sistema real com as bases de dados do INMET, OPEN-METEO e NASA-POWER, bem como as correlações entre estas fontes. Cada gráfico inclui o coeficiente de correlação de Pearson (r) como um indicador do grau de relação linear entre os conjuntos de dados analisados.

Essas determinantes comparações permitem a visualização, não apenas o alinhamento entre os valores, mas também com relação as possíveis discrepâncias em diferentes cenários. A percepção da inclusão de fontes variadas no dimensionamento de um sistema FV é particularmente relevante para o setor, onde fatores climáticos, modelos de estimativa e metodologia de coleta de dados influenciam diretamente a precisão dos resultados.

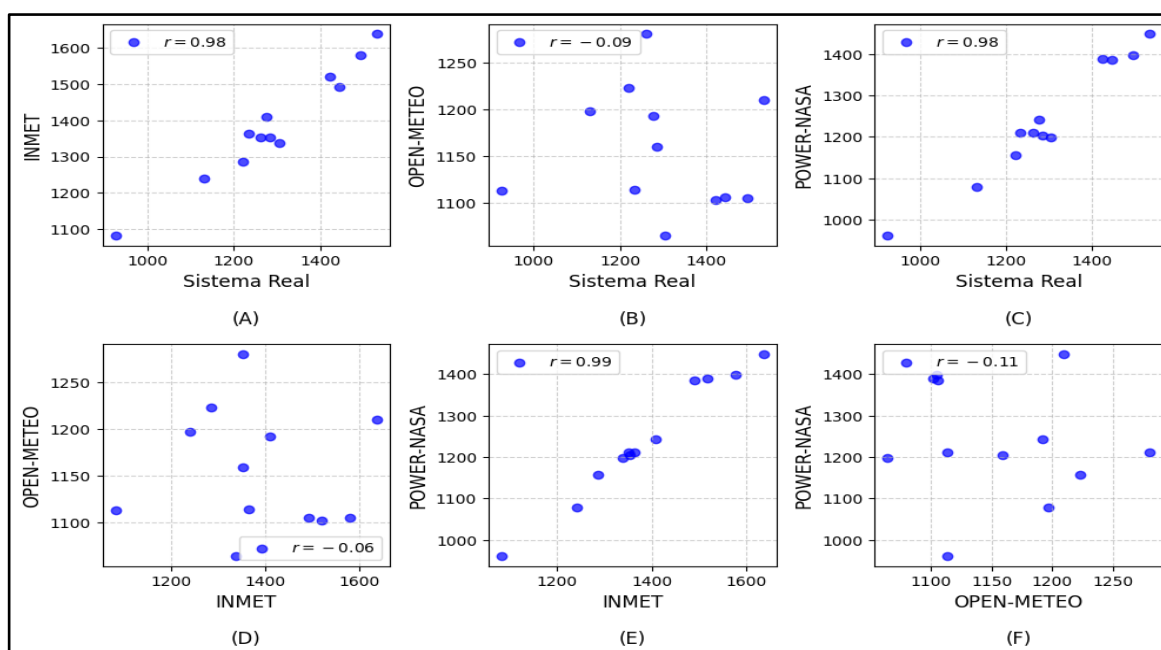


Figura 3.5 - Gráficos de dispersão entre os dados do sistema real e as bases para a capacidade de geração FV medida em kWh/mês, com INMET, OPEN-METEO e NASA-POWER, com os respectivos coeficientes de correlação de Pearson (r). As letras identificam os pares analisados: (A) Sistema Real x INMET, (B) Sistema Real x OPEN-METEO, (C) Sistema Real x NASA-POWER, (D) INMET x OPEN-METEO, (E) INMET x NASA-POWER e (F) OPEN-METEO x NASA-POWER.

Os resultados apresentados evidenciam a robustez de certas bases de dados, como o NASA-POWER, ao refletirem um alinhamento mais próximo ao comportamento do sistema real, enquanto outras, como o OPEN-METEO, apresentam diferenças mais perceptíveis. O coeficiente de correlação registrado em cada caso demonstra a importância de uma escolha

mais criteriosa das fontes de dados utilizados para dimensionar um projeto FV.

Dessa forma, com base na análise dos coeficientes, conclui-se que a base de dados NASA-POWER apresenta a melhor adequação para representar o comportamento do sistema real, seguida de perto pelo INMET. Essa abordagem reforça que, embora as bases de dados meteorológicos apresentem boas aproximações, a variabilidade observada em alguns casos ressalta a necessidade de ajustes metodológicos ou calibração para contextos específicos, principalmente evidenciando o tipo de clima local. Assim, os gráficos não apenas corroboram a relevância das análises de correlação, mas também reforçam a importância de combinar múltiplas fontes de bancos de dados para se ter uma avaliação mais confiável, precisa e eficiente.

3.6 CONCLUSÕES

A avaliação proposta neste estudo evidenciou a relevância mais crítica aos dados disponíveis para a modelagem e comparação das capacidades de geração de energia dos sistemas FV. A partir da aplicação do coeficiente de correlação de Pearson, foram identificadas as bases de dados INMET e NASA-POWER como as que possuem alta correlação com os dados reais, e sendo as mais confiáveis para representar o desempenho do sistema em estudo, como sistema de referência, por outro lado, a baixa correlação da base OPEN-METEO demonstrou que há limitações em sua capacidade de captar a variabilidade e os padrões da geração de energia solar FV.

Essa análise não somente enfatiza a importância da escolha correta das bases de dados em análises de sistemas FV, mas também evidencia o papel até agora relevante que metodologias mais analíticas e criteriosas desempenham na identificação de padrões potenciais, como na fundamentação de tomadas de decisões mais assertivas. A proximidade entre os resultados das bases INMET e NASA-POWER e os dados reais observados propõe uma credibilidade a ambas para experimentações em simulações, previsões de desempenho e em estudos de viabilidade técnica e até mesmo econômica.

Conclui-se, portanto, que a escolha de bases de dados meteorológicos que apresentem alta correlação com os valores medidos, é um requisito fundamental para a obtenção de precisão e confiabilidade nas análises relacionadas a projetos FV, por isso, este trabalho contribui diretamente para o aprofundamento das estratégias de avaliação de

desempenho de sistemas FV no que tange à estimativa da capacidade de geração de energia.

Com isso, entende-se que as estimativas de capacidade de geração FV apresentam diferenças decorrentes das variações entre as bases de dados meteorológicos. Além das incertezas associadas às bases utilizadas, deve-se considerar a possibilidade de falhas no sistema de geração, com destaque para o inversor, que se configura como um dos principais componentes sujeitos a falhas ou inatividade. Essas falhas podem impactar significativamente a geração total do sistema. Portanto, este aspecto será abordado com maior profundidade no próximo capítulo, com o objetivo de obter uma compreensão mais detalhada da capacidade de geração FV sobre esse aspecto.

CAPÍTULO IV

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS FALHAS NA REDE ELÉTRICA NA EFICIÊNCIA DOS INVERSORES EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS FALHAS NA REDE ELÉTRICA NA EFICIÊNCIA DOS INVERSORES EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

4 RESUMO

Este capítulo avalia os impactos das falhas na rede elétrica na eficiência dos inversores de sistemas de geração fotovoltaica (FV). Seis sistemas FV localizados na região Nordeste do Brasil, foram analisados no período de janeiro de 2022 a julho de 2024, permitindo a avaliação dos registros de ocorrência de falhas. No capítulo, dados climáticos adicionais obtidos do repositório do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), como irradiância solar e temperatura, são considerados. Assim, a eficiência esperada do sistema de geração FV é validada e os impactos das falhas provenientes da rede nos inversores em sua capacidade de geração são investigados. Os resultados obtidos mostram que alguns sistemas são mais propensos a problemas devido a falhas nos inversores do que outros, particularmente em resposta à disponibilidade da rede e à qualidade da tensão. Além disso, estima-se que essas falhas podem resultar em perdas de eficiência que variam de 2,55% a 14,67%. Esses resultados destacam a necessidade de soluções proativas para detectar problemas provenientes da rede nos inversores e de metodologias para melhorar a previsão da estimativa de capacidade de geração FV.

Palavras-chave: Eficiência de Geração; Geração Fotovoltaica; Inversor e Perdas de Energia.

4.1 ABSTRACT

This chapter evaluates the impacts of electrical grid failures on the efficiency of inverters in photovoltaic (PV) generation systems. Six PV systems located in the Northeast region of Brazil were analyzed from January 2022 to July 2024, allowing for the assessment of failure occurrence records. Additional climatic data, such as solar irradiance and temperature, obtained from the repository of the National Institute of Meteorology (INMET), are also considered in this chapter. Thus, the expected efficiency of the PV generation system is validated, and the impacts of grid-related failures on inverters and their generation capacity are investigated. The results show that some systems are more prone to issues caused by inverter failures than others, particularly in response to grid availability and voltage quality. Furthermore, it is estimated that these failures may lead to efficiency losses ranging from 2.55% to 14.67%. These findings highlight the need for proactive solutions to detect grid-related issues in inverters and methodologies to improve the forecasting of PV generation capacity estimates.

Keywords: Energy Losses; Generation Efficiency; Inverter and Photovoltaic Generation.

4.2 INTRODUÇÃO

A integração de tecnologias FV tem sido crucial para a descarbonização das redes elétricas existentes. Isso impulsionou economias ao redor do mundo, reduzindo os custos de energia e permitindo o fornecimento de eletricidade a locais remotos. Assim, a integração FV teve um impacto muito positivo na sociedade como um todo, sendo essencial para garantir energia sustentável nos sistemas elétricos modernos (Chen *et al.*, 2007; Dranka; Ferreira, 2020).

A manutenção e o monitoramento adequados dos geradores FV são fundamentais para assegurar uma eficiência satisfatória na geração de energia elétrica. Como a capacidade de geração dos sistemas FV pode ser significativamente comprometida se falhas nos sistemas auxiliares associados não forem detectadas a tempo, como problemas nos inversores e desconexões da rede, compreender o impacto de tais ocorrências na eficiência dos sistemas FV é crucial (Wang *et al.*, 2021).

Isso tem impulsionado o desenvolvimento de métodos capazes de diagnosticar falhas em inversores, levando também os planejadores de geração FV a demonstrar um interesse crescente em pesquisas que estimem as perdas de eficiência FV devido a problemas nos inversores e desconexões da rede (Mellit *et al.*, 2018).

De acordo com Pillai e Rajasekar (2018) e Triki-lahiani *et al.* (2018) a detecção de anomalias em sistemas FV é essencial para garantir sua confiabilidade. Trata-se de um processo que requer monitoramento constante para possibilitar a análise detalhada dos componentes dos sistemas FV, visando identificar e diagnosticar desvios da operação esperada. Por isso, Harrou *et al.* (2024) dividem as anomalias em sistemas FV em duas categorias, a saber: lado CC (antes do inversor) e lado CA (após o inversor). No lado CC, problemas como degradação, *hotspots* e curtos-circuitos afetam o desempenho, enquanto no lado CA, falhas como apagões e anomalias na rede são mais comuns. Portanto, a detecção proativa desses problemas permite a implementação de ações corretivas mais precisas, prevenindo tempos de inatividade prolongados e perdas significativas de energia, garantindo maior confiabilidade e eficiência dos sistemas FV (Harrou *et al.*, 2024).

Segundo Roy *et al.* (2024) quando um inversor opera de forma ineficiente ou tem sua operação completamente interrompida, o processo de conversão de energia CC para CA é imediatamente comprometido. Essa descontinuidade operacional afeta não apenas a produção de energia, mas também pode causar uma cascata de problemas de desempenho

em todo o sistema de geração FV. Assim, pequenas falhas intermitentes acumulam gradualmente perdas de eficiência na geração de energia FV ao longo do tempo, afetando significativamente a previsibilidade das quantidades de energia que um determinado sistema FV pode gerar. Além disso, a frequência crescente de falhas pode aumentar ainda mais os custos operacionais, incluindo reparos e manutenção, o que pode reduzir e comprometer diretamente o retorno financeiro total sobre o investimento.

Com a ideia de alcançar os objetivos propostos neste capítulo, foi realizada a coleta de dados para analisar quantitativa e qualitativamente as falhas registradas em sistemas FV reais. Com essas medições reais disponíveis, foi possível quantificar as causas das interrupções na operação dos inversores, permitindo uma compreensão mais aprofundada das principais razões de falhas em sistemas FV. Além disso, foi elaborada uma perspectiva holística sobre como diferentes fatores contribuem para as ineficiências do sistema, esclarecendo aspectos importantes que podem apoiar intervenções mais precisas para melhorar o desempenho geral dos sistemas FV.

Motivado pelo contexto mencionado acima, este artigo realiza uma análise quantitativa e qualitativa dos casos de falhas em inversores em seis sistemas reais, utilizando dados históricos para avaliar o impacto dessas falhas na eficiência dos sistemas de geração fotovoltaica (FV). Os principais objetivos deste trabalho incluem: 1) Identificação dos erros mais frequentes; 2) Comparação entre a geração real e as estimativas teóricas de eficiência FV; e 3) Análise das perdas do sistema, considerando o efeito das falhas nos inversores e da indisponibilidade da rede na capacidade total de geração de energia FV.

4.3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste capítulo para realizar a análise proposta é representada no fluxograma ilustrado na Figura 4.1. A avaliação sistemática apresentada permitiu uma análise abrangente das interações entre os diferentes tipos de falhas e seus impactos específicos na operação do sistema FV. Dessa forma, o roteiro para a coleta de dados delineou as seguidas etapas neste trabalho, orientando as investigações sobre as seguintes questões:

- Quais são os tipos de falhas mais recorrentes provenientes da rede nos inversores?
- Existem diferenças nos padrões de falhas entre os sistemas FV?

- Como as falhas identificadas afetam a capacidade de geração de energia dos sistemas FV analisados?
- Quais são as possíveis causas para os padrões de falhas observados em cada sistema FV?
- Como os resultados apresentados neste artigo podem contribuir para a melhoria dos sistemas FV em termos de previsão de eficiência?

Para responder às questões mencionadas acima, foram coletados dados de registros de falhas de seis sistemas FV reais localizados na região de João Pessoa - PB, resultando na análise de três sistemas com o Inversor 1 (INV1) e três sistemas com o Inversor 2 (INV2). O período analisado foi de janeiro de 2022 a julho de 2024, sendo os dados obtidos junto aos gestores de sistemas FV instalados por uma empresa local na cidade de João Pessoa, no estado da Paraíba, Brasil. Os nomes das marcas dos inversores e da empresa responsável por sua instalação e gestão foram omitidos para manter a confidencialidade.

Para coletar os dados de interesse, foram utilizadas plataformas digitais específicas fornecidas pelos fabricantes dos inversores FV analisados. Tais dados obtêm registros detalhados e informações sobre o desempenho dos equipamentos, permitindo a análise da recorrência de diferentes tipos de falhas. Assim, foi possível identificar os tipos de falhas mais recorrentes e avaliar seus impactos na capacidade de geração de energia FV.

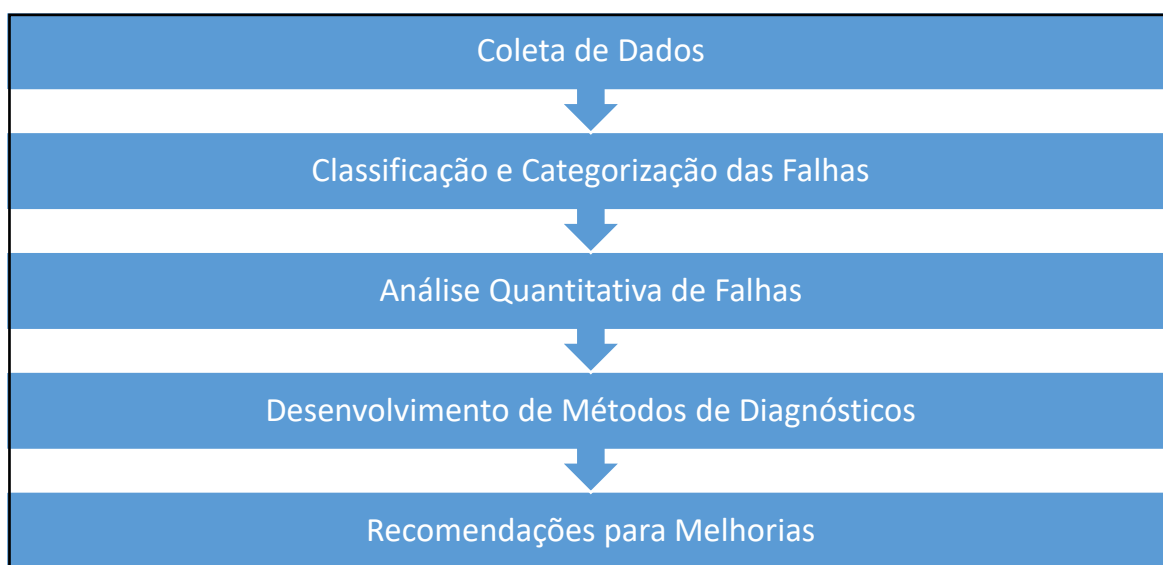


Figura 4.1 - Fluxo do processo de análise de falhas em sistemas fotovoltaicos, desde a etapa de coleta de dados até as recomendações de melhoria.

No contexto de uma análise qualitativa, a metodologia proposta focou na análise de um caso específico. Assim, a eficiência ideal esperada foi calculada com o objetivo de

estimar a capacidade de geração FV. Simultaneamente, a influência das falhas da rede ocasionadas nos inversores com relação ao desempenho do sistema FV foi avaliada, permitindo uma comparação entre as capacidades de geração estimada e real. Dessa forma, é possível entender como as variações de eficiência ocorrem em diferentes cenários e como essas falhas afetam a produção de energia FV ao longo do tempo. Além disso, condições específicas que contribuem para essas variações de geração FV foram levadas em consideração, permitindo uma melhor identificação de suas causas.

As Equações (1), (5) e (6) utilizam variáveis essenciais para estimar a capacidade de geração de energia solar FV. A Equação (1) refere-se ao método de cálculo convencional ou simplificado, amplamente utilizado em todo o cenário brasileiro. Este método fornece uma previsão inicial da energia gerada, e sua simplicidade e eficácia fazem dele uma ferramenta valiosa para profissionais da indústria que buscam otimizar o tempo na análise de desempenho de sistemas FV.

Com base nos dados de irradiação solar obtidos do CRESESB (2024), utilizando a Equação (1), de acordo com a norma INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC 61215, 2021), as energias geradas por módulo FV foram calculadas com base na irradiação recebida por metro quadrado e na eficiência do próprio módulo. Por outro lado, as Equações 5 e 6 foram usadas para calcular a eficiência ideal de cada sistema, ajustando as estimativas com base nos dados climáticos horários do INMET, que fornece informações sobre a Irradiação Global (kJ/m^2) e a Temperatura do Ar ($^{\circ}\text{C}$). Além disso, os coeficientes de temperatura de cada módulo FV foram considerados nesses cálculos, evidenciando a influência dos fatores climáticos na eficiência de geração FV (Dobos, 2014; Duffie; Beckman, 2013; Sauer *et al.*, 2015).

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 4.1 apresenta detalhes sobre as falhas identificadas nos seis sistemas reais avaliados. Conforme mencionado anteriormente, três sistemas estão equipados com o inversor INV1 e os outros três com o inversor INV2. A partir da Tabela 4.1, pode-se observar que o número de ocorrências variou significativamente entre os sistemas estudados, sendo o sistema 2, com o INV1, aquele com o maior número de falhas, enquanto o sistema 4, com o INV2, apresentou o menor número de falhas.

Considerando o total de ocorrências para cada sistema, contabilizam-se 95 falhas nos sistemas com INV1 e 19 falhas nos sistemas com INV2. Neste momento, é importante compreender que tais taxas de falhas podem estar associadas à qualidade do próprio inversor ou até mesmo à qualidade da tensão da rede elétrica, fator essencial para permitir a geração FV sincronizada à rede.

Aprofundando nos sistemas mais críticos estudados, observa-se que, entre as 37 falhas do INV1 no sistema 2, 34 casos foram classificados como "perda de rede". Os sistemas 1 e 3, equipados com o inversor INV1, também registraram um número significativo de falhas classificadas como "subtensão" e "sobretensão". Por outro lado, entre os sistemas analisados que estão equipados com o INV2, o sistema 6 registrou 12 falhas causadas por "tensão CA fora da faixa". Em outros poucos casos, foram identificados problemas causados por "perda de conexão CA", "baixa tensão FV" e "MPPT fora da faixa".

Tabela 4.1 - Análise de falhas em sistemas fotovoltaicos (INV1 e INV2)

Sistema	Marca	Nº de Ocorrências	Principais falhas
Sistema 1	INV1	26	Perda de rede (13), Subtensão (7), Sobretensão (4), Frequência excessiva (1), Subfrequência (1)
Sistema 2	INV1	37	Perda de rede (34), Subtensão (3)
Sistema 3	INV1	32	Perda de rede (12), Sobretensão (8), Subtensão (8), Subfrequência (1), Frequência excessiva (3)
Sistema 4	INV2	1	Perda de conexão CA (1)
Sistema 5	INV2	6	Tensão CA fora da faixa (3), Baixa tensão FV, MPPT fora da faixa (2), Perda de conexão CA (1)
Sistema 6	INV2	12	Tensão CA fora da faixa (11), Perda de conexão CA (1)

As falhas identificadas sugerem que há um grande impacto da descontinuidade da rede na previsão de geração FV, especialmente porque é difícil prever quando e por quanto tempo a rede estará fora de serviço. Por outro lado, aspectos relacionados ao nível de tensão revelam que os inversores podem ser mais ou menos suscetíveis a desconexões quando expostos a variações na tensão da rede. Diante disso, duas conclusões podem ser tiradas, a saber: (1) existem inversores que são mais suscetíveis à baixa qualidade da tensão da rede, afetando diretamente a previsão de geração FV; (2) sistemas com altos níveis de descontinuidade podem afetar significativamente a previsão de geração FV.

Além das conclusões mencionadas anteriormente, é crucial compreender que cenários envolvendo inversores vulneráveis e redes com significativas flutuações de tensão podem aumentar ainda mais as taxas de falhas dos inversores. Este parece ser o caso do INV1, que apresenta um número muito maior de ocorrências em comparação ao INV2. Tais falhas podem levar a períodos prolongados de inatividade, comprometendo a eficiência e a confiabilidade do sistema FV. Consequentemente, os projetistas podem reduzir os índices de eficiência para evitar superestimar a capacidade de geração, o que pode atrasar o retorno do investimento e causar insatisfação dos clientes.

Com o objetivo de aprofundar a análise das falhas estudadas, é realizada uma análise qualitativa focada em um caso específico de sistemas de energia solar FV. Embora este trabalho aborde seis estudos de caso distintos, este caso foi selecionado devido à sua representatividade em termos de padrões de falhas já identificados (ver Tabela 4.1) e aos impactos associados na capacidade de geração.

O projeto selecionado para a etapa de análise detalhada é o Sistema 2, cuja taxa de falhas está apresentada na Tabela 4.1. Ele é composto por 16 módulos FV de alta eficiência, cada um com uma capacidade de 550 Wp, equipado com um inversor de 8 kWp, com uma geração mensal estimada em cerca de 1200 kWh/mês. A Figura 4.2 apresenta uma análise comparativa entre a geração anual estimada de energia do Sistema 2, com base no cálculo de eficiência ideal utilizando as Equações 5 e 6, considerando os dados climáticos obtidos do INMET, incluindo o coeficiente de temperatura do módulo, e a geração real do sistema FV instalado, obtida através da Equação 1 (como aplicado por diversas empresas no Brasil durante os cálculos de previsão de geração FV).

De acordo com a Figura 4.2, ao longo dos meses, há diferenças entre as estimativas de geração FV e as medições reais. Essas discrepâncias podem ser atribuídas a bancos de dados climáticos imprecisos ou até mesmo a falhas na rede que impactam nos inversores. Nesse

sentido, considerando a ideia de que meses com características climáticas distintas permitem comparações mais robustas, será dada uma atenção especial aos meses de março, junho e dezembro.

As Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam a comparação entre a energia gerada FV real e a estimada para os meses de março, junho e dezembro de 2023, respectivamente. O comparativo é realizado com relação direta entre plano inclinado x plano inclinado, garantindo uma avaliação justa das condições de inclinação dos módulos. Além disso, foram considerados nos cálculos fatores de perdas, como sombreamento por exemplo, aplicados em ambos os casos. Essa análise destaca variações nos dias de menor produção, relacionadas a possíveis falhas do sistema, e enfatiza as discrepâncias entre a geração estimada e as medições reais ao longo dos dias de cada mês analisado.

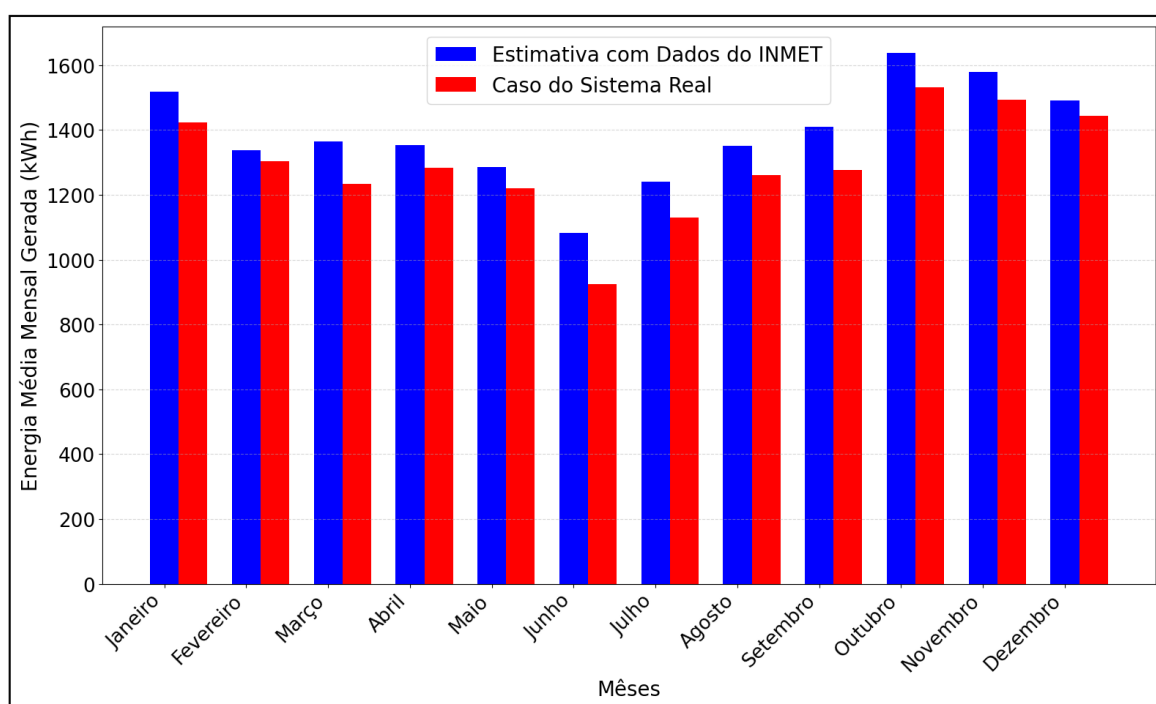


Figura 4.2 - Comparação da geração média mensal de energia solar FV em 2023 entre um caso real, utilizando dados do CRESESB, e um caso estimado, utilizando dados do INMET para a cidade de João Pessoa – PB..

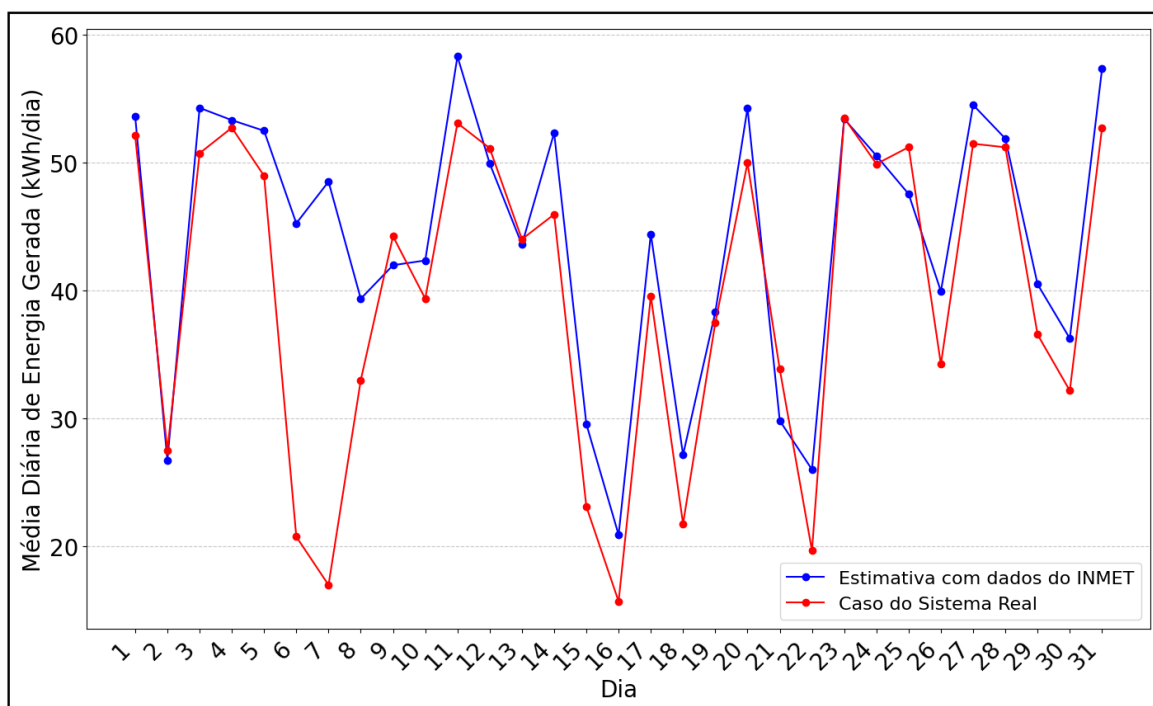


Figura 4.3 - Comparação entre a geração de energia real e estimada para Março de 2023, na cidade de João Pessoa - PB, destacando picos significativos causados por falhas nos inversores.

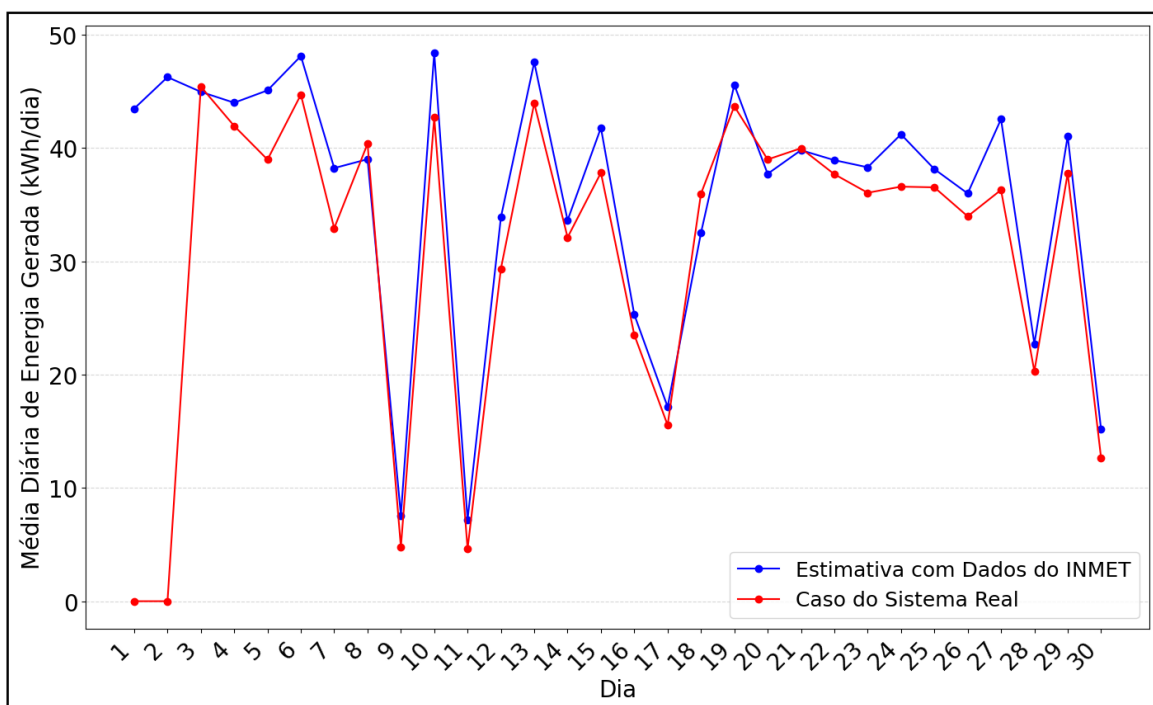


Figura 4.4 - Comparação entre a geração de energia real e estimada para Junho de 2023, na cidade de João Pessoa - PB, destacando picos significativos causados por falhas nos inversores.

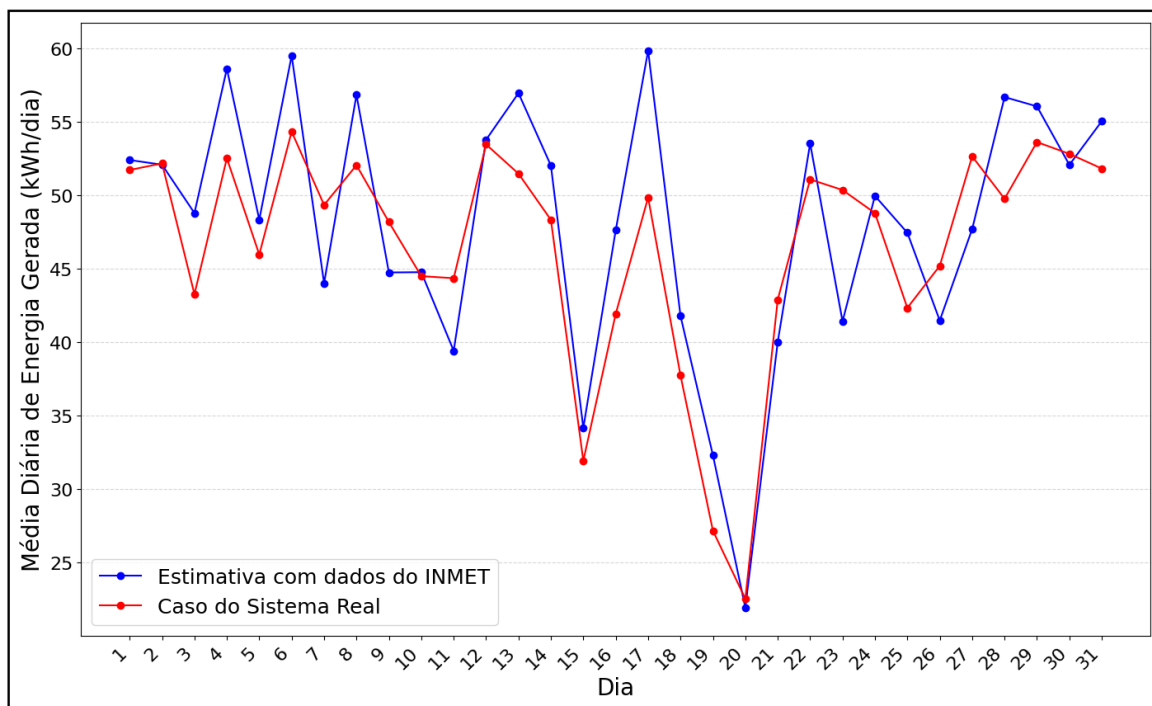


Figura 4.5 - Comparação entre a geração de energia real e estimada para Dezembro de 2023, destacando picos significativos causados por falhas nos inversores.

Os resultados apresentados demonstram que, em março, como ilustrado na Figura 4.3, a geração de energia estimada foi próxima da geração real. No entanto, discrepâncias significativas foram observadas nos dias 6 e 7, quando a geração real foi muito menor do que as gerações estimadas. Em junho, como mostrado na Figura 4.4, pode-se verificar uma menor capacidade de geração devido à irradiância reduzida e às condições climáticas adversas devido a localidade e sazonalidade. A estação do INMET está localizada na latitude de -7,16 e longitude de -34,81, com uma distância da estação do INMET até o local onde os módulos foram instalados de aproximadamente 18 km.

Neste mês, as condições reais foram muito próximas aos dados estimados. No entanto, discrepâncias relevantes são observadas nos dias 1 e 2. Assim como no caso anterior, a energia gerada real foi muito menor do que a estimada, o que requer uma investigação mais aprofundada deste cenário. Por fim, as condições de geração de dezembro são mostradas na Figura 4.5.

Neste mês, apenas pequenas discrepâncias entre a energia gerada FV medida e estimada foram verificadas, tornando este caso particularmente importante. De fato, como demonstra uma convergência satisfatória entre as gerações real e estimada, ele pode ser utilizado como referência para fins de comparação com os dados obtidos dos bancos de

dados de março e junho, quando falhas de geração FV parecem ter ocorrido.

Primeiramente, é importante esclarecer que as discrepâncias relevantes identificadas podem ser compreendidas como a influência de aspectos climáticos. No entanto, mesmo considerando a influência de condições climáticas adversas, essas discrepâncias não correspondem às expectativas quando os dados climáticos são considerados, indicando, na verdade, que falhas no sistema FV impactaram negativamente a geração.

Essa situação destaca a importância de identificar essas falhas, que afetam significativamente o desempenho do sistema. No dia 1º de junho, houve uma queda acentuada na geração de energia real, que foi muito menor do que o valor estimado, atingindo zero. Nesse caso, o sistema FV ficou fora de serviço. No dia seguinte, 2 de junho, o comportamento atípico continuou, com a geração real permanecendo nula. Em seguida, ao longo dos dias do mês, os dados revelaram uma boa convergência com os valores teóricos, destacando a estabilidade do sistema em termos de geração de energia.

Por outro lado, nos dias 6 e 7 de março, apesar das variações relevantes nas medições reais de energia, elas não chegaram a zero. No entanto, a partir da análise do sistema, foi constatado que as falhas causadas no inversor ocorreram apenas em parte do dia, ainda resultando em alguma energia gerada após a restauração do sistema FV.

As discrepâncias encontradas entre os dados estimados e reais nos casos analisados foram cruciais para ilustrar as variações na capacidade de geração do sistema FV e os impactos consecutivos em sua eficiência. Além disso, além de identificar padrões de desempenho, esses estudos também fornecem importantes informações sobre ajustes potenciais no futuro.

Assim, a investigação dos dados obtidos dos três meses estudados ofereceu uma base sólida para compreender o comportamento das falhas e os limites operacionais dos inversores, destacando que, além dos efeitos de dados climáticos previstos imprecisos, as falhas na rede causando inatividade dos inversores devem ser levadas em consideração durante a definição nos procedimentos de previsão de geração FV.

Os padrões de falha observados nos sistemas analisados também indicaram diferenças significativas entre o INV1 e o INV2. Cada inversor (e cada sistema) tem causas predominantes para as falhas, que podem estar associadas tanto às características técnicas do equipamento quanto às condições externas de operação. Nesse sentido, as perdas de eficiência têm sido uma variável crítica que afeta a previsão de geração FV, influenciando não apenas a quantidade de energia produzida, mas também o estudo econômico para a

estimativa do período de retorno do investimento. Portanto, obter uma faixa de valores possíveis para esse índice de eficiência quando as falhas causadas nos inversores são consideradas é de extrema importância em termos práticos.

Com o objetivo de estimar uma faixa confiável de índices de eficiência que possam incluir os efeitos das falhas da rede causadas nos inversores FV, a Figura 4.6 ilustra as perdas e ganhos de eficiência para o sistema FV 2, considerando medições realizadas nos meses específicos de março, junho e dezembro de 2023, ao longo dos dias.

Em março, uma perda média de eficiência na geração de 10,03% foi estimada, segundo Arifujjaman (2015) calculada pela Equação 8, que determina a perda relativa de eficiência diária.

$$P_{ef} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \cdot 100 \quad (8)$$

Onde P_{ef} representa a perda de eficiência diária (%), E_1 é a energia gerada pelo conjunto ideal e E_2 é a energia medida pelo sistema real. Essa perda foi particularmente acentuada nos dias 6 e 7, quando perdas de 54,11% e 64,97% foram observadas, respectivamente. Essas perdas significativas destacam o impacto crítico da confiabilidade da rede sobre os inversores na geração de energia geral. Em junho, a situação piorou, com uma perda média de 14,67%. Nos dois primeiros dias, como os inversores estavam fora de serviço, as perdas atingiram 100%, significando uma interrupção total na geração de energia. Em dezembro, o desempenho do sistema resultou em uma perda média de 2,55%. Na Figura 4.6, observa-se que, apesar de algumas perdas, o sistema apresentou um desempenho mais estável, sem falhas nos inversores observadas.

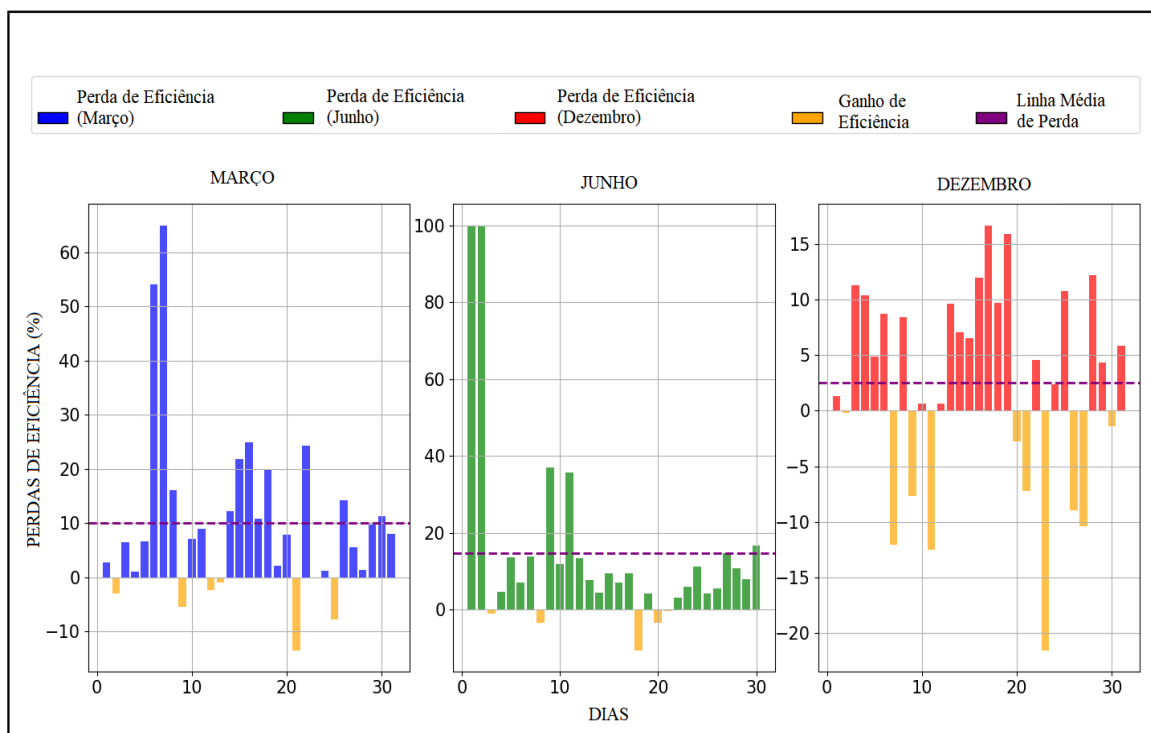


Figura 4.6 - Análise das perdas e ganhos de eficiência na capacidade de geração solar fotovoltaica do Sistema 2 durante os meses específicos de março, junho e dezembro de 2023.

Esses resultados destacam que, além das condições climáticas adversas e outros fatores que influenciam diretamente as perdas de eficiência em sistemas FV, as falhas na rede ocasionando falhas nos inversores desempenham um papel crucial na redução da capacidade de geração total em janela de tempo maiores. Entre os possíveis problemas, as falhas devido a flutuações nas tensões da rede são as mais frequentes, revelando que os estudos sobre as características da rede são importantes durante o projeto de dimensionamento de sistemas FV. Além disso, pode-se perceber que as perdas de eficiência de geração do sistema FV em um mês sem falhas atingiram a ordem de 2,55%, enquanto nos outros meses em que ocorreram falhas, as perdas de eficiência na geração chegaram à ordem de 14%.

Em março, uma perda média de eficiência de 10,03% foi estimada, principalmente devido à operação intermitente dos inversores nos dias 6 e 7, quando perdas de 54,11% e 64,97% foram observadas, respectivamente. Essas perdas significativas destacam o impacto crítico da confiabilidade dos inversores na geração de energia geral. Em junho, a situação piorou, com uma perda média de 14,67%. Nos dois primeiros dias, como os inversores estavam fora de serviço, as perdas atingiram 100%, significando uma interrupção total na geração de energia. Em dezembro, o desempenho do sistema resultou em uma perda média de 2,55%.

Na Figura 4.6, observa-se que, apesar de algumas perdas, o sistema apresentou um desempenho mais estável, sem falhas da rede que afetassem os inversores observados. A partir dos dados relativos a março, esperava-se 45 kWh para os dias em que ocorreram falhas na rede que impactaram o inversor. No entanto, as medições indicaram 20 kWh. Ao analisar o registro de ocorrências do sistema, verificou-se que os inversores estavam fora de serviço durante meio dia (12 h). Assim, considerando a quantidade de energia prevista E_{pred} , e subtraindo a porção de energia relacionada à perda de eficiência α de um sistema com inversores saudáveis, conforme encontrado para dezembro (cerca de 3%), e considerando que os inversores ficam inativos durante h_d horas por dia, uma estimativa da geração diária E_{est} pode ser calculada como mostrado na Equação (9).

$$E_{est} = E_{pred} \cdot (1 - \alpha) \cdot (1 - \frac{h_d}{24}) \quad (9)$$

Essa equação pode ser validada por meio de dados de março ($h_d=12$ e $E_{pred} \approx 45$ kWh), e considerando $\alpha = 3\%$, o que resulta em $E_{est} = 45 \cdot (1 - 0,03) \cdot (1 - \frac{12}{24}) \approx 23,2$ kWh, que está muito próximo da energia medida. Assim, na Equação 9 pode ser utilizada por projetistas de sistemas FV para obter estimativas mais precisas da energia gerada por dia, incluindo os impactos das falhas da rede que impactam diretamente os inversores.

4.5 CONCLUSÕES

A partir dos dados relativos a março, este capítulo avaliou casos de falhas na rede elétrica que impactaram diretamente os inversores FV em seis sistemas reais. Dois tipos de inversores foram estudados, a saber, INV1 e INV2. O INV1 apresentou um maior número de ocorrências do que o INV2, indicando sensibilidades diferentes às flutuações na rede elétrica. Simultaneamente, foi destacada a importância de estudos sobre a qualidade da tensão da rede, uma vez que a maioria das falhas identificadas estava relacionada às flutuações da tensão na rede elétrica. As perdas de eficiência foram estimadas para três meses

de 2023, a saber, março, junho e dezembro. Os resultados mostraram perdas de eficiência de cerca de 10,03% em março (com dois dias de interrupção parcial do serviço dos inversores), 14,67% em junho (com dois dias de interrupção total do serviço dos inversores) e 2,55% em dezembro (sem ocorrências nos inversores). Esses resultados destacam o impacto crítico das falhas dos inversores na capacidade de geração FV.

Finalmente, para permitir estimativas mais precisas da geração diária de energia FV quando as falhas nos inversores ocasionadas por falhas na rede são levadas em conta, foi proposta uma equação de estimativa de energia, incluindo uma variável que representa o número de horas em que o inversor permanece fora de serviço. Com isso, os projetistas de sistemas FV podem melhorar os cálculos de previsão de geração, simplesmente considerando seus próprios critérios sobre a duração das inatividades dos inversores.

Diante do exposto nos capítulos anteriores, torna-se evidente a incerteza em relação à geração das plantas FV, ressaltando a necessidade de um estudo mais aprofundado no planejamento dessas instalações. Contudo, há ainda um aspecto relevante: as variações climáticas a longo prazo, tema abordado no próximo capítulo, considerando que essas plantas têm vida útil superior a uma década. Durante esse período, mudanças climáticas, geralmente desprezadas, precisam ser investigadas para verificar se existem e se impactam o desempenho do sistema.

CAPÍTULO V

ANÁLISE RETROSPECTIVA DOS EFEITOS DAS VARIAÇÕES CLIMÁTICAS NA ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

ANÁLISE RETROSPECTIVA DOS EFEITOS DAS VARIAÇÕES CLIMÁTICAS NA ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

5 RESUMO

O estudo apresentado neste capítulo investiga a inter-relação entre as flutuações climáticas e a produção de energia FV em João Pessoa-PB, durante o período de 2013 a 2023, com os dados para o cálculo de capacidade de geração estimada sendo originários do banco de dados georreferenciados NASA-POWER. A pesquisa destaca o impacto de variáveis como a irradiância solar, a temperatura, a umidade, a precipitação e o vento, na geração dos sistemas FV, buscando otimizar o planejamento para cenários de mudanças climáticas. A irradiância solar apresentou estabilidade durante o período analisado, com pequenas variações, à medida que a temperatura média anual se elevou gradualmente, afetando a eficiência dos módulos FV, impactando diretamente a geração, de maneira que em 2021, a referida temperatura atingiu o patamar de 28,77°C. Modelou-se um sistema FV no qual a capacidade foi de 1200 kWh/mês e este foi contrastado com os dados climáticos locais, sendo possível concluir que a produção de energia, embora não tenha apresentado grandes oscilações conforme a irradiância, manteve-se estável, sinalizando que as outras variáveis climáticas compensaram esta variação. Através da regressão linear múltipla e do cálculo do erro, foi possível aferir o resultado em que 64,77% da variação da produção foi explicada pelas referidas variáveis. A irradiância solar sinaliza ser o principal fator enquanto a temperatura e a precipitação apresentaram impactos negativos expressivos. Este estudo atesta a importância do monitoramento das condições climáticas, com vistas ao dimensionamento e operação de sistemas FV, quando os cenários de mudança climática forem futuramente concretizados.

Palavras-chave: Energia Fotovoltaica; Mudanças Climáticas; Regressão Linear e Variáveis Climáticas.

5.1 ABSTRACT

The study presents in the chapter investigates the relationship between climate fluctuations and photovoltaic (PV) energy production in João Pessoa, PB, during the period from 2013 to 2023, using data from the georeferenced database NASA-POWER. The research highlights the impact of variables such as solar irradiance, temperature, humidity, precipitation, and wind on the efficiency of PV systems, aiming to optimize planning for climate change scenarios. Solar irradiance remained stable, with small variations, while the annual average temperature gradually increased, affecting the efficiency of the PV modules. In 2021, the temperature reached 28.77°C. A simulated PV system with a capacity of 1200 kWh/month was modeled and contrasted with local climate data. It was concluded that energy production, although fluctuating with irradiance, remained stable, indicating that other climatic variables compensated for this variation. Through multiple linear regression and error calculation, it was determined that 64.77% of the variation in production was explained by these variables. Solar irradiance was found to be the main factor, while temperature and precipitation had significant negative impacts. This study underscores the importance of monitoring climate conditions for the sizing and operation of PV systems, particularly when climate change scenarios materialize in the future.

Keywords: Climate Change; Climatic Variables; Linear Regression and Photovoltaic Energy.

5.2 INTRODUÇÃO

Devido à recente indisponibilidade de recursos hídricos, ao aumento da demanda por eletricidade e à pressão por maiores cuidados com o meio ambiente, os esforços para diversificar a matriz elétrica brasileira, com a inclusão de novas fontes renováveis, tornam-se extremamente urgentes. É importante destacar que a matriz elétrica brasileira já é fortemente influenciada por fontes de energia renováveis, segundo Medeiros *et al.* (2021), embora tenha-se buscado maior inclusão de fontes de geração FV.

As mudanças climáticas estão transformando o cenário energético de maneira significativa, e a energia solar FV, apesar de ser uma solução sustentável, também sente os impactos desse novo panorama. Com as temperaturas subindo em várias partes do mundo, a demanda por energia se ajusta e isso altera a forma como consumimos energia e exige que o sistema energético se adapte rapidamente (Cronin *et al.* 2018).

Do lado da geração, os desafios são ainda mais visíveis. Os módulos FV, por exemplo, não trabalham tão bem sob calor extremo. Quando as temperaturas passam do ideal, a eficiência deles tende a cair, resultando em menos energia gerada. Além disso, eventos climáticos extremos, como tempestades violentas ou períodos prolongados de seca, podem causar danos físicos aos equipamentos ou interromper sua operação.

Para enfrentar esses desafios, é fundamental incluir os impactos das mudanças climáticas em modelos que avaliem as melhores estratégias de mitigação e adaptação. O Quinto Relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC-AR5) destaca a importância de aprofundar pesquisas sobre esses impactos e integrá-los a análises abrangentes para planejar um futuro energético mais sustentável. Esses fatores mostram que, mesmo sendo uma aliada crucial no combate às mudanças climáticas, a energia solar FV também precisa lidar com os desafios que esse cenário apresenta. Adaptar-se e encontrar maneiras de superar esses obstáculos é essencial para garantir que a mesma continue desempenhando seu papel na construção de um futuro mais sustentável.

Dado o exposto, este capítulo visa determinar o impacto das variações climáticas sobre o potencial gerador da energia FV no estado da Paraíba, mais precisamente na cidade de João Pessoa, analisando o período de 2013 a 2023. Com a finalidade de alcançar tal objetivo, foram analisados dados climáticos históricos da região, sendo considerados elementos climáticos como temperatura, irradiância solar e precipitação, permitindo relacioná-los com a produção de energia elétrica FV. A partir dos dados climáticos, foi feita uma simulação

que procurou estimar a geração FV ideal das condições climáticas do histórico. Com isso, o estudo visa compreender a maneira com que as variações climáticas impactaram a eficiência dos sistemas FV ao longo do tempo considerando o período estabelecido neste estudo, apresentando uma visão detalhada dos impactos das alterações climáticas na geração de energia FV.

5.3 METODOLOGIA EMPREGADA NO ESTUDO DE VARIAÇÕES CLIMÁTICAS

5.3.1 Descrição da área analisada

O estudo foi conduzido na área localizada em toda cidade de João Pessoa, no estado da Paraíba, Brasil ($7^{\circ}9'28''\text{S}$, $34^{\circ}50'43''\text{W}$). A região possui características climáticas típicas de áreas tropicais, com temperaturas médias anuais, máximas e mínimas que variam ao longo do ano. Para contextualizar a análise, apresenta-se na Figura 5.1 uma representação geográfica da localização de João Pessoa, destacando sua localização geográfica.

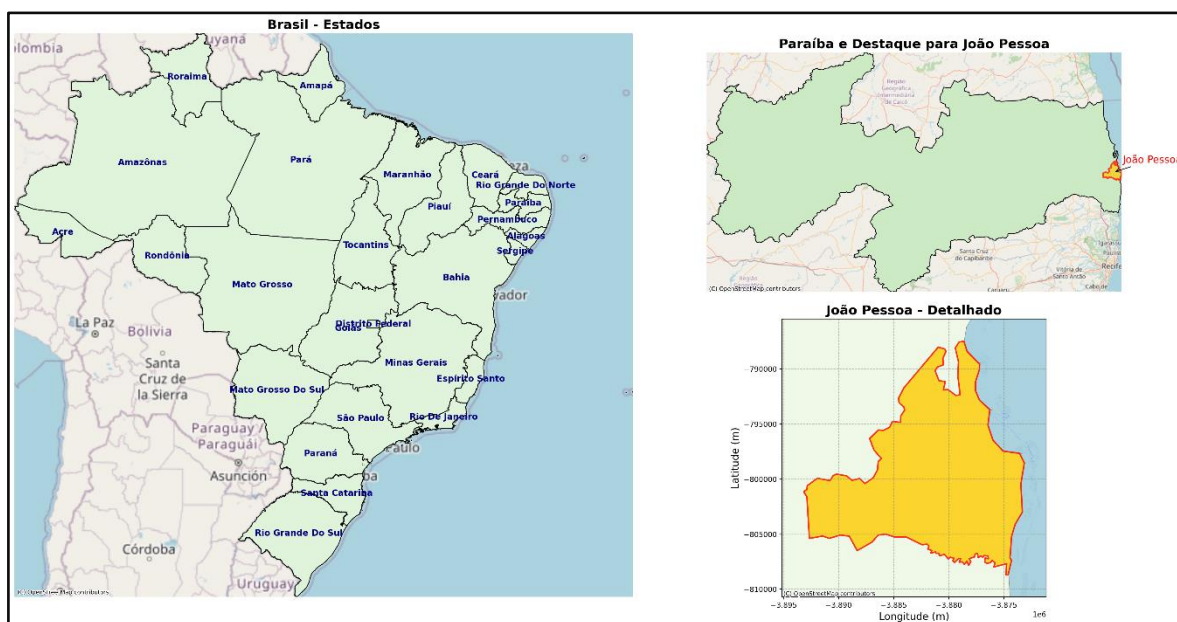


Figura 5.1 - Representação geográfica de João Pessoa, Paraíba, destacando sua localização e distribuição espacial.

5.3.2 Aquisição de dados

O presente estudo realizou a coleta de dados meteorológicos e climáticos a partir da base de dados NASA-POWER, disponível gratuitamente na web (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>), que fornece dados globais diários de longo prazo em uma grade de 1° de latitude e longitude para o período de 2013 a 2023. Foram obtidos os seguintes parâmetros: Irradiância Solar (W/m^2); Temperatura do Ar ($^{\circ}\text{C}$); Umidade Específica (g/kg); Pressão Atmosférica (kPa); Precipitação Acumulada (mm); Céu Claro (W/m^2); Diferença de Irradiância (W/m^2) que consiste na diferença entre irradiância solar direta e difusa, com os dados obtidos de diversas fontes, incluindo satélites, observações terrestres e modelagem (White *et al.*, 2008).

Os dados foram pré-processados para remoção de inconsistências e lacunas, através da identificação e correção de inconsistências, como valores discrepantes ou erros de digitação que poderiam vir a afetar a análise. Além disso, foram tratadas as colunas nos dados, onde períodos de dados ausentes foram preenchidos utilizando métodos de interpolação ou substituição por média, garantindo a sua confiabilidade. Além disso, foi calculada a média mensal para cada variável, de modo a analisar variações sazonais e tendências climáticas ao longo do período.

5.3.3 Análise dos dados e cálculo de eficiência

A partir desses dados, foi realizada a modelagem de um sistema FV simulado, com capacidade média de geração de 1200 kWh/mês, utilizando os mesmos parâmetros meteorológicos fornecidos pela base NASA-POWER. A estimativa de geração foi calculada considerando o fator de capacidade do sistema, sendo 80% de eficiência nominal fixa, ou seja, um fator de perdas estimado em 20% para o sistema real e perdas climáticas, tratando das variações na eficiência atribuídas exclusivamente aos impactos das variáveis climáticas coletadas.

As Equações (5) e (6) foram aplicadas para determinar a eficiência ideal do sistema, utilizando os dados climáticos diários fornecidos pelo NASA-POWER, que incluem informações sobre irradiância (W/m^2) e temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$). Esses dados foram empregados para realizar a simulação da geração FV do sistema para todos os anos de 2013 até 2023. Nos cálculos, foram considerados os coeficientes de temperatura específicos de

cada módulo FV, evidenciando a influência das condições climáticas na eficiência de geração dos sistemas FV (Neto *et al.*, 2024).

5.3.4 Métodos estatísticos

Os dados coletados foram analisados utilizando métodos estatísticos para examinar o impacto de potenciais mudanças climáticas sobre a geração de energia solar FV. Entre as ferramentas utilizadas, encontram-se as seguintes

5.3.4.1 Regressão linear múltipla

Segundo Maulud e Abdulazeez (2020) a regressão linear é um método estatístico e de aprendizado de máquina comumente utilizado para identificar relações entre variáveis independentes e dependentes, facilitando a detecção de padrões e a realização de previsões a partir de dados. Utilizada para evidenciar a relação entre a geração estimada e os parâmetros climáticos coletados (irradiância, temperatura, umidade, pressão e etc.), segundo a Equação (10).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon \quad (10)$$

Sendo:

- Y : Variável dependente,
- $X_1, X_2, \dots, X_n$: Variáveis independentes,
- β_0 : Intercepto (ou coeficiente linear),
- $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$: Coeficientes das variáveis independentes (que indicam a influência de cada X sobre Y),
- ϵ : Erro (ou termo residual), representando a diferença entre o valor real de Y e o valor estimado pelo modelo.

5.3.4.2 Erro quadrático médio (RMSE), erro médio absoluto (MAE) e coeficiente de determinação (r^2)

Erro Quadrático Médio (RMSE), utilizado para quantificar os desvios entre os valores correspondentes estimados e observados, Equação (11); Erro Médio Absoluto (MAE), utilizado para quantificar a magnitude média dos desvios absolutos, Equação (12), Coeficiente de Determinação R^2 , utilizado para quantificar a força da relação entre as variáveis climáticas e a geração FV, conforme Equação (13).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{observado,i} - Y_{previsto,i})^2} \quad (11)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_{observado,i} - Y_{previsto,i}| \quad (12)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_{observado} - Y_{previsto})^2}{\sum (Y_{observado} - \bar{Y}_{observado})^2} \quad (13)$$

Sendo:

- $Y_{observado}$: Valores reais observados;
- $Y_{previsto}$: Valores previstos pelo modelo;
- $\bar{Y}_{observado}$: Média dos valores observados;
- n : Número de observações;
- $Y_{observado,i}$: valores observados;
- $Y_{previsto,i}$: valores previstos;

5.3.4.3 Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall é uma técnica estatística amplamente utilizada para identificar tendências em dados de séries temporais. Em vez de medir a intensidade da tendência, o foco desse teste é verificar se há uma mudança consistente, seja de aumento ou diminuição, ao longo do período analisado (Lornezhad *et al.*, 2023).

O teste foi utilizado para evidenciar e detectar tendências monotônicas dos dados meteorológicos e da geração simulada, de forma a evidenciar possíveis mudanças significativas associadas a mudanças climáticas, conforme as Equações (14), (15), (16) e (17).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (14)$$

$$T = \frac{S}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)}} \quad (15)$$

$$Z = \frac{S}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad (16)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (17)$$

Sendo:

- S : Estatística S , soma dos sinais das diferenças entre todos os pares de observações;
- X_i e X_j : Valores das variáveis em dois diferentes pontos no tempo, com $j > i$
- $\text{Sign}(x_j - x_i) \begin{cases} 1 \text{ se } x_j > x_i \\ 0 \text{ se } x_j = x_i \\ -1 \text{ se } x_j < x_i \end{cases}$;
- T : Coeficiente de Kendall;
- n : Número total de observações;
- Z : Cálculo para determinar se a tendência p observada é estatisticamente significativa;
- $\text{Var}(S)$: Variância da Estatística S .

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados possibilitaram identificar tendências relevantes ao longo da década estudada, evidenciando o papel desempenhado pelas variações climáticas na eficiência e na previsibilidade da geração de energia solar FV. Essas tendências trazem a importância dos fatores meteorológicos, como a mudança da irradiância solar, da temperatura e da precipitação no desempenho dos sistemas, com isso, o estudo ainda traz elementos

importantes para o planejamento e para a otimização de sistemas FV, considerando cenários de mudanças climáticas e suas implicações para a viabilidade e a confiabilidade da geração de energia.

A Figura 5.2 mostra os gráficos de variação da irradiância solar, temperatura, umidade, velocidade do vento e precipitação ao longo da década, fornecendo uma visão geral das flutuações climáticas durante o período analisado.

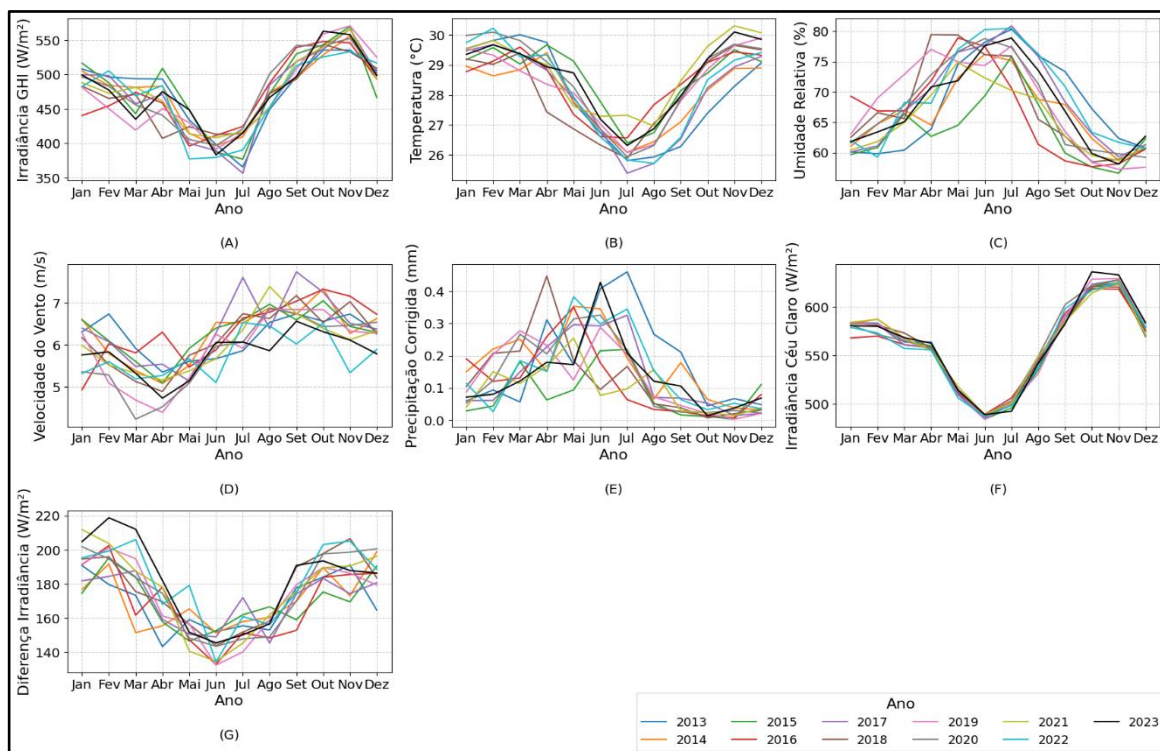


Figura 5.2 - Gráfico da variação das variáveis climáticas ao longo da década de 2013-2023, oferecendo uma visão geral das flutuações climáticas durante o período analisado onde (A) Irradiância GHI (W/m^2), (B) Temperatura ($^{\circ}C$), (C) Umidade Relativa (%), (D) Velocidade do Vento (m/s), (E) Precipitação Corrigida (mm), (F) Irradiância Céu Claro (W/m^2) e (G) Diferença Irradiância (W/m^2).

A análise das médias mensais dos dados meteorológicos dos anos de 2013 a 2023 indica que a irradiância solar, manteve-se estável, com pequenas variações em torno da média de $476 W/m^2$. Portanto, o ano de 2015 teve a maior média anual de irradiância solar, com $479,03 W/m^2$, enquanto o ano de 2018 teve a menor média, $469,31 W/m^2$ e essa variação é atribuída principalmente às alterações normais nas variáveis climáticas, tais como cobertura de nuvens e precipitação, que afetam a disponibilidade de radiação solar nos sistemas FV.

Quanto à temperatura média anual, observou-se uma variação gradual ao longo dos anos, com a média anual passando de 28,02 °C em 2013 para 28,6 °C em 2020, com isso, a maior temperatura média foi a do ano de 2021, que teve 28,77 °C. Portanto, as altas temperaturas prejudicam o desempenho dos módulos FV, visto que temperaturas mais altas afetam a eficiência do sistema, ocasionando perdas na geração da energia, a Figura 5.3 ilustra essa variação climática ao longo dos anos. Explicando o impacto dessa variação na temperatura, considerando a eficiência dos módulos FV, entre 2013 e 2020, a temperatura média anual na região estudada aumentou 0,58 °C (de 28,02 °C para 28,6 °C). Entende-se que o coeficiente de temperatura (γ) do módulo FV utilizado (- 0,35%/°C), esse aumento térmico resulta em uma redução adicional de eficiência dada na equação (18):

$$\Delta_{Eficiência} = \gamma \cdot \Delta T \quad (18)$$

Ou seja, $\Delta_{Eficiência} = \gamma \cdot \Delta T = - 0,35\%/^{\circ}\text{C} \cdot 0,58^{\circ}\text{C} = -0,203\%$, isso significa que, apenas pelo aumento da temperatura no período, os módulos perderam 0,203% de eficiência na conversão de energia solar em eletricidade. Com isso, trazendo para o impacto na geração para um sistema de 8 kWp (com geração média anual de 1200 kWh/mês na região), considerando o aumento de 0,58 °C, existe uma perda mensal de (Perda = 1200 kWh/mês. 0,203% = 2,44 kWh/mês), ao longo do ano isso equivale a 29,28 kWh perdidos, tendo um efeito cumulativo.



Figura 5.3 - Evolução anual da irradiância solar (kWh/m^2) e da temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) entre os anos de 2013 e 2023.

Além da análise dos dados meteorológicos, foi realizada a modelagem de um sistema FV simulado, com uma capacidade média de geração de 1200 kWh/mês , considerando as mesmas variáveis climáticas fornecidas pela base NASA-POWER. Portanto, a geração do sistema foi estimada com base em um modelo que assume uma eficiência nominal fixa, considerando perdas adicionais além das climáticas, com um fator de perdas de 80% de eficiência. Essa estimativa de geração foi comparada com os dados meteorológicos da cidade de João Pessoa, buscando identificar como as variações climáticas influenciam o desempenho do sistema FV.

A Figura 5.4 apresenta a comparação entre a geração de energia simulada e as condições climáticas observadas, destacando as correlações entre a produção de energia FV. Com isso, os resultados indicaram que, apesar da variação da irradiância solar ao longo dos anos, o sistema FV ainda demonstrou uma geração relativamente estável, devido à compensação dos efeitos climáticos por fatores como o aumento na variação da temperatura.

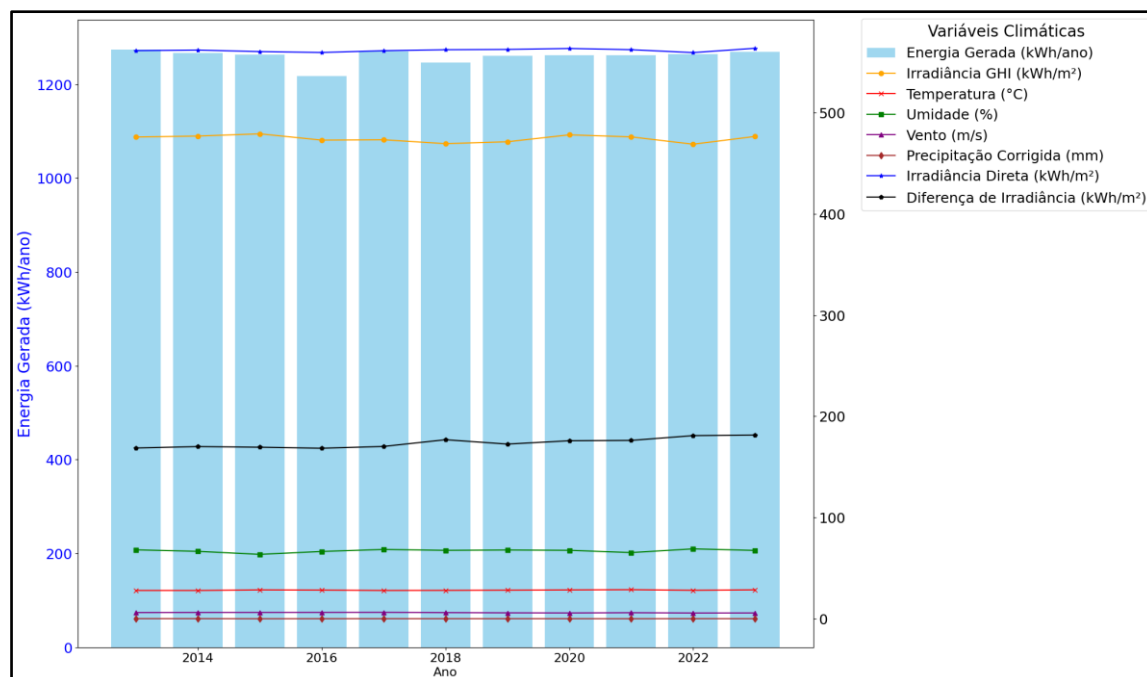


Figura 5.4 - Comparação entre a geração de energia fotovoltaica e os dados climáticos para o período de 2013-2023 em João Pessoa.

Apesar de a Figura 5.3 indicar que a irradiância segue o mesmo padrão da temperatura, a análise conjunta dos gráficos na Figura 5.2 sugere que a compensação da geração FV em condições de temperatura elevada ocorre principalmente quando a diferença de irradiância é menor em determinados períodos, mostrando que a irradiância global está mais próxima do valor sob céu claro. Significando maior radiação direta disponível para os módulos, compensando as perdas de eficiência causadas pelo aquecimento.

Além da análise dos dados, para avaliar o impacto das variáveis climáticas na geração de energia FV, foram realizadas análises de regressão linear múltipla e cálculos de erros RMSE e MAE, proporcionando uma avaliação detalhada da precisão dos modelos preditivos em relação aos dados observados, portanto, a análise revelou o coeficiente de determinação (R^2) de 0,6477, indicando uma correlação moderada a forte entre as variáveis climáticas analisadas e a geração de energia FV, revelando que cerca de 64,77% da variação da geração FV é explicada pelas variáveis independentes. Os indicadores de erro, RMSE de 8,8235 kWh e MAE de 7,3835 kWh, apontam diferenças entre os valores observados e preditos, com isso, esses resultados sugerem que, embora o modelo consiga capturar bem a tendência geral da geração de energia FV, flutuações climáticas complexas, como variações na umidade relativa do ar, precipitação e velocidade do vento, podem introduzir incertezas, reduzindo a precisão das previsões.

Os resultados de tendências complementados e validados pelo teste do Mann-Kendall e análise de regressão linear e múltipla apresentados nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, ofereceram uma análise detalhada das tendências climáticas e os impactos relativos sobre a geração da energia FV. Com isso, o teste de Mann-Kendall mostrou, inicialmente, que a irradiação solar incidente na superfície total em todas as condições atmosféricas e a irradiação solar incidente em céu claro não apresentaram tendências estatísticas significativas, com p-valores de 0,4363 e 0,1611, respectivamente. Contudo, os valores de Tau (-0,2000 e 0,3455) indicam pequenas variações negativas e positivas, ao passo que a irradiação solar difusa na superfície total em todas as condições atmosféricas manteve uma tendência positivamente significativa, com p-valor=0,0018 e Tau=0,7455), indicando um crescimento da irradiação difusa que pode estar, possivelmente, associado com a mudança das condições atmosféricas, como maior severidade de nuvens ou características das partículas em suspensão.

A temperatura não apresentou tendência significativa, embora seu Tau positivo (0,4182) sugira uma possível elevação no longo prazo. Já a umidade relativa e a precipitação total corrigida também não apresentaram tendências significativas, com p-valores de 0,7555 e 0,8763, respectivamente, indicando estabilidade ao longo do período analisado. Por outro lado, a velocidade do vento apresentou uma tendência significativamente decrescente, com p-valor de 0,0293 e Tau de -0,5273, destacando uma redução no resfriamento natural dos módulos, o que pode impactar negativamente a eficiência do sistema.

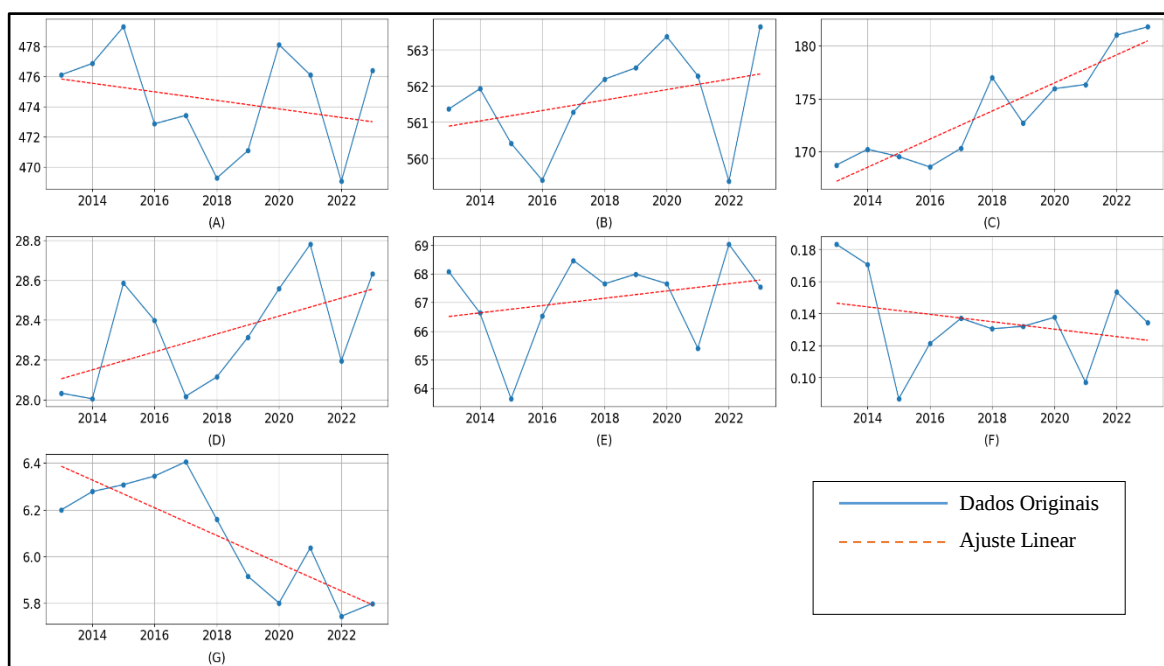


Figura 5.5 - Os valores climáticos de longo período de (A) Irradiação Solar Total (kWh/m²), (B) Irradiação Solar Sob Céu Claro (kWh/m²), (C) Irradiação Solar Difusa (kWh/m²), (D) Temperatura Média (°C), (E) Umidade Relativa Média (%), (F) Precipitação Total Anual (mm), (G) Velocidade Média do Vento (m/s) para o período (2013-2023).

Na análise de regressão linear múltipla, Figura 5.6, os coeficientes estimados indicaram a magnitude e a direção do impacto de cada variável climática sobre a geração FV. A irradiação solar incidente total e a irradiação em céu claro apresentaram coeficientes positivos, 5,38 e 0,55, respectivamente, confirmando que a irradiação solar direta é o principal fator impulsionador da geração de energia FV. A radiação difusa também mostrou um impacto positivo, com coeficiente de 1,07, embora menor que a radiação direta, refletindo a menor capacidade dos módulos em captar luz difusa.

A temperatura apresentou um coeficiente negativo expressivo, -89,37, evidenciando seu impacto adverso na geração de energia devido ao aumento das perdas resistivas em temperaturas mais altas, com isso, a umidade relativa, por outro lado, mostrou um impacto positivo moderado, coeficiente de 1,92, possivelmente associado a condições climáticas mais amenas. A precipitação apresentou o coeficiente mais negativo, -468,79, indicando que chuvas intensas reduzem significativamente a geração devido a obstrução da irradiação solar pelas nuvens e ao acúmulo de sujeira nos módulos, com isso, a velocidade do vento também apresentou um impacto negativo relevante, coeficiente de -50,76, possivelmente associado a condições adversas como tempestades, conforme Tabela 5.1.

Tabela 5.1- Coeficientes das variáveis climáticas observadas na Regressão Linear Múltipla para previsão de geração de energia solar fotovoltaica sobre uma análise de sensibilidade.

Variável Climática Observada	Coeficiente	Impacto Relativo (%)
Irradiância Solar Total	5.3836	0,87
Irradiância Solar Direta	0.5482	0,08
Irradiância Solar Difusa	1.0741	0,17
Temperatura	-89.3669	-14,46
Umidade Relativa	1.9207	0,31
Precipitação	-468.7939	-75,87
Velocidade do Vento	-50.7618	-8,21

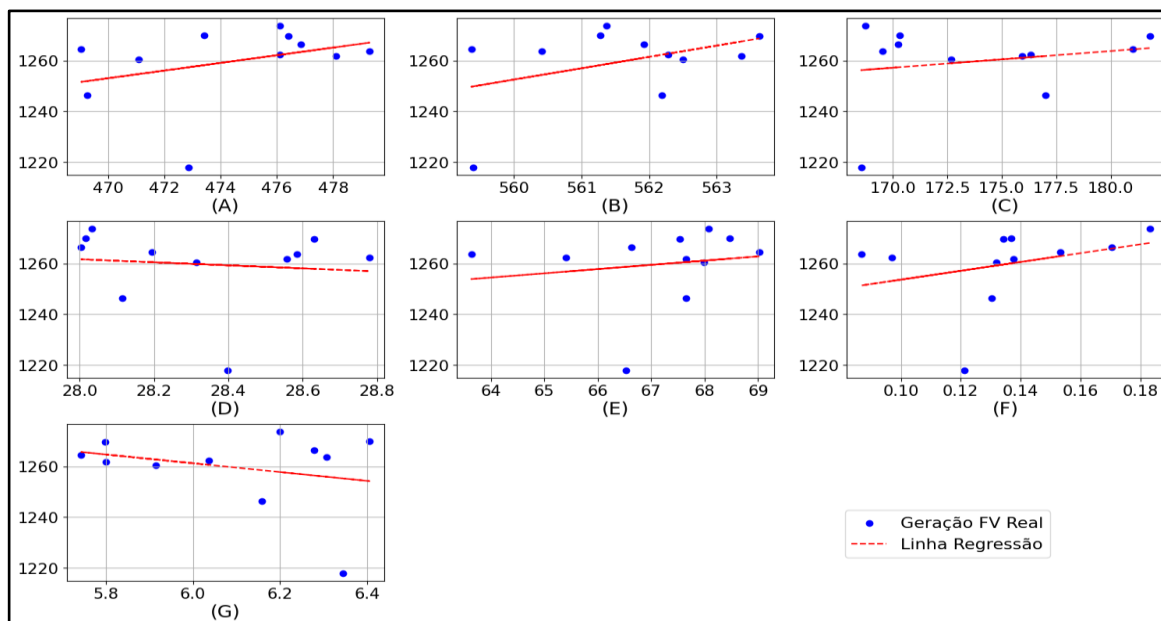


Figura 5.6 - Regressão linear para a variável dependente Geração de Energia FV ao longo dos anos, com base nas variáveis independentes: (A) Geração FV x Irradiação Solar Total, (B) Geração FV x Irradiação Solar Céu Claro, (C) Geração FV x Irradiação Solar Difusa, (D) Geração FV x Temperatura, (E) Geração FV x Umidade Relativa, (F) Geração FV x Precipitação Total e (G) Geração FV x Velocidade do Vento.

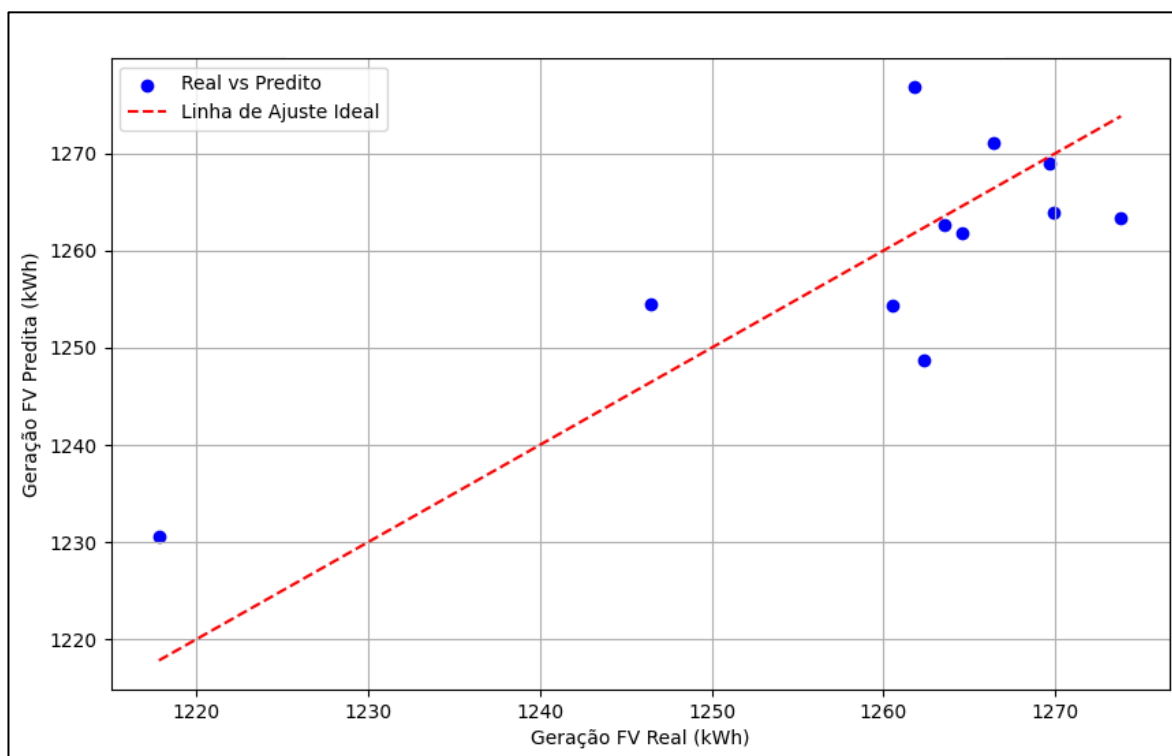


Figura 5.7 - O gráfico representa a Regressão Linear Múltipla entre a Geração Fotovoltaica Real (kWh) e a Geração Fotovoltaica Predita (kWh) a partir das variáveis climáticas fornecidas.

O gráfico exibido apresenta a Regressão Linear Múltipla correspondente à Geração FV Real (kWh) e a Geração FV Predita (kWh), baseada nas variáveis climáticas fornecidas, onde cada ponto azul no gráfico representa a comparação entre os valores reais de geração de FV (no eixo x) e os valores preditos pelo modelo (no eixo y), com isso, a distribuição dos pontos ao redor da linha vermelha pontilhada, que representa a linha de ajuste ideal, ilustra a precisão das previsões do modelo, mostrando que quanto mais próximos os pontos estiverem dessa linha, mais precisas são as previsões.

A concentração da maioria dos pontos ao longo da linha de ajuste sugere que o modelo obteve um bom desempenho, apesar de certas variações, onde alguns pequenos afastamentos ou diferenças das previsões esperadas representam imprecisões, que já se espera de um modelo estatístico, obtendo, assim, um coeficiente de determinação (R^2) levemente moderado, indicando que o modelo consegue explicar boa parte da variação dos dados, evidenciando que discrepâncias podem ser atribuídas à contribuição de variáveis não consideradas no modelo ou a efeitos não lineares.

Os resultados indicam que a irradiação solar direta foi, sem dúvida, a variável essencial na produção FV, embora variáveis climáticas como precipitação e temperatura tenham exercido um impacto negativo significativo sobre a capacidade de geração ao longo do período de investigação. Portanto, dessa forma, a variação da temperatura e precipitação sugerem que a geração FV sofreu uma modificação, de moderada a significativa, provocada pelas mesmas, sendo que a temperatura elevada resultou em perda de eficiência de sistema e a precipitação aumentou as perdas de geração em alguns períodos.

Além disso, a tendência crescente na irradiação difusa sugere uma mudança gradual, mas significativa, nas condições da atmosfera que impactam a eficiência do sistema, sendo que a redução da velocidade do vento teve um impacto negativo para a geração FV também, mas de magnitude menor.

Dessa forma, mesmo que a irradiação solar direta tenha sido a principal variável controladora da geração FV, as mudanças nas variáveis climáticas ao longo do tempo, sugere que houve uma alteração ou variação moderada na estimativa de capacidade de geração FV do sistema em consequência dessas mesmas variações, observando que isso tende a aumentar a necessidade do monitoramento contínuo e consideração dessas variáveis climáticas para dimensionamento e operação de sistemas FV, em especial, em cenário de mudanças climáticas futuras.

5.5 CONCLUSÃO

A pesquisa evidenciou o reflexo significativo das variáveis climáticas na eficiência e previsibilidade da geração de energia solar FV ao longo de uma década em João Pessoa, Paraíba. Através de análises criteriosas dos dados meteorológicos, identificou-se que a irradiância solar, as temperaturas, a precipitação e a velocidade do vento tem um papel crucial no desempenho dos sistemas FV, assim, as tendências apontaram para estabilidade da irradiância solar, ainda que a temperatura crescente e a redução na velocidade do vento resultem em negativas consequências para o futuro da eficiência dos módulos.

A modelagem e as análises estatísticas, que incluíram o coeficiente de determinação ($R^2=0,6477$), corroboraram a correlação leve a moderada entre as variáveis e a geração de energia FV, indicando que 65% da variação encontrada é explicada pelas variáveis climáticas em estudo. Portanto, as tendências gerais apontam para uma possível piora na capacidade de geração de energia FV, especialmente se as mudanças climáticas continuarem a impactar negativamente fatores como temperatura e velocidade do vento.

O efeito adverso da temperatura corrobora resultados anteriores encontrados em relação às perdas resistivas em módulos sob elevadas temperaturas e é compatível com a explicação disponível na literatura que estabelece uma relação inversa entre eficiência e calor (Skoplaki; Palyvos, 2009). Contudo, o valor do coeficiente (-89,37) dá a entender que, em regiões da zona tropical como a de João Pessoa, o efeito térmico pode ser crucial e requereria a adoção de estratégias de resfriamento ativo ou material com baixa sensibilidade térmica.

No entanto, as limitações da abordagem estatística e a complexidade das variáveis climáticas indicam que, embora as tendências gerais tenham sido captadas, não se chegou a uma solução definitiva para a otimização da geração de energia FV em cenários de mudanças climáticas.

Assim, este estudo contribui para o entendimento das interações entre o clima e a geração de energia FV, mas também aponta para a necessidade de investigações mais aprofundadas. Fica claro que o planejamento adequado desses sistemas, especialmente diante das mudanças climáticas, exige abordagens mais sofisticadas. A continuidade da pesquisa nesse campo é essencial para desenvolver soluções mais precisas e eficazes, visando sistemas FV mais flexíveis e eficientes sob condições climáticas variáveis, o que pode ser um tema relevante para trabalhos futuros.

6 PUBLICAÇÕES

No âmbito da dissertação de mestrado, foram publicados dois artigos que refletem bem os avanços alcançados durante a pesquisa. Essas publicações destacam a relevância dos estudos realizados e fundamentam as conclusões apresentadas no trabalho final. A produção desses artigos foi essencial para consolidar os resultados obtidos e abrir caminhos para futuras submissões acadêmicas, ampliando o impacto da pesquisa no campo da energia solar FV e suas aplicações.

NETO, A. A. A., LOPES, F. V., and ABRAHÃO, R. "The Role of Spatial Databases for Climatic and Solar/Wind Energy Generation Studies: A Bibliometric Review," 2023 IEEE Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS), Brasilia, Brazil, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/WCNPS60622.2023.10345313. Link: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10345313>

NETO, A. A. A., LOPES, F. V., and ABRAHÃO, R. "Assessing the Impact of Inverter Failures on the Efficiency of Photovoltaic Generators," 2024 IEEE Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS), Brasilia, Brazil, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/WCNPS65035.2024.10814549. Link: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10814549>

7 CONCLUSÕES GERAIS DA DISSERTAÇÃO

A dissertação discute as incertezas relativas aos sistemas FV e apresenta três pontos principais relacionados com o desenho destes tipos de sistema e sua execução. Em primeiro lugar, no que diz respeito à escolha correta de bases de dados georreferenciadas, a precisão e confiabilidade das informações dessas fontes tem um forte impacto sobre uma estimativa de capacidade de geração de energia. Usar indevidamente as bases de dados pode trazer incertezas que vão impactar a eficiência da estimativa de geração do sistema no longo prazo.

O segundo aspecto diz respeito à incerteza gerada pela falha dos componentes do sistema, como os inversores, ocorrências provenientes de problemáticas na rede elétrica. A dissertação apontou de que forma a inatividade desses componentes podem impactar negativamente a estimativa da capacidade de geração de energia FV, evidenciando a importância do monitoramento e da manutenção contínuos. As ocorrências em inversores, as quais podem causar perdas de eficiência elevadas, demonstram como a confiabilidade dos componentes dos sistemas é fundamental para um ótimo desempenho dos sistemas FV.

Por último, a dissertação investigou também de que forma as variações nas condições climáticas impactam na geração de energia FV. As alterações nas variáveis climáticas, como a temperatura, irradiância solar e velocidade do vento, podem causar incertezas relevantes nas previsões de capacidade de geração de energia. A avaliação de que a consequência das variações climáticas ao longo do tempo demonstrou que, mudanças nas condições ambientais podem reduzir a eficiência dos sistemas FV, ensejando a necessidade de estratégias adaptativas no planejamento.

Em resumo, a dissertação destaca os desafios inerentes aos sistemas FV, focando especialmente em incertezas que podem minar a precisão e eficácia das previsões da produção de energia. A escolha correta de bases georreferenciadas, ocorrências dos componentes do sistema como inversores e variações do clima são fatores determinantes que merecem atenção quando se executam esses projetos. Com tais esclarecimentos, o estudo contribui para a melhoria das práticas de modelagem, monitoramento e manutenção dos sistemas FV, constituindo uma base valiosa sobre a qual construir futuras soluções mais robustas e eficazes. Assim sendo, a adaptação continuada às incertezas torna-se essencial para o sucesso dos próprios sistemas FV, fazendo-os mais viáveis diante das mudanças e desafios futuros.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA DISSERTAÇÃO

ALTAMIMI, A.; JAYAWEERA, D. **Reliability Performances of Grid-Integrated PV Systems with Varying Climatic Conditions**. IET International Conference on Resilience of Transmission and Distribution Networks (RTDN 2017). **Anais...** Em: IET INTERNATIONAL CONFERENCE ON RESILIENCE OF TRANSMISSION AND DISTRIBUTION NETWORKS (RTDN 2017). Birmingham, UK: Institution of Engineering and Technology, 2017. Disponível em: <<https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2017.0336>>. Acesso em: 13 mar. 2025

ARAÚJO, N. M. D. F. T. D. S.; SANTOS, P. R. D. A.; ABRAHÃO, R. Climate Change Impact on Photovoltaic Production From the Perspective of Climate Models: a Systematic Review. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. e09341, 18 out. 2024.

ARIFUJJAMAN, M. A comprehensive power loss, efficiency, reliability and cost calculation of a 1 MW/500 kWh battery based energy storage system for frequency regulation application. **Renewable Energy**, v. 74, p. 158–169, fev. 2015.

BACH GASPARIN, F. et al. The Influence of Public Policies for the Progress of Photovoltaic Solar Generation and Diversification of The Brazilian Energy Matrix. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 1, p. 77–81, 2022.

BEDEWY, B. A. H.; AL-TIMIMY, S. R. A. Estimate Suitable Location of Solar Power Plants Distribution by GIS Spatial Analysis. **Civil Engineering Journal**, v. 9, n. 5, p. 1217–1229, 1 maio 2023.

CAMPOVERDE-MOLINA, M.; LUJÁN-MORA, S.; VALVERDE, L. Accessibility of university websites worldwide: a systematic literature review. **Universal Access in the Information Society**, v. 22, n. 1, p. 133–168, mar. 2023.

CHEN, Y.-M. et al. Multi-Input Inverter for Grid-Connected Hybrid PV/Wind Power System. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 22, n. 3, p. 1070–1077, maio 2007.

COHEN. **Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences**. 3. ed. [s.l.] Routledge, 2013.

CRONIN, J.; ANANDARAJAH, G.; DESSENS, O. Climate change impacts on the energy system: a review of trends and gaps. **Climatic Change**, v. 151, n. 2, p. 79–93, nov. 2018.

CROOK, J. A. et al. Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. **Energy & Environmental Science**, v. 4, n. 9, p. 3101, 2011.

CUZZOCREA, A.; NUCITA, A. Enhancing accuracy and expressive power of range query answers over incomplete spatial databases via a novel reasoning approach. **Data & Knowledge Engineering**, v. 70, n. 8, p. 702–716, ago. 2011.

DIMUCCIO, L. A. et al. Regional forest-fire susceptibility analysis in central Portugal using a probabilistic ratings procedure and artificial neural network weights assignment. **International Journal of Wildland Fire**, v. 20, n. 6, p. 776, 2011.

DOBOS, A. **PVWatts Version 5 Manual**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.osti.gov/servlets/purl/1158421/>>. Acesso em: 23 nov. 2024.

DRANKA, G. G.; FERREIRA, P. Towards a smart grid power system in Brazil: Challenges and opportunities. **Energy Policy**, v. 136, p. 111033, jan. 2020.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 1. ed. [s.l.] Wiley, 2013.

ELTAWIL, M. A.; ZHAO, Z. Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 112–129, jan. 2010.

FRANCISCO, P. R. M. et al. Köppen's and Thornthwaite Climate Classification for Paraíba State. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 4, p. 1006–1016, 2015.

FRÖHLICH, C. Solar Constant and Total Solar Irradiance Variations. Em: RICHTER, C.; LINCOT, D.; GUEYMARD, C. A. (Eds.). **Solar Energy**. New York, NY: Springer New York, 2013. p. 399–416.

GERNAAT, D. E. H. J. et al. Climate change impacts on renewable energy supply. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 2, p. 119–125, fev. 2021.

GIELEN, D. et al. The role of renewable energy in the global energy transformation. **Energy Strategy Reviews**, v. 24, p. 38–50, abr. 2019.

GIL, V. et al. Impact of climate change on solar irradiation and variability over the Iberian Peninsula using regional climate models. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 3, p. 1733–1747, 15 mar. 2019.

HARROU, F. et al. Automatic fault detection in grid-connected photovoltaic systems via variational autoencoder-based monitoring. **Energy Conversion and Management**, v. 314, p. 118665, ago. 2024.

HIRSCH, J. E.; BUELA-CASAL, G. The meaning of the h-index. **International Journal of Clinical and Health Psychology**, v. 14, n. 2, p. 161–164, maio 2014.

ISO, 1990. ISO 9060:1990: Specification and Classification of Instruments for Measuring Hemispherical Solar and Direct Solar Radiation. Geneva, Switzerland. 9060:1990.

JANKAUSKAS, M. et al. The Impact of the Weather Forecast Model on Improving AI-Based Power Generation Predictions through BiLSTM Networks. **Electronics**, v. 13, n. 17, p. 3472, 1 set. 2024.

JIN, T.; YU, Y.; ELSAYED, E. Reliability and quality control for distributed wind/solar energy integration: a multi-criteria approach. **IIE Transactions**, v. 47, n. 10, p. 1122–1138, 3 out. 2015.

KOUTROULIS, E.; BLAABJERG, F. **Design optimization of transformerless grid-connected PV inverters including reliability**. 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). **Anais...** Em: 2012 IEEE APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION - APEC 2012. Orlando, FL, USA: IEEE, fev. 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6166091/>>. Acesso em: 19 dez. 2024

LIMA, P. D. T. D.; MARIANO NETO, M.; ABRAHÃO, R. Análise dos processos de avaliação de impacto ambiental em usinas fotovoltaicas no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 3, p. 1260–1273, 13 jun. 2022.

LIU, X.; ZHANG, L.; HONG, S. Global biodiversity research during 1900–2009: a bibliometric analysis. **Biodiversity and Conservation**, v. 20, n. 4, p. 807–826, abr. 2011.

LORNEZHAD, E.; EBRAHIMI, H.; RABIEIFAR, H. R. Analysis of precipitation and drought trends by a modified Mann–Kendall method: a case study of Lorestan province, Iran. **Water Supply**, v. 23, n. 4, p. 1557–1570, 1 abr. 2023.

MAKA, A. O. M.; ALABID, J. M. Solar energy technology and its roles in sustainable development. **Clean Energy**, v. 6, n. 3, p. 476–483, 1 jun. 2022.

MAULUD, D.; ABDULAZEEZ, A. M. A Review on Linear Regression Comprehensive in Machine Learning. **Journal of Applied Science and Technology Trends**, v. 1, n. 2, p. 140–147, 31 dez. 2020.

MEDEIROS, S. E. L. et al. Influence of climatic variability on the electricity generation

potential by renewable sources in the Brazilian semi-arid region. **Journal of Arid Environments**, v. 184, p. 104331, jan. 2021.

MELLIT, A.; TINA, G. M.; KALOGIROU, S. A. Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 1–17, ago. 2018.

MILOCA, S. A. et al. Expansion planning problem in distribution systems with reliability evaluation: An application in real network using georeferenced database. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 70, p. 9–16, set. 2015.

MOHSIN, S. M.; MAQSOOD, T.; MADANI, S. A. Solar and Wind Energy Forecasting for Green and Intelligent Migration of Traditional Energy Sources. **Sustainability**, v. 14, n. 23, p. 16317, 6 dez. 2022.

MOISE TSAYEM DEMAZE. Le protocole de Kyoto, le clivage Nord-Sud et le défi du développement durable. p. 139–156, 2009.

MUSAH, A. et al. An Evaluation of the OpenWeatherMap API versus INMET Using Weather Data from Two Brazilian Cities: Recife and Campina Grande. **Data**, v. 7, n. 8, p. 106, 30 jul. 2022.

NEGM, A.; MINACAPILLI, M.; PROVENZANO, G. Downscaling of American National Aeronautics and Space Administration (NASA) daily air temperature in Sicily, Italy, and effects on crop reference evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, v. 209, p. 151–162, out. 2018.

NETO, A. A. A.; LOPES, F. V.; ABRAHÃO, R. **Assessing the Impact of Inverter Failures on the Efficiency of Photovoltaic Generators**. 2024 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS). **Anais...** Em: 2024 WORKSHOP ON COMMUNICATION NETWORKS AND POWER SYSTEMS (WCNPS). Brasília, Brazil: IEEE, 12 dez. 2024. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10814549/>>. Acesso em: 26 jan. 2025

NOBRE, P. et al. Solar smart grid as a path to economic inclusion and adaptation to climate change in the Brazilian Semiarid Northeast. **International Journal of Climate Change Strategies and Management**, v. 11, n. 4, p. 499–517, 19 ago. 2019.

OLIVEIRA, A. T. E. D. et al. A energia solar fotovoltaica: transformação, evolução, aspectos ambientais e abordagens na sala de aula. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, p. e25811932533, 20 jul. 2022.

OSMAN, A. I. et al. Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 21, n. 2, p. 741–764, abr. 2023.

PEARSALL, N. M. Introduction to photovoltaic system performance. Em: **The Performance of Photovoltaic (PV) Systems**. [s.l.] Elsevier, 2017. p. 1–19.

PHAM, M.-H. et al. A Study on the Impact of Various Meteorological Data on the Design Performance of Rooftop Solar Power Projects in Vietnam: A Case Study of Electric Power

University. **Energies**, v. 15, n. 19, p. 7149, 28 set. 2022.

PIDGEON, N. Public understanding of, and attitudes to, climate change: UK and international perspectives and policy. **Climate Policy**, v. 12, n. sup01, p. S85–S106, set. 2012.

PIETRAS-SZEWCZYK, M. Generate real total radiation spatial distribution of solar radiation using cloud mask algorithm: Generowanie rozkładu przestrzennego rzeczywistego promieniowania całkowitego z wykorzystaniem algorytmu cloud mask. **Geomatics and Environmental Engineering**, v. 11, n. 2, p. 41, 2017.

PILLAI, D. S.; RAJASEKAR, N. A comprehensive review on protection challenges and fault diagnosis in PV systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 18–40, ago. 2018.

PINTO, A. C.; SILVA FILHO, T. G. D.; MACHADO, E. P. Evaluation of Photovoltaic Microgeneration Systems Connected to Utility: Cases Studies in Petrolina. **IEEE Latin America Transactions**, v. 18, n. 09, p. 1538–1546, set. 2020.

POLO, J.; ZARZALEJO, L. F.; RAMÍREZ, L. Solar Radiation Derived from Satellite Images. Em: BADESCU, V. (Ed.). **Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 449–462.

PRITCHARD, ALAN. Statistical bibliography or bibliometrics. p. 348, 1969.

RIGOBERTO MOREIRA DE MATOS, P. R. M. F.; DJAIL SANTOS, R. M. DE M. Classificação Climática de Köppen e Thornthwaite para o Estado da Paraíba. p. 1006–1016, 2015.

RISTOW, A. et al. Development of a Methodology for Improving Photovoltaic Inverter Reliability. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 55, n. 7, p. 2581–2592, jul. 2008.

RODRIGUES, C.; GODOY VIERA, A. F. Estudos bibliométricos sobre a produção científica da temática Tecnologias de Informação e Comunicação em bibliotecas. **InCID: Revista de Ciência da Informação e Documentação**, v. 7, n. 1, p. 167–180, 5 abr. 2016.

ROLIM, G. D. S. et al. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 66, n. 4, p. 711–720, 2007.

ROY, S. et al. Photovoltaic Inverter Failure Mechanism Estimation Using Unsupervised Machine Learning and Reliability Assessment. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 73, n. 3, p. 1418–1432, set. 2024.

RUDNIAK, J. Comparison of local solar radiation parameters with data from a typical meteorological year. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 16, p. 100465, maio 2020.

SADIO, A. et al. Analysis of Meteorological Data for applications in Ngoundiane's Site. **EAI Endorsed Transactions on Collaborative Computing**, v. 3, n. 12, p. 153168, 9 out.

2017.

SANDÉN, B. A.; AZAR, C. Near-term technology policies for long-term climate targets—economy wide versus technology specific approaches. **Energy Policy**, v. 33, n. 12, p. 1557–1576, ago. 2005.

ŠAŠAK, J. et al. Combined Use of Terrestrial Laser Scanning and UAV Photogrammetry in Mapping Alpine Terrain. **Remote Sensing**, v. 11, n. 18, p. 2154, 16 set. 2019.

SAUER, K. J.; ROESSLER, T.; HANSEN, C. W. Modeling the Irradiance and Temperature Dependence of Photovoltaic Modules in PVsyst. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 5, n. 1, p. 152–158, jan. 2015.

SAWADOGO, W.; ABIODUN, B. J.; OKOGBUE, E. C. Impacts of global warming on photovoltaic power generation over West Africa. **Renewable Energy**, v. 151, p. 263–277, maio 2020.

SENGUPTA, M. et al. **Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Third Edition**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.osti.gov/servlets/purl/1778700/>>. Acesso em: 13 mar. 2025.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. **Solar Energy**, v. 83, n. 5, p. 614–624, maio 2009.

SURI, M. et al. Geographic Aspects of Photovoltaics in Europe: Contribution of the PVGIS Website. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 1, n. 1, p. 34–41, mar. 2008.

TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRÍGUEZ, P. **Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems**. 1. ed. [s.l.] Wiley, 2011.

TOPYLKO, P.; PENYAK, I.; LYBINSKY, B. **An Approach for the Spatial Analysis of Solar Energy Potential: A Case Study for Lviv Region**. 2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). **Anais...** Em: 2018 IEEE 13TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCES AND INFORMATION TECHNOLOGIES (CSIT). Lviv: IEEE, set. 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8526697/>>. Acesso em: 19 dez. 2024

TRIKI-LAHIANI, A.; BENNANI-BEN ABDELGHANI, A.; SLAMA-BELKHODJA, I. Fault detection and monitoring systems for photovoltaic installations: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2680–2692, fev. 2018.

URRACA, R. et al. Quality control of global solar radiation data with satellite-based products. **Solar Energy**, v. 158, p. 49–62, dez. 2017.

WANG, C.-N.; DANG, T.-T.; NGUYEN, N.-A.-T. Location Optimization of Wind Plants Using DEA and Fuzzy Multi-Criteria Decision Making: A Case Study in Vietnam. **IEEE Access**, v. 9, p. 116265–116285, 2021.

WANG, Z.; FAN, W. Economic and environmental impacts of photovoltaic power with the declining subsidy rate in China. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 87, p. 106535, mar. 2021.

WHITE, J. W. et al. Evaluation of NASA satellite- and assimilation model-derived long-term daily temperature data over the continental US. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 10, p. 1574–1584, set. 2008.

WOLOSZYN, M. et al. The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system with the moisture-buffering capacity of materials on indoor climate and energy efficiency of buildings. **Building and Environment**, v. 44, n. 3, p. 515–524, mar. 2009.

YU, B.; FANG, D.; MENG, J. Analysis of the generation efficiency of disaggregated renewable energy and its spatial heterogeneity influencing factors: A case study of China. **Energy**, v. 234, p. 121295, nov. 2021.

ZHANG, P.; YAN, F.; DU, C. A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on bibliometrics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 88–104, ago. 2015.