



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



ILLANA THAYNÁ AMARAL DE FREITAS

**EVENTOS DE SUPERIRRADIÂNCIA NO NORDESTE
BRASILEIRO E SUA INFLUÊNCIA NA PRODUÇÃO
FOTOVOLTAICA**

JOÃO PESSOA - PB
2023

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / N° XX

ILLANA THAYNÁ AMARAL DE FREITAS

**EVENTOS DE SUPERIRRADIÂNCIA NO NORDESTE BRASILEIRO E SUA
INFLUÊNCIA NA PRODUÇÃO FOTOVOLTAICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Meio Ambiente, Economia e Aproveitamento Energético para a obtenção do título de Mestre.

Orientador
Prof. Dr. Raphael Abrahão

**JOÃO PESSOA - PB
2023**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F866e Freitas, Illana Thayná Amaral de.

Eventos de superirradiância no Nordeste brasileiro e sua influência na produção fotovoltaica / Illana Thayná Amaral de Freitas. - João Pessoa, 2023.

83 f.

Orientação: Raphael Abrahão.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Energia solar. 2. Usinas fotovoltaicas. 3. Impactos climáticos. 4. Irradiância solar. I. Abrahão, Raphael. II. Título.

UFPB/BC

CDU 502.21:523.9(043)

“É justo que muito custe o que muito vale”
(Santa Tereza D’Avila).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado força e coragem para enfrentar todos os desafios desta jornada.

Agradeço aos meus pais, Josenilda Amaral e Edmilson Luiz, por todo incentivo e apoio nos momentos difíceis. Ao meu noivo, Kleryson Sanderson, pelas palavras de incentivo que me ajudaram a chegar até este momento.

Um agradecimento especial ao meu orientador Prof. Dr. Raphael Abrahão por toda paciência e suporte para realização da pesquisa.

A CAPES, agradeço pelo auxílio financeiro.

RESUMO

A irradiância solar que atinge a superfície no Nordeste brasileiro possui constância e intensidade suficiente para a operação de usinas fotovoltaicas (FV) na região. No entanto, fenômenos de superirradiância, comuns em muitos lugares do mundo, mas pouco estudados na literatura, podem causar impactos e comprometer o desempenho dos sistemas FV. O presente estudo teve como objetivo geral investigar a ocorrência de eventos de superirradiância e superirradiância extrema no Nordeste brasileiro e seus impactos na produção FV. Uma revisão bibliográfica dos impactos gerados pelos eventos é apresentada neste estudo. As metodologias desenvolvidas consistiram na aplicação dos critérios de identificação de eventos presentes na literatura utilizando três bases de dados: do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), do Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e dados de produção real da Usina Escola também da UFPB. Os resultados mostraram que a superirradiância ocorrem durante o ano todo na região Nordeste; no entanto eventos extremos são comuns no verão. A correlação da distribuição mensal da superirradiância nas estações do INPE com algumas variáveis climatológicas mostraram que a precipitação e a nebulosidade se associam positivamente a meses com mais eventos registrados. Os eventos de superirradiância e superirradiância extrema identificados nas estações do INPE tiveram duração média de 1 a 2 minutos. Em João Pessoa-PB, foram identificados 229 eventos extremos durante os meses analisados. Os impactos dos eventos foram constatados na elevação da temperatura do inversor, aumento da potência instantânea e na corrente dos módulos conectados ao inversor. Com os estudos realizados, foi possível aprofundar mais na compreensão sobre a sazonalidade, duração e intensidade dos eventos de superirradiância no Nordeste brasileiro, como também na influência da superirradiância em inversores FV em real operação.

Palavras-chave: Irradiância solar; Energia; Impactos climáticos; Produção FV.

ABSTRACT

The solar irradiance that reaches the surface in the Brazilian Northeast has sufficient constancy and intensity for the operation of photovoltaic (PV) plants in the region. However, superirradiance phenomena, common in many places in the world, but little studied in the literature, can cause impacts and compromise the performance of PV systems. The present study aimed to investigate the occurrence of superirradiance and extreme superirradiance events in Northeast Brazil and their impacts on PV production. A bibliographic review of the impacts generated by the events is presented in this study. The methodologies developed consisted of applying the criteria for identifying events present in the literature using three databases: the National Institute for Space Research (INPE), the Center for Alternative and Renewable Energies (CEAR) of the Federal University of Paraíba (UFPB) and actual production data from Usina Escola also from UFPB. The results showed that superirradiance occurs throughout the year in the Northeast region; however extreme events are common in the summer. The correlation of the monthly distribution of superirradiance at INPE stations with some climatological variables showed that precipitation and cloudiness are positively associated with months with more registered events. The superirradiance and external superirradiance events identified at the INPE stations had an average duration of 1 to 2 minutes. In João Pessoa-PB, 229 extreme events were identified during the analyzed months. The impacts of the events were verified in the increase of the temperature of the inverter, increase in the instantaneous power and in the current of the modules connected to the inverter. With the studies carried out, it was possible to deepen our understanding of the seasonality, duration and intensity of superirradiance events in Northeast Brazil, as well as the influence of superirradiance on PV inverters in real operation.

Keywords: Solar irradiance; Energy; Climate impacts; PV production.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1. Evolução temporal da quantidade de artigos publicados com ênfase em eventos de superirradiância e seus impactos nos sistemas fotovoltaicos | 21 |
| Figura 2.2. Comparação da quantidade de citações entre a Web of Science e Scopus para artigos publicados sobre eventos de superirradiância e seus impactos nos sistemas fotovoltaicos | 22 |
| Figura 2.3. Quantidade de artigos publicados por periódicos sobre eventos de superirradiância e seus impactos nos sistemas fotovoltaicos | 24 |
| Figura 2.4. a) Interação do feixe solar com uma nuvem. Fonte: Yordanov, Saetre e Midtgård (2013). b) Perfil de um dia com vários eventos de superirradiância para João Pessoa-Paraíba em 24/01/2023 | 26 |
| Figura 3.1. Localização das estações solarimétricas da Rede SONDA-INPE no Nordeste brasileiro | 42 |
| Figura 3.2. Piranômetros das estações: a) Caicó, b) Natal, c) Petrolina e d) São Luís .. | 42 |
| Figura 3.3. Distribuição mensal da irradiação global horária nas estações: a) Caicó, b) Natal, c) Petrolina e d) São Luís..... | 46 |
| Figura 3.4. Perfil diário (31/01/2008) de GHI medida, estimada e Constante Solar na estação Natal com pico máximo de superirradiância medida de 1575 W/m^2 | 51 |
| Figura 3.5. Perfil diário dos horários de ocorrências dos eventos de superirradiância para as quatro estações durante o período analisado..... | 52 |
| Figura 4.1. Estação meteorológica do CEAR-UFPB localizada no Campus I (João Pessoa)..... | 60 |
| Figura 4.2. Modelo de câmera Ocellus All-Sky | 61 |
| Figura 4.3. Usina Escola da UFPB localizada na Unidade Mangabeira (João Pessoa) . | 62 |
| Figura 4.4. Quantidade de eventos de superirradiância extrema por intervalos de irradiação para a cidade de João Pessoa-Paraíba no período de 01 de janeiro a 30 de abril de 2023 | 63 |
| Figura 4.5. Perfil diário de irradiação solar com destaque para eventos de superirradiância extrema nos dias: a) 10 de fevereiro de 2023; b) 04 de março de 2023 em que GHI é a irradiação global horizontal medida na superfície, ETH é a irradiação extraterrestre | 65 |
| Figura 4. 6. Sequência de eventos de superirradiância extrema registrados entre 10:30 e 12:20 horas do dia 04 de março de 2023 pela câmera All-Sky com destaque para | |

imagem das 11:46:23 no qual foi observado a maior intensidade do feixe de luz que provocou um reflexo exagerado na imagem..... 66

Figura 4.7. a) Potência instantânea e b) Temperatura interna do inversor do sistema fotovoltaico no dia 10 de fevereiro de 2023 na cidade de João Pessoa..... 67

Figura 4.8. a) Potência instantânea e b) Temperatura interna do inversor do sistema fotovoltaico no dia 04 de março de 2023 na cidade de João Pessoa 67

Figura 4.9. Tensão nos módulos fotovoltaicos (PV) conectados ao inversor: a) Dia 10 de fevereiro de 2023 e b) Dia 04 de março de 2023 na cidade de João Pessoa 68

Figura 4.10. Correntes dos módulos fotovoltaicos (PV) conectados ao inversor: a) Dia 10 de fevereiro de 2023 e b) Dia 04 de março de 2023 na cidade de João Pessoa..... 68

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1. Classificação por ordem alfabética dos artigos da revisão bibliográfica..... | 22 |
| Tabela 2.2. Fator de impacto dos periódicos encontrados na revisão bibliográfica realizada..... | 25 |
| Tabela 2.3. Tabela síntese da revisão bibliográfica sobre eventos de superirradiância e seus impactos em sistemas fotovoltaicos..... | 33 |
| Tabela 3.1. Localização geográfica das estações da Rede SONDA-INPE no Nordeste brasileiro, contendo latitude, longitude, altitude, tipo climático e anos disponíveis..... | 43 |
| Tabela 3.2. Número de eventos de superirradiância e superirradiância extrema detectados para cada estação nos períodos analisados..... | 47 |
| Tabela 3.3. Distribuição mensal de eventos de superirradiância e superirradiância extrema para 4 estações do Nordeste brasileiro durante os períodos analisados..... | 48 |
| Tabela 3.4. Resultados da correlação entre eventos de superirradiância e precipitação, insolação e nebulosidade mensais para 4 estações do Nordeste brasileiro, usando o coeficiente de Spearman (ρ)..... | 49 |
| Tabela 3.5. Duração em minutos dos eventos de superirradiância, irradiância média e irradiância máxima registrados em cada período, para as 4 localidades..... | 50 |
| Tabela 4.1. Localização geográfica da estação meteorológica do CEAR-UFPB localizada no Campus I (João Pessoa)..... | 60 |
| Tabela 4.2. Localização geográfica da Usina Escola da UFPB localizada na Unidade Mangabeira (João Pessoa, Paraíba)..... | 62 |
| Tabela 4.3. Quantidade de dias e número de eventos de superirradiância extrema separados por mês para a cidade de João Pessoa-Paraíba entre os dias 01 de janeiro a 30 de abril de 2023..... | 64 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|--------|---|
| CE | Cloud Enhancement |
| CEAR | Centro de Energias Alternativas e Renováveis |
| ETH | Irradiância Horizontal Extraterrestre |
| FV | Fotovoltaico |
| GHI | Irradiância Global Horizontal |
| INMET | Instituto Nacional de Meteorologia |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| IRENA | International Renewable Energy Agency |
| LABREN | Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia |
| PB | Paraíba |
| SONDA | Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais |
| STC | Standard Test Conditions |
| UFPB | Universidade Federal da Paraíba |
| WOS | Web of Science |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 1 | 14 |
| 1.1 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO | 14 |
| 1.2 INTRODUÇÃO GERAL | 14 |
| 1.3 OBJETIVOS | 16 |
| 1.3.1 Objetivo Geral | 16 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos | 16 |
| CAPÍTULO 2 | 17 |
| 2. ARTIGO: EVENTOS DE SUPERIRRADIÂNCIA E SEUS IMPACTOS NOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 2.1 INTRODUÇÃO | 18 |
| 2.2 METODOLOGIA | 19 |
| 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 20 |
| 2.3.1 Aprimoramento de nuvens, superirradiância e superirradiância extrema | 25 |
| 2.3.2 Identificação de eventos de superirradiância | 26 |
| 2.3.3 Impactos da superirradiância em sistemas FV | 27 |
| 2.3.4 Métodos de análise de superirradiância | 28 |
| 2.3.5 Resolução ideal para identificação de eventos de superirradiância | 30 |
| 2.3.6 Dimensionamento de geradores FV | 31 |
| 2.3.7 Desempenho de modelos e equipamentos | 31 |
| 2.4 CONCLUSÃO | 32 |
| 2.5 REFERÊNCIAS | 33 |
| CAPÍTULO 3 | 39 |
| 3. ARTIGO: IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL NO NORDESTE BRASILEIRO COM CRITÉRIOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE EVENTOS DE SUPERIRRADIÂNCIA E SUPERIRRADIÂNCIA EXTREMA | 39 |
| 3.1 INTRODUÇÃO | 40 |
| 3.2 METODOLOGIA | 41 |
| 3.2.1 Dados de irradiância global horizontal | 41 |
| 3.2.2 Métodos de identificação de superirradiância e superirradiância extrema | 44 |
| 3.2.3 Correlação entre eventos de superirradiância e variáveis meteorológicas | 44 |
| 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 45 |
| 3.4 CONCLUSÃO | 52 |
| 3.5 REFERÊNCIAS | 53 |

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 4 | 56 |
| 4. ARTIGO: IMPACTOS DA SUPERIRRADIÂNCIA E SUPERIRRADIÂNCIA EXTREMA NA PRODUÇÃO FOTOVOLTAICA DE USINA EM OPERAÇÃO NA CIDADE DE JOÃO PESSOA-PARAÍBA..... | 56 |
| 4.1 INTRODUÇÃO | 57 |
| 4.2 METODOLOGIA | 58 |
| 4.2.1 Método de identificação de superirradiância extrema..... | 58 |
| 4.2.2 Dados de irradiância global horizontal medidos em superfície | 60 |
| 4.2.3 Imagens do céu..... | 61 |
| 4.2.4 Dados do sistema fotovoltaico | 61 |
| 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 62 |
| 4.4 CONCLUSÃO | 69 |
| 4.5 REFERÊNCIAS..... | 70 |
| CAPÍTULO 5 | 74 |
| 5.1 CONCLUSÕES GERAIS | 74 |
| REFERÊNCIAS DE TODA A DISSERTAÇÃO | 76 |

CAPÍTULO 1

1.1 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada em formato de capítulos, sendo os principais constituídos por artigos e apresentados pela seguinte estrutura:

- Capítulo 1: traz a estrutura da dissertação, apresenta a introdução geral do tema, objetivo geral e os objetivos específicos da dissertação.
- Capítulo 2: artigo de revisão bibliográfica sobre os eventos de superirradiância e os impactos desses eventos em sistemas fotovoltaicos.
- Capítulo 3: artigo sobre a irradiância solar global no Nordeste brasileiro com critérios de identificação de eventos de superirradiância e superirradiância extrema.
- Capítulo 4: aborda sobre os eventos de superirradiância e superirradiância extrema em João Pessoa-Paraíba e os impactos em uma usina solar fotovoltaica em operação.
- Capítulo 5: apresenta as conclusões gerais do trabalho. Em seguida, são detalhadas as referências gerais do trabalho.

1.2 INTRODUÇÃO GERAL

O uso de energias renováveis tem sido expandido com o passar dos anos. Além de grandes usinas fotovoltaicas (FV), a possibilidade de aquisição de pequenas unidades geradoras por consumidores comuns tem aumentado a presença da energia solar na

matriz elétrica brasileira (EPE, 2022). Com isso, a fabricação de módulos FV a partir de técnicas já conhecidas e o desenvolvimento de novas técnicas têm impulsionado uma maior gama de tipos de módulos.

As condições ambientais nas quais os módulos trabalham podem influenciar o seu tempo de vida útil. Estima-se que em geral esteja entre 20 e 30 anos (KEMPE, 2010; SINHA *et al.*, 2021). A combinação entre temperaturas elevadas, umidade alta e maior distribuição de irradiância pode levar a contrastes no resultado operacional dos módulos (DO NASCIMENTO *et al.*, 2020).

Eventos extremos de irradiância são descritos na literatura como *overirradiance*, em português superirradiância, ou então como *cloud enhancement* (CE), em tradução aprimoramento de nuvens. Seus efeitos sobre sistemas fotovoltaicos podem levar a subestimativas no dimensionamento de cabos, equipamentos e dispositivos de proteção, especialmente a proteção de sobrecorrente (YORDANOV *et al.*, 2013a; ALMEIDA; ZILLES; LORENZO, 2014).

Alguns autores atribuem a superirradiância ao forte espalhamento frontal da luz nas laterais das nuvens, dentro de um ângulo estreito ao redor do disco solar (YORDANOV *et al.*, 2013a). Outros artigos afirmam que a reflexão da irradiância solar nas bordas das nuvens do tipo cumulus ao redor do disco solar são capazes de gerar os eventos extremos (ZEHNER *et al.*, 2010; ZEHNER *et al.*, 2011; ALMEIDA; ZILLES; LORENZO, 2014).

O Nordeste brasileiro pode ser uma região favorável a ocorrência de superirradiância, pois valores mais altos de irradiância global são normalmente alcançados ao meio dia e nos períodos de baixa nebulosidade, condições típicas do verão na região (TIBA; SILVA LEAL, 2017).

Além disso, alguns autores acreditam que eventos de superirradiância na ordem de segundos a minutos podem causar impactos severos em sistemas fotovoltaicos (RUTHER *et al.*, 2017). Como apontado em Do Nascimento et al. (2019), durante um evento de superirradiância com valores superiores a 1500 W/m² com duração superior a cinco minutos, o fusível explodiu.

Alguns estudos consideram que o tempo de aquisição de dados para uma análise precisa do evento deve ser na ordem de milissegundos devido a duração momentânea dos eventos (YORDANOV; SAETRE; MIDTGÅRD, 2013), enquanto outros afirmam que dados de segundos a minutos fornecem uma boa estimativa (DO NASCIMENTO *et al.*, 2019).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da dissertação foi identificar eventos de superirradiância no Nordeste brasileiro e avaliar seus impactos na produção fotovoltaica por meio de dados de usina em real operação.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre os eventos de superirradiância presentes na literatura, como ocorre a identificação e de que forma podem causar impactos em sistemas fotovoltaicos.
- Caracterizar a irradiância solar global em estações solarimétricas no Nordeste brasileiro e os critérios de identificação de superirradiância e superirradiância extrema.
- Compreender a influência dos eventos de superirradiância e superirradiância extrema em usina solar em funcionamento no Nordeste brasileiro.

CAPÍTULO 2

2. ARTIGO: EVENTOS DE SUPERIRRADIÂNCIA E SEUS IMPACTOS NOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Resumo: A participação da energia fotovoltaica (FV) na matriz elétrica mundial tem aumentado ao longo dos últimos anos. Embora os sistemas FV estejam sendo desenvolvidos para operar independentes das condições meteorológicas, o fenômeno da superirradiância provocado pelo aprimoramento da irradiância nas bordas das nuvens ainda é pouco pesquisado. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica sobre os eventos de superirradiância e os impactos nos sistemas FV. A metodologia utilizada consistiu em buscas nas bases *Scopus* e *Web of Science*, incluídos somente artigos completos e revisões, sem filtro de período de publicação ou idiomas. No total, foram encontrados 33 artigos, em que os principais impactos negativos associados à superirradiância em sistemas FV foram: potência do inversor acima da potência nominal, queima dos fusíveis dos módulos FV, flutuações na produção, qualidade e perdas de energia. No entanto, um impacto positivo do fenômeno foi encontrado sobre a temperatura de operação dos módulos FV que tende a reduzir, e conseqüentemente, aumentar a eficiência dos módulos durante a passagem da nuvem e o aprimoramento que acontece na borda. Diante do exposto, notou-se que há poucas pesquisas na área e que essas foram publicadas dentro dos últimos 10 anos. São poucos também os artigos que relacionam os eventos aos efeitos em sistemas FV, revelando uma oportunidade para futuras pesquisas nesta temática.

Palavras-chave: Irradiância solar; Energia solar; Nuvens; Módulos Fotovoltaicos.

Abstract: The share of photovoltaic (PV) energy in the world's electricity mix has increased in recent years. Although PV systems are being developed to operate independently of weather conditions, the phenomenon of superradiance caused by the enhancement of irradiance at cloud edges is still little researched. With this in mind, the aim of this study was to carry out a literature review on super-irradiance events and their impact on PV systems. The methodology used consisted of searches in the *Scopus* and *Web of Science* databases, including only full articles and reviews, without filtering for publication period or languages. A total of 33 articles were found, in which the main negative impacts associated with over-radiance in PV systems were: inverter power

above nominal power, PV module fuses blowing, fluctuations in production, quality and energy losses. However, a positive impact of the phenomenon was found on the operating temperature of the PV modules, which tends to reduce and consequently increase the efficiency of the modules during the passage of the cloud and the enhancement that takes place at the edge. In view of the above, it was noted that there is little research in the area and that it has been published within the last 10 years. There are also few articles that relate events to the effects on PV systems, revealing an opportunity for future research on this subject.

Keywords: Solar Irradiance; Solar Energy; Clouds; Photovoltaic Modules.

2.1 INTRODUÇÃO

A urgência nas ações de mitigação das mudanças climáticas tem levado a humanidade a buscar maneiras de reduzir as emissões de gases de efeito estufa na geração de energia, diminuindo a participação de combustíveis fósseis e aumentando a oferta de energia a partir de fontes renováveis. Segundo a International Renewable Energy Agency (IRENA), que disponibiliza um relatório de estatísticas da capacidade renovável mundial, em 2020 as energias renováveis corresponderam a 36,6% da capacidade elétrica mundial e, em 2021, houve um aumento para 38,3%. No que se refere a energia solar fotovoltaica, a capacidade total de 710.281 MW em 2020, cresceu para 843.086 MW no ano seguinte, um aumento de aproximadamente 133 MW (IRENA, 2022).

Embora os módulos fotovoltaicos (FV) sejam equipamentos com vida útil em torno de 20 anos ou mais, a exposição ao calor, umidade, estresse mecânico, alta tensão, ciclo térmico e radiação ultravioleta podem reduzir o tempo de vida útil (KEMPE, 2010). A deposição de poeira contendo quartzo e óxido de cálcio pode contribuir para perda de transmitância que afeta o desempenho dos módulos FV (TANESAB *et al.*, 2015). Tratando-se de degradação de módulos FV por condições ambientais, o clima tropical quente e úmido impulsiona a degradação de módulos mais do que em outros tipos climáticos devido às altas temperaturas e umidade elevada (OMAZIC *et al.*, 2019).

A cobertura de nuvens é responsável pela variabilidade na irradiância solar, seja redução ou aumento, devido à configuração da posição da nuvem (PIEDEHIERRO *et al.*, 2014). Eventos extremos de radiação têm sido pesquisados a muito tempo com ênfase no campo das ciências médicas (NORIS, 1968; URBACH, 1989; DE GRUIJL,

1999). Estudos mais recentes buscam entender a relação entre nuvens e radiação (LOVENGREEN *et al.*, 2005; SABBURG; PARISI, 2006; WEN; MARSHAK; CAHALAN, 2008; FEISTER; CABROL; HADER, 2015).

Tendo em vista a necessidade de entender como a irradiância afeta o desempenho dos componentes dos sistemas FV, especialmente os eventos extremos de irradiância, no presente estudo foi realizada uma revisão bibliográfica com o intuito de caracterizar os eventos extremos e seus efeitos em sistemas FV.

2.2 METODOLOGIA

Uma revisão bibliográfica eficaz deve conter três etapas: 1) Entradas (escolha e triagem da literatura), 2) processamento (definição dos critérios de inclusão e exclusão) e 3) saídas (escrita da revisão de literatura) (LEVY; ELLIS, 2006). Para realização da presente revisão bibliográfica, foi utilizado o Portal de Periódicos da CAPES para acesso às bases de dados Scopus e Web of Science (WOS), assim como Journal Citation Reports (JCR) para avaliar a relevância dos periódicos. A escolha das bases está relacionada a ampla cobertura interdisciplinar, inclusão de todos os tipos de artigos, indicação de todos os autores, endereços institucionais e referências bibliográficas (MONGEON; PAUL-HUS, 2016). Nesse sentido, a questão norteadora deste trabalho foi entender o que são os eventos de superirradiância e seus impactos em sistemas FV.

Na etapa de entrada da revisão bibliográfica, foram realizadas três buscas em cada uma das bases. A razão para realização de buscas em separado deu-se pela quantidade de artigos discrepantes ao tema de estudo quando as buscas combinavam as palavras-chave simultaneamente. Desse modo, optou-se por fazer pesquisas com termos mais específicos.

Na primeira busca, utilizaram-se os descritores “*cloud enhancement*” e “*overirradiance*”. A segunda busca: “*irradiance*”, “*extreme value*” e “*photovoltaic*”. A terceira busca: “*cloud enhancement*” e “*photovoltaic*”. Além do uso do operador booleano AND, também foi adicionado nas buscas na base da WOS o símbolo * nos termos de pesquisa para encontrar palavras com prefixos, sufixos ou plural do descritor utilizado.

As pesquisas nas bases de dados foram feitas por tópicos, ou seja, abrangendo título, resumo e palavras-chave das publicações. Na etapa de processamento, foram aplicados filtros de buscas para incluir somente artigos e revisões, excluindo artigos de

conferência, resumos e duplicatas. Não foram definidos período de busca e idiomas das publicações, de modo que os artigos encontrados englobam toda a literatura disponível.

Para tratamento dos dados obtidos, utilizou-se a ferramenta *Exportar* das bases, que permite armazenar os títulos dos artigos, autores, resumo, palavras-chave, número de citações, data de publicação, periódico e outros parâmetros, em arquivo de formato de texto ou planilha. A pesquisa foi realizada entre julho de 2021 a maio de 2022, com uma última atualização em fevereiro de 2023.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Scopus, foram encontradas 374 publicações, enquanto na Web of Science foram encontradas 87 publicações. Após leitura de título e resumo, as 374 publicações foram reduzidas a um número final de 33 publicações, devido a grande parte dos artigos estarem fora da contextura do trabalho. Grande parte dos artigos eram comuns as duas bases, com exceção de 2 artigos que estavam disponíveis exclusivamente na WOS.

Conforme mencionado na metodologia, optou-se por não filtrar as publicações por tempo para que assim a revisão pudesse contemplar desde os primeiros artigos até os mais atuais. Surpreendentemente, notou-se que as publicações são relativamente recentes, sendo a mais antiga do ano 2012. Isto reafirma o caráter atual do objeto de pesquisa deste estudo, no qual está associado a crescente participação da energia FV na matriz elétrica mundial.

Na Figura 2.1, demonstra-se a evolução temporal da quantidade de artigos publicados. Nota-se que entre os anos 2012 e 2015 a quantidade de publicações era baixa, com no máximo 2 artigos por ano. Entre 2016 e 2019 a média de publicações foi entre 2 e 3 artigos por ano. Somente em 2020 foram totalizados 7 artigos, seguidos por 4 em 2021 e 3 em 2022.

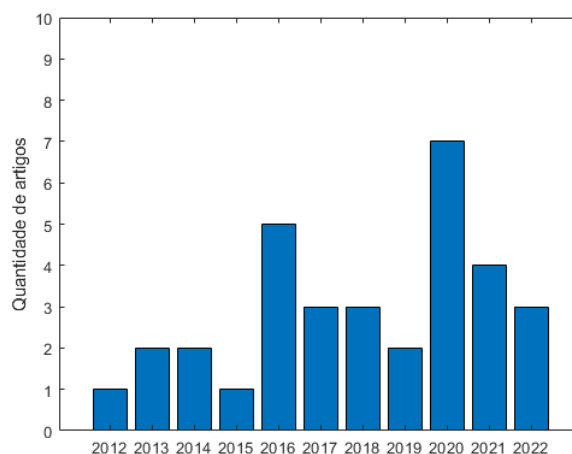


Figura 2.1. Evolução temporal da quantidade de artigos publicados com ênfase em eventos de superirradiância e seus impactos nos sistemas fotovoltaicos

O parâmetro de número de citações é uma medida interessante para analisar a relevância dos artigos encontrados na revisão. Em vista disso, na Figura 2.2 apresenta-se a quantidade de citações de cada artigo em cada base. Cabe ressaltar que a classificação ordinal dos artigos foi feita a partir da ordem alfabética dos títulos das publicações conforme Tabela 2.1. A seguir os artigos mais citados são resumidos brevemente. Uma análise mais aprofundada está disponível a partir da seção 2.3.1.

Nota-se em destaque que o 19º artigo foi o mais citado nas duas bases, com 146 citações na WOS e 165 na Scopus. Este artigo faz uma análise do uso de dados de irradiância global com resolução de 1 minuto na validação de modelos de separação de radiação (GUEYMARD; RUIZ-ARIAS, 2016). Além disso, os autores afirmam que o efeito da superirradiância gera superestimativa na previsão da irradiância direta, uma das componentes da irradiância global. Portanto, modelos de separação de radiação desenvolvidos com dados horários não são projetados para assimilar o fenômeno da superirradiância (GUEYMARD; RUIZ-ARIAS, 2016). Uma das possíveis explicações para o grande volume de citações do referido artigo pode ser devido ao uso de muitas fontes de dados em diversos pontos do mundo e também dos vários modelos testados, o qual permite que outros autores usem como referência em suas próprias pesquisas.

Outro artigo com muitas citações foi o 25º, o qual versa sobre o dimensionamento ótimo para inversores considerando o aprimoramento de nuvens (LUOMA; KLEISSL; MURRAY, 2012). O artigo 11º discute sobre os impactos do aprimoramento de nuvens analisados através de instrumentos de medição (GUEYMARD, 2017a). No 31º artigo, os autores discorrem acerca de um algoritmo

para controle de saída de energia FV (KILLINGER; ENGERER; MÜLLER, 2017). O artigo 16° trata da superirradiância no Mediterrâneo Oriental (TAPAKIS; CHARALAM; BIDES, 2014). No 23° artigo, é apresentada a variabilidade de curto prazo na irradiância solar (LOHMANN; MONAHAN; HIENEMANN, 2016). O 6° artigo realiza uma análise do sombreamento causado por nuvens em movimento (LAPPALAINEN; VALKEALAHTI, 2016a). Por fim, o 29° artigo avalia o desempenho de tecnologias FV em diferentes tipos climáticos brasileiros (DO NASCIMENTO *et al.*, 2020). Observa-se de um modo geral que na Scopus os artigos tendem a ser mais citados do que na WOS.

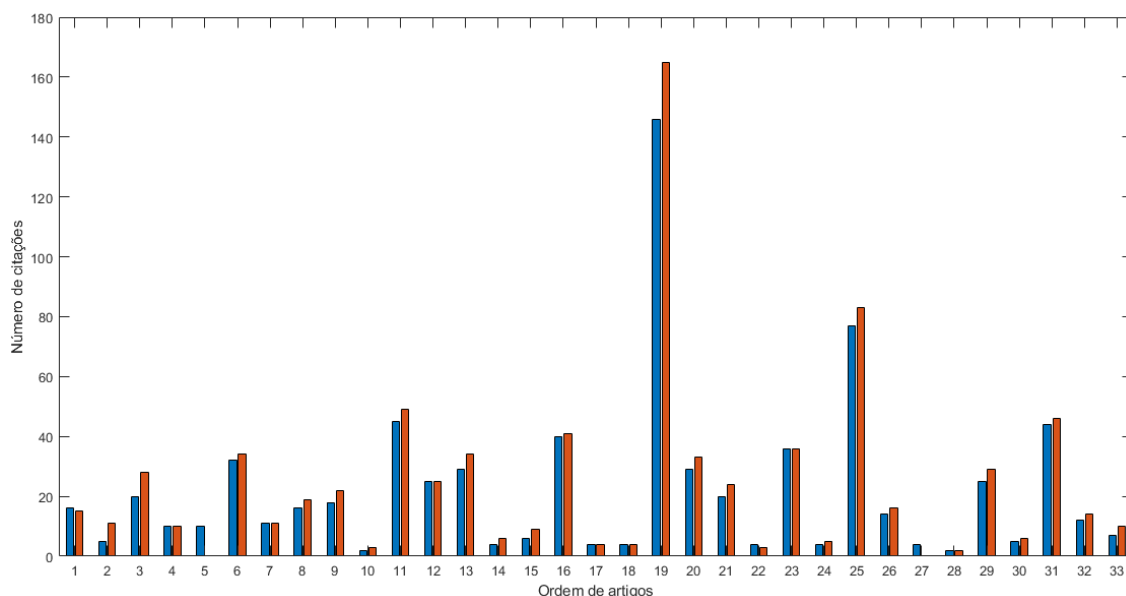


Figura 2.2. Comparação da quantidade de citações entre a Web of Science e Scopus para artigos publicados sobre eventos de superirradiância e seus impactos nos sistemas fotovoltaicos

Tabela 2.1. Classificação por ordem alfabética dos artigos da revisão bibliográfica

| | Título | Autores e ano de publicação |
|---|---|--|
| 1 | 100-millisecond Resolution for Accurate Overirradiance Measurements | YORDANOV; SAETRE; MIDTGÅRD, 2013 |
| 2 | A Low-Cost, Stand-Alone Sensory Platform for Monitoring Extreme Solar Overirradiance Events | CHASE <i>et al.</i> , 2018 |
| 3 | A novel UV sensor-based dual-axis solar tracking system: Implementation and performance analysis | JAMROEN <i>et al.</i> , 2021 |
| 4 | A study of extreme overirradiance events for solar energy applications using NASA's I3RC Monte Carlo radiative transfer model | YORDANOV, 2015 |
| 5 | Analysis of high frequency photovoltaic solar energy fluctuations | KREUWEL <i>et al.</i> , 2020 |

| | | |
|----|--|--|
| 6 | Analysis of shading periods caused by moving clouds | LAPPALAINEN; VALKEALAHTI, 2016a |
| 7 | Analysis of the cloud enhancement phenomenon and its effects on photovoltaic generators based on cloud speed sensor measurements | LAPPALAINEN; KLEISSL, 2020 |
| 8 | Apparent velocity of shadow edges caused by moving clouds | LAPPALAINEN; VALKEALAHTI, 2016b |
| 9 | Characteristics of the cloud enhancement phenomenon and PV power plants | JÄRVELÄ; LAPPALAINEN; VALKEALAHTI, 2020 |
| 10 | Classification of Daily Irradiance Profiles and the Behaviour of Photovoltaic Plant Elements: The Effects of Cloud Enhancement | SANTIAGO <i>et al.</i> , 2021 |
| 11 | Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high-frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. Part 1: Impacts on global horizontal irradiance | GUEYMARD, 2017a |
| 12 | Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. Part 2: Performance of separation and transposition models for global tilted irradiance | GUEYMARD, 2017b |
| 13 | Cloud enhancement of global horizontal irradiance in California and Hawaii | INMAN; CHU; COIMBRA, 2016 |
| 14 | Detection and characterization of cloud enhancement events for solar irradiance using a model-independent, statistically-driven approach | CASTILLEJO- CUBEROS; ESCOBAR, 2020 |
| 15 | Effects of the meteorological data resolution and aggregation on the optimal design of photovoltaic power plants | MAYER, 2021 |
| 16 | Enhanced values of global irradiance due to the presence of clouds in Eastern Mediterranean | TAPAKIS; CHARALAMBIDES, 2014 |
| 17 | Evaluating the performance of radiometers for solar overirradiance events | MARTINS; MANTELLI; RÜTHER, 2022 |
| 18 | Evaluation of enhancement events of global horizontal irradiance due to clouds at Patras, South-West Greece, | VAMVAKAS; SALAMALIKIS; KAZANTZIDIS, 2020 |
| 19 | Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct irradiance predictions from 1-min global irradiance | GUEYMARD; RUIZ- ARIAS, 2016 |
| 20 | Extreme overirradiance events in Sao Paulo, Brazil | ALMEIDA; ZILLES; LORENZO, 2014 |
| 21 | Extreme solar overirradiance events: Occurrence and impacts on utility-scale photovoltaic power plants in Brazil | DO NASCIMENTO <i>et al.</i> , 2019 |
| 22 | Forecasting solar photosynthetic photon flux density under cloud cover effects: novel predictive model using convolutional neural network integrated with long short-term memory network | DEO <i>et al.</i> , 2022 |
| 23 | Local short-term variability in solar irradiance | LOHMANN; MONAHAN; HEINEMANN, 2016 |
| 24 | Operation of a PV Power Plant during Overpower Events Caused by the Cloud Enhancement Phenomenon | JÄRVELÄ; VALKEALAHTI, 2020 |
| 25 | Optimal inverter sizing considering cloud enhancement | LUOMA; KLEISSL; MURRAY, 2012 |
| 26 | Optimization of inverter loading ratio for grid connected photovoltaic systems | DESCHAMPS; RÜTHER, 2019 |
| 27 | Overirradiance (Cloud Enhancement) Events at High Latitudes | YORDANOV, 2013 |
| 28 | Overirradiance effect on the electrical performance of photovoltaic systems of different inverter sizing factors | SCARABELOT; RAMPINELLI; RAMBO, 2021 |
| 29 | Performance assessment of solar photovoltaic technologies under different climatic conditions in Brazil | DO NASCIMENTO <i>et al.</i> , 2020 |
| 30 | Physical process and statistical properties of solar irradiance enhancement observed under clouds | ZHANG <i>et al.</i> , 2018 |
| 31 | QCPV: A quality control algorithm for distributed photovoltaic array power output | KILLINGER; ENGERER; MÜLLER, 2017 |
| 32 | Solar energy on the Tibetan Plateau: Atmospheric influences | GELSOR <i>et al.</i> , 2018 |
| 33 | Solar Energy Production in India and Commonly Used Technologies-An Overview | PANDEY; PANDEY; TUMULURU, 2022 |

Na Figura 2.3 relaciona-se a quantidade de artigos encontrada em cada periódico. Ao total foram 12 periódicos com artigos sobre eventos extremos e seus efeitos em sistemas FV. Em 8 dos periódicos foram, publicados apenas 1 artigo e em 2 periódicos continham 2 artigos. Na Renewable Energy foram publicados 3 artigos. Do total de 33 artigos, 18 foram publicados na Solar Energy. Nenhum artigo foi publicado em periódicos brasileiros.

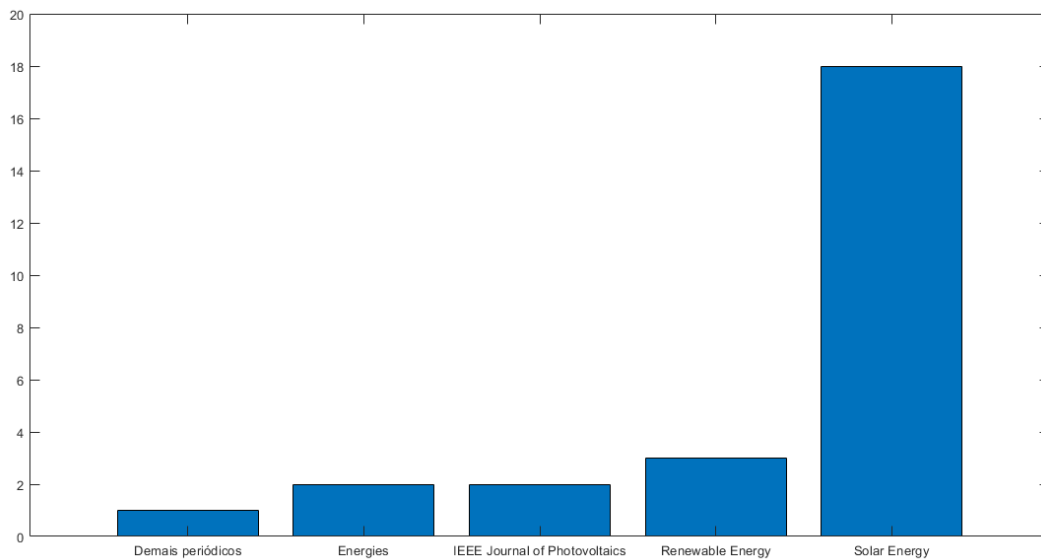


Figura 2.3. Quantidade de artigos publicados por periódicos sobre eventos de superirradiação e seus impactos nos sistemas fotovoltaicos

Com relação à relevância dos periódicos utilizados nesta revisão, na Tabela 2.2 apresenta-se o fator de impacto dos periódicos, em inglês Journal Impact Factor (JIF), com base no mais recente relatório do JCR, publicado em 2021 referente às publicações dos dois anos anteriores. Nesse sentido, analisando o JIF é possível inferir que os periódicos Applied Energy, Energy Conversion and Management, Renewable Energy e Solar Energy foram mais relevantes em relação aos demais.

Tabela 2.2. Fator de impacto dos periódicos encontrados na revisão bibliográfica realizada

| Periódico | JIF |
|---|--------|
| Applied Energy | 11,446 |
| Applied Sciences | 2,839 |
| Atmospheric Chemistry and Physics | 7,197 |
| Energies | 3,252 |
| Energy Conversion and Management | 11,533 |
| IEEE Journal of Photovoltaics | 4,401 |
| Japanese Journal of Applied Physics | 1,491 |
| Journal of Renewable and Sustainable Energy | 2,847 |
| Renewable Energy | 8,634 |
| Sensors | 3,847 |
| Solar Energy | 7,188 |
| Stochastic Environmental Research and Risk Assessment | 3,821 |

Na análise dos 33 artigos selecionados, foi observado que algumas publicações tratavam das definições de aprimoramento de nuvens, superirradiância e superirradiância extrema, totalizando 6 publicações. Em 8 dos artigos selecionados, foi feita uma descrição dos impactos dos eventos de superirradiância em sistemas FV. Outra parte dos artigos propunham métodos de análise de superirradiância (9), resolução ideal para identificar os eventos (5), simulação (2) e desempenho de modelos e equipamentos (3). Alguns artigos se classificavam em mais de um subtema. Nesse sentido, as seções a seguir buscam detalhar os temas encontrados.

2.3.1 Aprimoramento de nuvens, superirradiância e superirradiância extrema

O aprimoramento de nuvens, conhecido na literatura como cloud enhancement está associado à irradiância espalhada pelas bordas de nuvens (ZHANG *et al.*, 2018). Outra hipótese sobre o efeito de nuvens é explicada pelo realce de nuvens fragmentadas que cercam o Sol, mas não o bloqueiam, fazendo com que a irradiação difusa aumente como resultado do forte espalhamento, conforme Figura 2.4 (a) (GELSOR *et al.*, 2018; GUEYMARD, 2017a).

Nesse sentido, a superirradiância é o fenômeno de resposta ao aprimoramento causado pelo realce de nuvens fragmentadas que intensificam a irradiação solar em um determinado local. Esse evento pode ser observado na análise de dados de irradiância

global horizontal (GHI) medida na superfície comparada com o modelo de estimativa de irradiância de céu claro (DO NASCIMENTO *et al.*, 2019).

Além disso, eventos de superirradiância extrema podem ocorrer quando a irradiância global medida excede o valor de irradiância horizontal extraterrestre (ETH) e a estimativa de céu claro (DO NASCIMENTO *et al.*, 2019; GUEYMARD *et al.*, 2017a). Na Figura 2.4 (b) apresenta-se um perfil do dia 24/01/2023 com vários registros de eventos de superirradiância para João Pessoa-Paraíba. A linha em azul corresponde aos valores de GHI medidos em superfície, a linha laranja a GHI estimada para o respectivo dia e localidade e a linha amarela representa a constante solar. Vale destacar que a constante solar varia em função do dia do ano e deslocamento da Terra em relação ao Sol. No entanto, a World Radiation Data Centre recomenda o valor médio de 1367 W/m² (DO NASCIMENTO *et al.*, 2019).

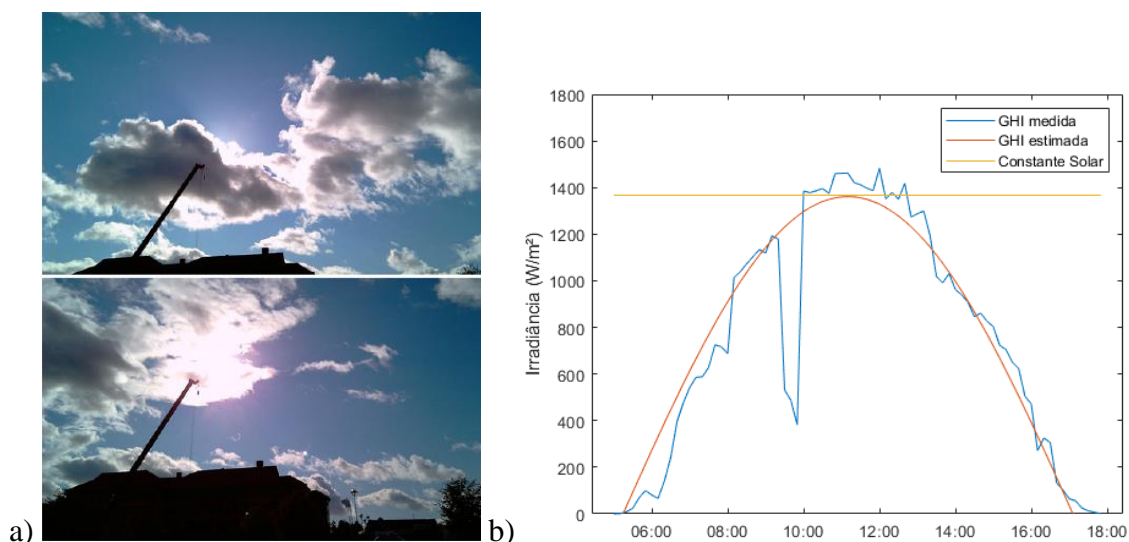


Figura 2.4. a) Interação do feixe solar com uma nuvem. Fonte: Yordanov, Saetre e Midtgård (2013). b) Perfil de um dia com vários eventos de superirradiância para João Pessoa-Paraíba em 24/01/2023

2.3.2 Identificação de eventos de superirradiância

O fenômeno pode acontecer mesmo em latitudes altas, no continente ou em localidades próximas ao mar e dependendo da velocidade de deslocamento das nuvens pode durar de segundos a minutos (YORDANOV *et al.*, 2013; YORDANOV; SAETRE; MIDTGÅRD, 2013).

Na Grécia, foram medidos 66 eventos de superirradiância durante agosto de 2014 e julho de 2016 (VAMVAKAS; SALAMIKIS; KAZANTZIDIS, 2020). Em outro

estudo usando dados de uma estação na ilha de Chipre, na região Mediterrânea Oriental, o máximo valor medido de irradiância global foi de 1533 W/m² (TAPAKIS; CHARALAMBIDES, 2014).

Um estudo com dados da Califórnia e do Havaí (EUA) notou que em média 3,5 dias do ano possuem eventos de superirradiância (IMNAN; CHU; COIMBRA, 2016). Na cidade de São Paulo (Brasil), um evento de superirradiância foi relatado com valor máximo de 1590 W/m² (ALMEIDA; ZILLES; LORENZO, 2014). Segundo Do Nascimento *et al.* (2019), os maiores picos de irradiância registrados no Brasil foram descritos no seu trabalho, até a data da publicação, com máximo de 1845 W/m², 1823 W/m² e 1735 W/m² em Caucaia (CE), Itiquira (MT) e Caetité (BA), respectivamente.

2.3.3 Impactos da superirradiância em sistemas FV

As condições de céu misto, com variação de nebulosidade, aparecem como potencialmente problemáticas em termos de flutuações de energia FV de curto prazo (LOHMANN; MONAHAN; HEINEMANN, 2016). O fenômeno de aprimoramento de nuvens pode levar a potência máxima do gerador fotovoltaico a exceder a potência nominal do inversor (LAPPALAINEN; KLEISSI, 2020).

Do Nascimento *et al.* (2020) avaliaram o desempenho de seis tecnologias FV em oito localidades do Brasil durante os anos de 2013 a 2015. Os autores observaram picos de irradiância superiores a 1600 W/m² com duração de segundos a minutos. Os impactos da superirradiância em períodos superiores a cinco minutos podem levar a queima dos fusíveis dos módulos FV (DO NASCIMENTO *et al.*, 2019).

Pandey, Pandey e Tumuluru (2022), em seu estudo holístico sobre a produção de energia solar na Índia também abordam o fenômeno de sobreirradiância como causador de problemas para os sistemas FV. Os autores destacam que alterações acentuadas de irradiação em grandes sistemas FV ligados a rede podem gerar flutuações rápidas de energia na rede, instabilidade na qualidade, problemas de equilíbrio e perdas de energia. Pequenos sistemas FV são ainda mais suscetíveis a tais problemas.

Scarabelot, Rampinelli e Rambo (2021) compararam o desempenho de dois sistemas FV conectados à rede com diferentes fatores de dimensionamento de inversores na região Sul do Brasil. Através das análises, constataram que a superirradiância altera a corrente elétrica do sistema FV, podendo afetar o funcionamento dos dispositivos de proteção e os conversores CC/CA. Também foi

observada uma sobretemperatura do inversor, cuja temperatura de operação esteve na ordem de 80°C, no qual o valor máximo de referência era de 60°C. Por fim, os autores concluíram que inversores subdimensionados perdem a capacidade de geração de energia elétrica, enquanto o superaquecimento contribui para redução da vida útil dos componentes do sistema.

Por outro lado, um estudo realizado no sul da Espanha evidenciou uma melhor eficiência nos módulos FV em dias de flutuação de irradiância devido ao aprimoramento de nuvens. A explicação para tal afirmação está na lógica de que entre os picos de energia provocados pelas bordas, a cobertura de nuvens gera sombreamento e conseqüentemente uma redução na temperatura dos módulos (SANTIAGO *et al.*, 2021).

Os autores destacam que os módulos podem ser mais eficientes em dias com variações de nuvens, pois há redução da temperatura ambiente e dos módulos, que uma vez associados aos picos de irradiância geram picos de produção de energia. Outro trabalho encontrado sugere que a superirradiância associada a queda de temperatura pode aumentar o desempenho dos módulos FV, podendo a superprodução ser rejeitada ou causar danos a inversores (TAPAKIS; CHARALAMBIDES, 2014).

2.3.4 Métodos de análise de superirradiância

Jamroen *et al.* (2021) sugerem um sistema de rastreamento solar de eixo duplo com uso de sensores de radiação ultravioleta (UV) para otimizar a geração de energia FV, inclusive em dias com condições favoráveis a eventos de superirradiância. Os autores realizaram uma análise comparativa do sistema proposto com outros dois sistemas: sistema fixo de placa plana e um sistema de rastreamento solar com sensores light dependent resistor (LDR) que rastreiam o posicionamento do Sol. Como resultado, o sistema com sensor UV apresentou bom desempenho na geração de energia nas condições favoráveis a superirradiância.

Yordanov (2015) propôs um modelo de transferência radiativa da NASA para estudo de superirradiância. O modelo subestimou em 5 vezes o avanço da dispersão de Mie, uma das explicações para efeito da superirradiância. Isso porque segundo a definição de espalhamento de Mie, quando o raio da partícula atmosférica (molécula de gás, aerossóis, gotículas de água, cristais de gelo e outros) é maior que o comprimento de onda da radiação visível, a energia espalhada torna-se mais concentrada na direção

direta com dispersões mais complexas (LIOU, 2002, p. 7). Além disso, o autor sugere que a superirradiância extrema é uma importante referência que deve ser implementada em modelos de transferência radiativa para testar a teoria de Mie como responsável pela ocorrência do evento.

Considerando que a flutuação de irradiância provocada pelas bordas das nuvens pode levar a falhas no rastreamento do ponto de potência máxima, um método de identificar sombreamento provocado por nuvens em movimento mostrou que o evento pode durar de quatro segundos a 1,5 horas. Os tamanhos das nuvens que causam superirradiância podem ser de alguns m^2 , no qual podem afetar a produção em uma usina FV, causando variabilidade na potência de saída e perdas por incompatibilidade (LAPPALAINEN; VALKEALAHTI, 2016a). Os mesmos autores também propuseram outro modelo para determinar a velocidade aparente da borda das nuvens. Como resultado obtiveram que a velocidade da borda das nuvens varia muito, com valor médio em torno de 9 m/s. Além disso, os autores afirmam que as transições de irradiância são grande o suficiente para afetar usinas FV de todos os tamanhos (LAPPALAINEN; VALKEALAHTI, 2016b).

Järvelä, Lappalainen e Valkealahti (2020) fizeram uma análise da irradiância média com vários piranômetros espalhados em uma área de 1400 m^2 com módulos FV de capacidade instalada 0.1 MW. Posteriormente elaboraram um método para estimar irradiância média para módulos FV de 0.02, 1.00 e 4.00 MW com piranômetros espalhados em áreas de 225, 15.625 e 62.500 m^2 , respectivamente. Os autores constataram que eventos de aprimoramento de nuvens e picos de superirradiância são mais longos nas áreas com mais módulo FV.

Castillejo-Cuberos e Escobar (2020) propuseram um modelo baseado na estatística de eventos anteriores para detecção de novos eventos utilizando dados medidos *in situ* ao invés de índices pré-estabelecidos na literatura, como radiação extraterrestre, constante solar e modelo de céu claro. Os autores obtiveram uma boa correlação, a nível diário, usando o índice de céu claro e média local, além de redução de falsos positivos em situações de ângulo solar baixo. Entende-se por falsos positivos os valores superiores aos estimados pelo modelo de irradiância diária, principalmente em momentos onde a inclinação solar é baixa, ou seja, nas horas próximas do nascer e pôr do Sol.

Deo *et al.* (2022) criaram modelos de previsão de radiação solar a partir de imagens do céu para avaliar o efeito das nuvens através de rede neural a longo prazo. Os

modelos apresentaram bons resultados na análise estatística de correlação e erros, podendo ser aplicado não somente à previsão do recurso solar, como também em prevenção do câncer de pele e aplicações ambientais.

Além disso, metodologias para estimativa de dimensionamento de inversores considerando perdas de sobrecargas e aspectos econômicos para o Nordeste brasileiro também podem ser encontradas na literatura. A taxa de carregamento de inversores, em inglês inverter loading ratios (ILR), mostrou perdas por sobrecargas entre 0,3% e 2,4%, dessa forma recomendou-se a utilização de IDR em 5% para a região Nordeste se comparado a estudos em outras regiões do Brasil (DESCHAMPS; RUTHER, 2019).

Métodos para parametrizar e garantir a qualidade das medições de dados de sistemas FV por meio da irradiância extraterrestre e modelo de céu claro também foram propostos. Esse tipo de estudo permite a detecção de eventos de aprimoramento de nuvens, extração do azimute e inclinação do sistema FV, além do fator de perda baseado em uma série temporal de medição de energia (KILLINGER; ENGERER; MÜLLER, 2017).

2.3.5 Resolução ideal para identificação de eventos de superirradiância

Yordanov, Saetre e Mitgård (2013) propuseram que dados na ordem de milissegundos eram ideais para identificação de eventos de superirradiância, tendo em vista que o tempo de resposta de pirômetros de termopilha podem suavizar os picos de irradiância. No entanto, essa resolução quase não é adotada devido aos altos custos de equipamentos com tal aquisição de dados e a grande quantidade de dados que dificulta seu processamento (DO NASCIMENTO *et al.*, 2019). Nenhum trabalho encontrado sugeriu aquisição de dados a partir de taxa de amostragem variável.

Kreuwel *et al.* (2020) apontam que a resolução de 15 minutos usada para cálculos subestima a dinâmica dos picos de irradiância, sendo a melhor resolução na ordem de segundos para estudar a superirradiância. Em Mayer (2021), a superirradiância é suprimida em conjunto de dados de irradiância com baixa resolução. Em modelos de previsão de irradiação solar global e direta com dados de 1 minuto, os efeitos da superirradiância podem ser superestimados (GUEYMARD; RUIZ-ARIAS, 2016).

2.3.6 Dimensionamento de geradores FV

Järvelä e Valkealahti (2020) criaram um modelo de simulação de gerador fotovoltaico de 31,9 kW para analisar sua operação durante eventos de superirradiância. Foram observadas potências máximas 1,4 vezes maiores do que a potência nominal. Devido aos eventos de sobrecarga, a tensão de operação apresentou valores elevados, especialmente quando a relação de potência CC/CA era grande.

Luoma, Kleissl e Murray (2012) em suas simulações observaram que dentre as causas da perda de energia por saturação do inversor, as perdas devido aprimoramento de nuvens dominam as perdas totais. Os autores afirmam que aumentar o tamanho do inversor reduz as perdas por superirradiância, porém diminui a eficiência do inversor quando a irradiância diminui. Assim sendo, sugeriu-se que um aumento para 1,22 da relação do dimensionamento dos inversores levaria a uma maior produção de energia. O fator de dimensionamento é a relação entre a potência do inversor e potência do módulo FV sob condições de teste padrão (SCARABELOT; RAMPINELLI; RAMBO, 2021). Um dimensionamento adequado garante que a energia seja produzida com menor custo e eventos de superirradiância sejam minimizados.

2.3.7 Desempenho de modelos e equipamentos

O desempenho de cinco modelos de separação de radiação e sete modelos de transposição foram validados com medições de irradiância, nos quais constatou-se que os picos de irradiância inclinada têm uma variabilidade interanual significativa (GUEYMARD, 2017b).

Chase *et al.* (2018) criaram uma plataforma sensorial capaz de monitorar eventos de superirradiância a partir de um microcontrolador, computador e módulos FV, sensores de temperatura do ar, pressão, tensão e corrente. Por meio da plataforma, foi registrado um evento de superirradiância máximo de 1321 W/m².

Martins, Mantelli e Ruther (2021) apresentam uma análise de desempenho de medições de radiômetros e células de referência para análise de eventos de superirradiância. O desempenho dos instrumentos foi semelhante na detecção dos eventos, inclusive na incerteza de medição de falsos positivos em baixas elevações solares.

2.4 CONCLUSÃO

A partir da revisão bibliográfica acerca dos eventos de superirradiância e seus impactos em sistemas FV, foi possível chegar a um total de 33 publicações. Todas elas foram publicadas entre os anos de 2012 e 2022. Estes números podem evidenciar que as pesquisas nessa temática são recentes e estão aumentando ao longo dos anos. Além disso, este artigo de revisão pode vir a ser uma referência norteadora às futuras pesquisas a serem desenvolvidas nessa área.

Observou-se que os eventos de superirradiância são comuns em diversos locais do mundo, independente de fatores geográficos ou tipo climático. Alguns dos impactos negativos encontrados na literatura foram: excedência da potência nominal do inversor, queima dos fusíveis, flutuações rápidas de energia em rede, instabilidade na qualidade de fornecimento de energia, problemas de equilíbrio e perdas de energia. Vale ressaltar que a gravidade dos impactos esteve condicionada ao tempo de duração dos eventos. Entretanto, no que se refere a impacto positivo, notou-se um aumento na eficiência dos módulos devido ao sombreamento que acontece entre a passagem da nuvem e o aprimoramento na borda, provocando uma redução da temperatura ambiente e dos módulos.

Constatou-se que existem muitos métodos e modelos sendo desenvolvidos para descrever e prever os eventos, além de simulações dos efeitos em módulos FV. No entanto, nota-se que existem poucos estudos sobre a superirradiância no Brasil, e um número menor ainda de trabalhos quantificando os impactos da superirradiância, revelando lacunas na literatura que poderiam ser melhor exploradas em trabalhos futuros. Diante dos novos empreendimentos solares no mundo, é importante que esta temática seja levada em consideração na elaboração dos projetos.

Tabela 2.3. Tabela síntese da revisão bibliográfica sobre eventos de superirradiância e seus impactos em sistemas fotovoltaicos

| Impactos positivos | Impactos negativos |
|------------------------------------|---|
| Aumento na eficiência dos módulos | Excedência da potência nominal do inversor |
| Redução da temperatura dos módulos | Queima dos fusíveis |
| | Flutuações rápidas de energia em rede |
| | Instabilidade na qualidade de fornecimento de energia |
| | Problemas de equilíbrio |
| | Perdas de energia |

2.5 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. P.; ZILLES, R.; LORENZO, E.. Extreme overirradiance events in São Paulo, Brazil. **Solar Energy**, v. 110, p. 168-173, 2014.

CASTILLEJO-CUBEROS, A.; ESCOBAR, R. Detection and characterization of cloud enhancement events for solar irradiance using a model-independent, statistically-driven approach. **Solar Energy**, v. 209, p. 547-567, 2020.

CHASE, O. A. *et al.* A low-cost, stand-alone sensory platform for monitoring extreme solar overirradiance events. **Sensors**, v. 18, n. 8, p. 2685, 2018.

DE GRUIJL, F. R. Skin cancer and solar UV radiation. **European Journal of Cancer**, v. 35, n. 14, p. 2003-2009, 1999.

DEO, R. C. *et al.* Forecasting solar photosynthetic photon flux density under cloud cover effects: novel predictive model using convolutional neural network integrated with long short-term memory network. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, p. 1-38, 2022.

DESCHAMPS, E. M.; RUTHER, R. Optimization of inverter loading ratio for grid connected photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 179, p. 106-118, 2019.

DO NASCIMENTO, L. R. *et al.* Extreme solar overirradiance events: Occurrence and impacts on utility-scale photovoltaic power plants in Brazil. **Solar Energy**, v. 186, p. 370-381, 2019.

DO NASCIMENTO, L. R. *et al.* Performance assessment of solar photovoltaic technologies under different climatic conditions in Brazil. **Renewable Energy**, v. 146, p. 1070-1082, 2020.

FEISTER, U.; CABROL, N.; HÄDER, D. UV irradiance enhancements by scattering of solar radiation from clouds. **Atmosphere**, v. 6, n. 8, p. 1211-1228, 2015.

GELSOR, N. *et al.* Solar energy on the Tibetan Plateau: Atmospheric influences. **Solar Energy**, v. 173, p. 984-992, 2018.

GUEYMARD, C. A. Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high-frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. Part 1: Impacts on global horizontal irradiance. **Solar Energy**, v. 153, p. 755-765, 2017a.

GUEYMARD, C. A. Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high-frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. Part 2: Performance of separation and transposition models for global tilted irradiance. **Solar Energy**, v. 153, p. 766-779, 2017b.

GUEYMARD, C. A.; RUIZ-ARIAS, J. A. Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct irradiance predictions from 1-min global irradiance. **Solar Energy**, v. 128, p. 1-30, 2016.

INMAN, R.H.; CHU, Y.; COIMBRA, C. F. M. Cloud enhancement of global horizontal irradiance in California and Hawaii. **Solar Energy**, v. 130, p. 128-138, 2016.

IRENA. Renewable Capacity Statistics 2022. The International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, 2022.

JAMROEN, C. *et al.* A novel UV sensor-based dual-axis solar tracking system: Implementation and performance analysis. **Applied Energy**, v. 299, p. 117295, 2021.

JÄRVELÄ, M.; LAPPALAINEN, K.; VALKEALAHTI, S. Characteristics of the cloud enhancement phenomenon and PV power plants. **Solar Energy**, v. 196, p. 137-145, 2020.

JÄRVELÄ, M.; VALKEALAHTI, S. Operation of a PV power plant during overpower events caused by the cloud enhancement phenomenon. **Energies**, v. 13, n. 9, p. 2185, 2020.

KEMPE, M. D. Ultraviolet light test and evaluation methods for encapsulants of photovoltaic modules. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 94, n. 2, p. 246-253, 2010.

KILLINGER, S.; ENGERER, N.; MÜLLER, B. QCPV: A quality control algorithm for distributed photovoltaic array power output. **Solar Energy**, v. 143, p. 120-131, 2017.

KREUWEL, F. P. M. *et al.* Analysis of high frequency photovoltaic solar energy fluctuations. **Solar Energy**, v. 206, p. 381-389, 2020.

LAPPALAINEN, K.; KLEISSL, J. Analysis of the cloud enhancement phenomenon and its effects on photovoltaic generators based on cloud speed sensor measurements. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 12, n. 4, p. 043502, 2020.

LAPPALAINEN, K.; VALKEALAHTI, S. Analysis of shading periods caused by moving clouds. **Solar Energy**, v. 135, p. 188-196, 2016a.

LAPPALAINEN, K.; VALKEALAHTI, S. Apparent velocity of shadow edges caused by moving clouds. **Solar Energy**, v. 138, p. 47-52, 2016b.

LEVY, Y.; ELLIS, T. J. A system approach to conduct an effective literature review in support of information systems research. **Informing Science Journal**, v. 9, p. 181-212, 2006.

LIU, Kuo-Nan. An Introduction to Atmospheric Radiation. **Elsevier**, 2nd, p.7, 2002.

LOHMANN, G. M.; MONAHAN, A. H.; HEINEMANN, D. Local short-term variability in solar irradiance. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, n. 10, p. 6365-6379, 2016.

LUOMA, J.; KLEISSL, J.; MURRAY, K. Optimal inverter sizing considering cloud enhancement. **Solar energy**, v. 86, n. 1, p. 421-429, 2012.

MARTINS, G. L.; MANTELLI, S. L.; RÜTHER, R. Evaluating the performance of radiometers for solar overirradiance events. **Solar Energy**, v. 231, p. 47-56, 2022.

MAYER, M. J. Effects of the meteorological data resolution and aggregation on the optimal design of photovoltaic power plants. **Energy Conversion and Management**, v. 241, p. 114313, 2021.

MONGEON, P.; PAUL-HUS, A. The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. **Scientometrics**, v. 106, n. 1, p. 213-228, 2016.

NORRIS, D. J. Correlation of solar radiation with clouds. **Solar Energy**, v. 12, n. 1, p. 107-112, 1968.

OMAZIC, A. *et al.* Relation between degradation of polymeric components in crystalline silicon PV module and climatic conditions: A literature review. **Solar energy materials and solar cells**, v. 192, p. 123-133, 2019.

PANDEY, A.; PANDEY, P.; TUMULURU, J. S. Solar energy production in India and commonly used technologies—An overview. **Energies**, v. 15, n. 2, p. 500, 2022.

PIEDEHIERRO, A. A. *et al.* Evaluation of enhancement events of total solar irradiance during cloudy conditions at Granada (Southeastern Spain). **Atmospheric Research**, v. 135, p. 1-7, 2014.

SANTIAGO, I. *et al.* Classification of daily irradiance profiles and the behaviour of photovoltaic plant elements: The effects of cloud enhancement. **Applied Sciences**, v. 11, n. 11, p. 5230, 2021.

SCARABELOT, L. T.; RAMPINELLI, G. A.; RAMBO, C. R. Overirradiance effect on the electrical performance of photovoltaic systems of different inverter sizing factors. **Solar Energy**, v. 225, p. 561-568, 2021.

TANESAB, J. *et al.* The contribution of dust to performance degradation of PV modules in a temperate climate zone. **Solar Energy**, v. 120, p. 147-157, 2015.

TAPAKIS, R.; CHARALAMBIDES, A. G. Enhanced values of global irradiance due to the presence of clouds in Eastern Mediterranean. **Renewable energy**, v. 62, p. 459-467, 2014.

URBACH, Frederick. Potential effects of altered solar ultraviolet radiation on human skin cancer. **Photochemistry and photobiology**, v. 50, n. 4, p. 507-513, 1989.

VAMVAKAS, I.; SALAMALIKIS, V.; KAZANTZIDIS, A. Evaluation of enhancement events of global horizontal irradiance due to clouds at Patras, South-West Greece. **Renewable Energy**, v. 151, p. 764-771, 2020.

WEN, G.; MARSHAK, A.; CAHALAN, R. F. Importance of molecular Rayleigh scattering in the enhancement of clear sky reflectance in the vicinity of boundary layer cumulus clouds. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 113, n. D24, 2008.

YORDANOV, G. *et al.* Overirradiance (Cloud Enhancement) Events at High Latitudes. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 3, n. 1, p. 271-277, 2013.

YORDANOV, G. H. A study of extreme overirradiance events for solar energy applications using NASA's I3RC Monte Carlo radiative transfer model. **Solar Energy**, v. 122, p. 954-965, 2015.

YORDANOV, G. H.; SAETRE, T. O.; MIDTGÅRD, O. 100-millisecond resolution for accurate overirradiance measurements. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 3, n. 4, p. 1354-1360, 2013.

ZHANG, J. *et al.* Physical process and statistical properties of solar irradiance enhancement observed under clouds. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 57, n. 8S3, p. 08RG11, 2018.

CAPÍTULO 3

3. ARTIGO: IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL NO NORDESTE BRASILEIRO COM CRITÉRIOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE EVENTOS DE SUPERIRRADIÂNCIA E SUPERIRRADIÂNCIA EXTREMA

Resumo: Eventos de superirradiância são fenômenos provocados pelas bordas de nuvens que aprimoram a irradiância solar global medida na superfície. Por outro lado, a superirradiância extrema é caracterizada por valores de irradiância superiores a estimativa de irradiância extraterrestre. Nesse sentido, o propósito deste trabalho foi compreender o fenômeno da superirradiância no Nordeste brasileiro e descrever todos os aspectos identificados na pesquisa. Foram analisadas 4 estações: Caicó e Natal (RN), Petrolina (PE) e São Luís (MA). A metodologia inclui dados com período de 1 minuto e dois critérios de identificação de eventos: superirradiância ($K_t > 1$) e superirradiância extrema ($GHI > G_0$). Utilizou-se o coeficiente de Spearman para correlacionar a distribuição mensal da superirradiância a algumas variáveis climatológicas. Como resultado, foi observado que eventos de superirradiância podem ocorrer durante todo o ano no Nordeste brasileiro, porém a superirradiância extrema é mais comum em meses de verão. A duração dos dois tipos de eventos é, na maioria das observações, em torno de 1 a 2 minutos. Notou-se também que a superirradiância na estação de São Luís esteve correlacionada positivamente a precipitação e nebulosidade, mas negativamente a insolação. Em Natal, a superirradiância apresentou correlação positiva somente à precipitação. Os impactos da superirradiância podem afetar o desempenho de módulos fotovoltaicos, a saúde humana e animal, a agricultura e outras atividades.

Palavras-Chave: Irradiância global; Nebulosidade; Caicó; Natal; Petrolina; São Luís.

Abstract: Superirradiance events are phenomena caused by cloud edges that enhance the global solar irradiance measured at the surface. On the other hand, extreme superirradiance is characterized by irradiance values that are higher than the estimated extraterrestrial irradiance. In this sense, the purpose of this work was to understand the phenomenon of superirradiance in the Brazilian Northeast and to describe all the aspects identified in the research. Four stations were analyzed: Caicó and Natal (RN), Petrolina (PE) and São Luís (MA). The methodology includes data with a 1-minute period and two criteria for identifying events: super-irradiance ($K_t > 1$) and extreme super-irradiance ($GHI > G_0$). Spearman's coefficient was used to correlate the monthly distribution of

superradiance with some climatological variables. As a result, it was observed that super-irradiance events can occur throughout the year in northeastern Brazil, but extreme super-irradiance is more common in the summer months. The duration of both types of event is, in most observations, around 1 to 2 minutes. It was also noted that superirradiance at the São Luís station was positively correlated with precipitation and cloudiness, but negatively correlated with insolation. In Natal, superradiance was only positively correlated with precipitation. The impacts of superradiance can affect the performance of photovoltaic modules, human and animal health, agriculture and other activities.

Keywords: Global Irradiance; Cloudiness; Caicó; Natal; Petrolina; São Luís.

3.1 INTRODUÇÃO

A fonte inesgotável de energia proveniente do Sol permite que a sociedade utilize desta fonte para aquecimento e climatização de ambientes, geração de eletricidade e outras aplicações (PEREIRA *et al.*, 2017). No que se refere a geração de eletricidade, a análise de dados de irradiância exige uma boa resolução temporal e espacial, além da representação confiável do comportamento das usinas fotovoltaicas (FV) (PFENNINGER; STAFFELL, 2016).

Além da intermitência do tempo meteorológico que pode afetar a produção de energia FV, alguns estudos têm descrito o efeito de nuvens capazes de intensificar a irradiância que atinge a superfície (PIACENTINI; CEDE; BÁRCENA, 2003; PIACENTINI *et al.*, 2011; YORDANOV *et al.*, 2013; TIBA; SILVA LEAL, 2017; DO NASCIMENTO *et al.*, 2019). O resultado desse fenômeno é uma irradiância global medida em superfície superior aos valores para o topo da atmosfera (DO NASCIMENTO *et al.*, 2019). Na literatura, esse fenômeno é conhecido com superirradiância (ALMEIDA; ZILLES; LORENZO, 2014; DE ANDRADE; TIBA, 2016).

A explicação física para a causa do fenômeno é descrita pelo conceito de dispersão de Mie, em que quando o raio de partículas atmosféricas é maior que o comprimento de onda da radiação visível provoca-se um espalhamento de concentração direta e dispersões complexas (LIOU, 2002).

Yordanov *et al.* (2013) afirmam que para uma medição precisa desses eventos são necessários dados de milissegundos. No entanto, o autor destaca que o grande volume de dados, cerca de 60.000 dados por minuto, pode atrapalhar a identificação dos eventos. Gueymard e Ruiz-Arias (2016) avaliaram um modelo de previsão de irradiância global e direta com dados de 1 minuto e, como resultado, constataram que modelos de previsão que usam dados horários ignoram o efeito da superirradiância, podendo levar a implicações no projeto ou operação inadequada dos sistemas fotovoltaicos.

Em Piacentini *et al.* (2011), eventos de superirradiância foram detectados em Recife (Nordeste do Brasil), no qual foram identificados picos acima de 1600 W/m². De Andrade e Tiba (2016) analisaram eventos em estações meteorológicas no estado de Alagoas e destacaram a importância desse estudo para o Nordeste brasileiro, principalmente pelo fato da região ser coberta em boa parte do ano por nuvens que refletem a radiação pela borda ou potencializam o espalhamento em dias nublados. Por outro lado, os autores destacam as dificuldades em detectar esses eventos, seja pela rápida duração ou pela ineficácia dos instrumentos não calibrados.

Embora alguns estudos sobre superirradiância na região Nordeste do Brasil tenham sido desenvolvidos, nenhum propôs uma análise de dados médios de 1 minuto de irradiância global com mais de 5 anos de medição até o momento da publicação deste trabalho. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho é entender o fenômeno da superirradiância no Nordeste do Brasil, identificando eventos de superirradiância e superirradiância extrema, a frequência dos eventos, duração, intensidade e horários de ocorrência. Além disso, pretende-se avaliar a influência das variáveis climatológicas nesses eventos.

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Dados de irradiância global horizontal

Os dados de irradiância global horizontal, em inglês *global horizontal irradiance* (GHI), foram obtidos através do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O presente estudo utilizou quatro estações solarimétricas instaladas na região Nordeste: Natal, São Luís, Caicó e Petrolina conforme Figura 3.1. Caicó e Natal estão localizados no estado

do Rio Grande do Norte, enquanto Petrolina é uma cidade de Pernambuco e São Luís é a capital do Maranhão. Na Figura 3.2, apresentam-se os piranômetros, instrumentos de medição de irradiância global de cada estação.

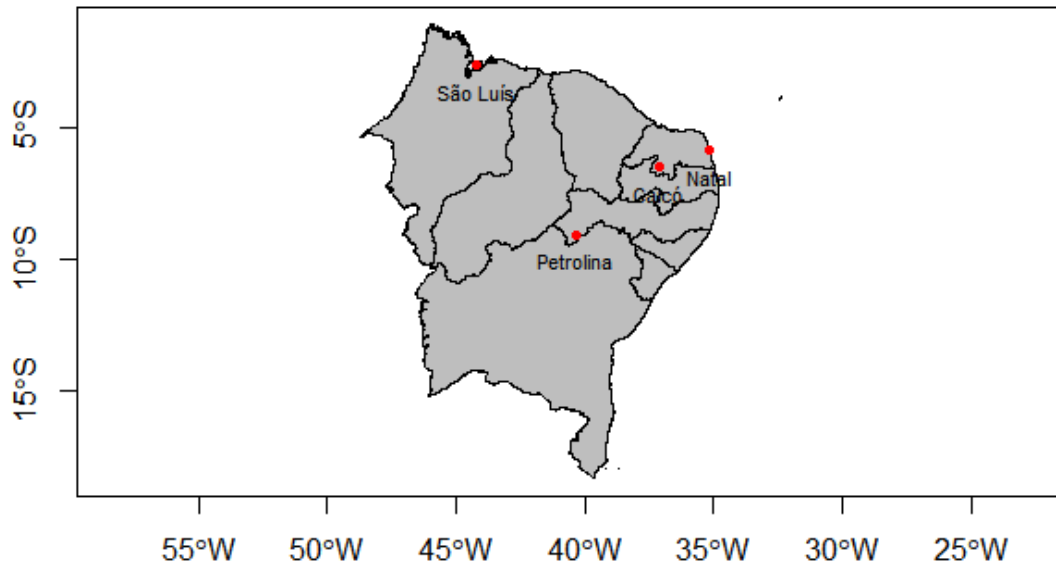


Figura 3.1. Localização das estações solarimétricas da Rede SONDA-INPE no Nordeste brasileiro



Figura 3.2. Piranômetros das estações: a) Caicó, b) Natal, c) Petrolina e d) São Luís

A motivação para escolha desse banco de dados deu-se pela resolução temporal média de 1 minuto dos dados, considerado um intervalo aceitável para identificação de eventos de superirradiância (DO NASCIMENTO *et al.*, 2019). A base dispunha de apenas quatro estações solarimétricas na região Nordeste, por isso a escolha reduzida do número de estações.

Além disso, a base disponibiliza não somente os dados, mas também os resultados dos testes de validação dos dados. Dessa maneira, garantindo a confiabilidade dos dados. O processo de controle de qualidade de dados consiste em 4 etapas sequenciais iniciadas com filtros mais grosseiros e terminadas com filtros refinados (INPE, 2023). Os filtros sinalizam quando os dados são considerados suspeitos e a continuidade do processo depende da aprovação em cada etapa. O procedimento baseia-se nos critérios da World Meteorological Organization e The Meteorological Resource Center (PEREIRA *et al.*, 2017).

Devido ao rigoroso processo de validação, dados do período de 2009 a 2013 foram excluídos das análises deste trabalho por serem inconsistentes com medições de outras variáveis da mesma estação. Houve situações em que alguns anos não estavam disponíveis para algumas estações. Diante disso, na Tabela 3.1, são fornecidas as informações sobre a latitude, longitude, altitude, tipo climático de acordo com a classificação de Köppen (KOTTEK *et al.*, 2006) e os anos completos de dados disponíveis para o estudo. Somente a estação de São Luís possui uma série temporal completa sem interrupções, de 2013 a 2019.

Tabela 3.1. Localização geográfica das estações da Rede SONDA-INPE no Nordeste brasileiro, contendo latitude, longitude, altitude, tipo climático e anos disponíveis

| Sigla da estação | Latitude | Longitude | Altitude | Tipo climático | Anos disponíveis |
|-------------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------------|--------------------------------|
| Caicó | 06°28'S | 37°05'O | 176 m | Bsh* | 2002-2008 2015-2016 2019 |
| Natal | 05°50'S | 35°12'O | 58 m | As** | 2008 2015-2019 |
| Petrolina | 09°04' S | 40°19'O | 387 m | Bsh | 2004-2006 2013-2019 |
| São Luís | 02°35'S | 44°12'O | 40 m | Am*** | 2013-2019 |

*Am- Clima tropical com estação seca

**As- Clima tropical úmido

***Bsh – Clima Semi-árido quente

3.2.2 Métodos de identificação de superirradiância e superirradiância extrema

Para identificação dos eventos de superirradiância foram utilizados os dois critérios proposto por Do Nascimento *et al.* (2019). O primeiro critério utiliza o índice de transmissividade (K_t) para identificar eventos de superirradiância ($K_t > 1$). O índice K_t é calculado a partir da relação entre GHI e a irradiância solar extraterrestre estimada (ETH) (Equação 3.1).

$$K_t = \frac{GHI}{ETH} \quad (3.1)$$

O segundo critério proposto por Do Nascimento *et al.* (2019) detecta eventos de superirradiância extrema quando GHI é superior a G_o ($GHI > G_o$). A constante solar (G_o) é a irradiância interceptada por área perpendicular à direção de propagação da energia solar, no topo da atmosfera, a distância média Terra-Sol. A expressão topo da atmosfera é usada para se referir a zona sem processos atenuantes atmosféricos (LIOU, 2002) (Equação 3.2).

$$ETH = G_o \cdot E_o \cdot \cos\theta_z \quad (3.2)$$

em que G_o é a constante solar (1367 W/m^2), E_o é o fator de correção de excentricidade da órbita da Terra (SPENCER, 1971) e $\cos\theta_z$ é cosseno do ângulo zenital (DUFFIE; BECKMANN, 2013).

3.2.3 Correlação entre eventos de superirradiância e variáveis meteorológicas

Buscando avaliar a influência das variáveis meteorológicas nos eventos de superirradiância foram usadas os valores mensais de precipitação acumulada, insolação total e nebulosidade. Os dados foram obtidos através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os períodos de dados foi de igual período aos meses em que houveram registro de eventos de superirradiância Cabe ressaltar que insolação total mensal não estava disponível para cidade de Caicó.

O coeficiente de Spearman consiste em uma medição não-paramétrica de dependência estatística entre duas sequências observacionais (LIU *et al.*, 2010). O coeficiente determina a relação entre as sequências por meio da Equação 3.3.

$$r = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{(n^3 - n)} \quad (3.3)$$

em que n = número de pares (x_i, y_i) e d = diferença entre os postos x e y . A significância estatística usada para o teste foi $p < 0,01$.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em análise inicial, os dados de minutos foram integralizados em dados horários. Na Figura 3.3, são apresentadas as distribuições mensais de irradiação global horária. Diante disso, o intuito foi analisar o comportamento da variável ao longo dos meses, tendo em vista a ausência de alguns anos completos que impossibilitaram uma análise de período anual comum entre as estações.

O comportamento da irradiação na estação Caicó é apresentado na Figura 3.3 (a). Observa-se um decréscimo nas médias entre os meses de fevereiro a maio, atingindo o menor valor em junho, com 4,6 kWh/m². De julho a setembro, as médias tendem a aumentar e estiveram próximas a 6 kWh/m², chegando a 6,7 kWh/m² em outubro. De acordo com Medeiros, Santos e Bezerra (2017), entre setembro e novembro, há um aumento da irradiação direta em Caicó devido à baixa cobertura de nuvens por ser a estação seca.

Na estação Natal, Figura 3.3 (b), observa-se um comportamento semelhante a estação Caicó, influenciado pelas estações chuvosas e secas. Notou-se uma redução entre janeiro e junho, seguido por aumento de julho a novembro, com valores máximos de 6,9 kWh/m² em outubro.

Em Petrolina, nota-se na Figura 3.3 (c) que o mês de junho apresentou a menor média entre as estações discutidas até esse ponto do trabalho, com 4,4 kWh/m². O mês de outubro apresenta a maior média da estação, com 6,3 kWh/m². A amplitude entre os meses citados está associada a localização geográfica da estação, cuja posição um pouco mais ao sul da linha do equador experimenta maior variação na distribuição de energia solar ao longo do ano.

A estação São Luís mostrou uma maior irregularidade de irradiação global horária nos 4 primeiros meses do ano, Figura 3.3 (d), com aumento da média entre junho e agosto. Uma possível explicação para este comportamento irregular no começo do ano pode estar associada ao fato de São Luís ter os maiores acumulados de

precipitação nos meses de fevereiro a maio. Os meses mais secos são setembro, outubro e novembro, com acumulados inferiores a 3 mm/mês. Além disso, no período seco, são observados os menores valores de nebulosidade e insolação mensal segundo as Normais Climatológicas do INMET (BRASIL, 2022). Dessa forma, a distribuição irregular de irradiação está diretamente associada às características climáticas típicas do período chuvoso da região.

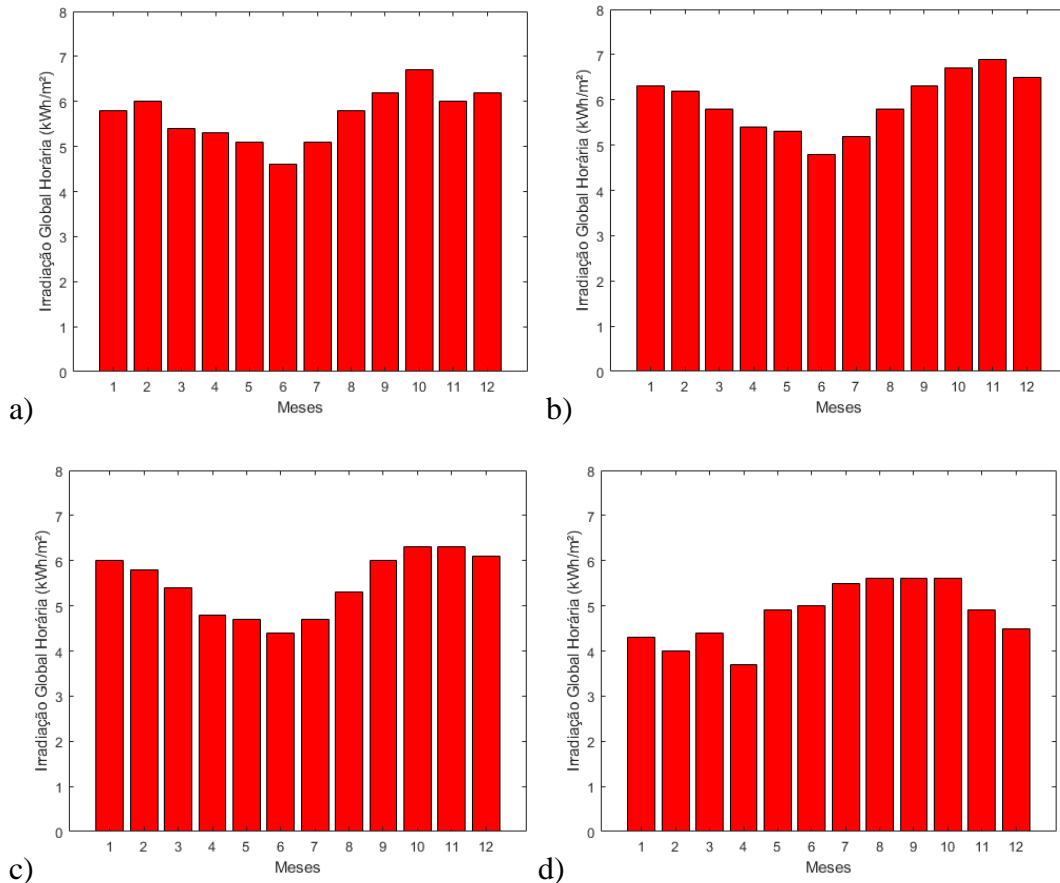


Figura 3.3. Distribuição mensal da irradiação global horária nas estações: a) Caicó, b) Natal, c) Petrolina e d) São Luís

Uma segunda exploração dos dados, usando os dados brutos de minuto a minuto, permitiu realizar uma análise a fim de encontrar eventos de superirradiância e eventos de superirradiância extrema conforme proposto por Do Nascimento *et al.* (2019). Na Tabela 3.2, apresenta-se o número de eventos por categoria para cada estação.

Nas estações Caicó e São Luís, foram observados os maiores números de eventos de superirradiância, 366 e 278, respectivamente. Por outro lado, nas estações Natal e Petrolina, o número de eventos de superirradiância extrema foi mais elevado, 76 e 210, respectivamente. Em Natal e Caicó, o número de eventos extremos foi igual.

Segundo De Andrade e Tiba (2016), a região Nordeste possui uma cobertura diária de nuvens cumulus que possibilita o aprimoramento de irradiância na borda das nuvens e múltiplas dispersões no plano da nuvem.

Tabela 3.2. Número de eventos de superirradiância e superirradiância extrema detectados para cada estação nos períodos analisados

| | Caicó | Natal | Petrolina | São Luís |
|---|-------|-------|-----------|----------|
| Eventos de superirradiância ($K_t > 1$) | 366 | 162 | 227 | 278 |
| Eventos de superirradiância extrema ($GHI > G_0$) | 76 | 76 | 110 | 64 |

Na Tabela 3.3, descreve-se a distribuição mensal dos dois tipos de eventos. As estações Caicó e Petrolina apresentaram eventos de superirradiância em todos os meses, com exceção do mês de abril em Petrolina, enquanto eventos extremos foram observados somente em dois períodos: entre os meses de janeiro a março e setembro a dezembro. O período de maior ocorrência dos eventos pode estar associado a maior recepção de irradiância global horizontal, cujas médias ficam acima de 6500 Wh/m².dia segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2017).

Em Natal, apenas em setembro não foi identificado nenhum tipo de evento. Para esta estação, os extremos também ocorreram em dois períodos, de janeiro a maio e entre outubro e dezembro. Apenas um evento foi notado no mês de agosto. O comportamento anual com dois períodos de ocorrência de eventos de superirradiância é semelhante ao encontrado para Recife-PE (TIBA; SILVA LEAL, 2017). Os autores Tiba; Silva Leal (2017) afirmam que os picos de ocorrência estão associados às condições climáticas em meses de transição da estação seca para período de precipitação ou para a situação contrária.

Na estação São Luís, eventos de superirradiância concentraram-se de janeiro a agosto e também em dezembro. Por outro lado, eventos extremos aconteceram apenas de janeiro a abril. Conforme discutido anteriormente, São Luís possui um clima

diferente das outras estações, cuja irradiância global segue a modulação do período chuvoso, de fevereiro a maio.

Tabela 3.3. Distribuição mensal de eventos de superirradiância e superirradiância extrema para 4 estações do Nordeste brasileiro durante os períodos analisados

| | Caicó | | Natal | | Petrolina | | São Luís | |
|-----------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| | $K_t > 1$ | $GHI > G_o$ | $K_t > 1$ | $GHI > G_o$ | $K_t > 1$ | $GHI > G_o$ | $K_t > 1$ | $GHI > G_o$ |
| Janeiro | 70 | 9 | 39 | 25 | 45 | 23 | 46 | 14 |
| Fevereiro | 70 | 20 | 35 | 20 | 55 | 25 | 71 | 25 |
| Março | 82 | 16 | 28 | 9 | 3 | 2 | 82 | 20 |
| Abril | 4 | 0 | 3 | 3 | 0 | 0 | 18 | 5 |
| Maio | 7 | 0 | 7 | 5 | 1 | 0 | 9 | 0 |
| Junho | 13 | 0 | 8 | 0 | 7 | 0 | 42 | 0 |
| Julho | 7 | 0 | 10 | 0 | 15 | 0 | 4 | 0 |
| Agosto | 16 | 0 | 2 | 1 | 7 | 0 | 1 | 0 |
| Setembro | 9 | 9 | 0 | 0 | 21 | 14 | 0 | 0 |
| Outubro | 2 | 2 | 4 | 2 | 12 | 6 | 0 | 0 |
| Novembro | 33 | 8 | 1 | 1 | 28 | 19 | 0 | 0 |
| Dezembro | 53 | 12 | 25 | 10 | 33 | 21 | 5 | 0 |

Diante disso, na tentativa de correlacionar a ocorrência mensal de eventos de superirradiância a variáveis climatológicas, na Tabela 3.4, são fornecidos os resultados do teste de correlação ($p < 0,01$). Nota-se que para Caicó e Petrolina nenhuma associação foi significativa. Em Natal, apenas a nebulosidade apresentou correlação positiva com os eventos de superirradiância, de forma que, quando há aumento da nebulosidade mensal, há uma maior probabilidade de ocorrência de eventos de superirradiância. Deschamps e Ruther (2019) observaram em seu estudo aumento na nebulosidade na Bahia em meses de verão que favorecem a ocorrência do efeito borda de nuvens, efeito causador da superirradiância.

Assim como em Natal, em São Luís, a nebulosidade esteve associada positivamente com os eventos, junto com a precipitação, enquanto a insolação teve correlação negativa, ou seja, à medida que a insolação aumenta a ocorrência de eventos diminui e vice-versa. Esse comportamento era esperado, já que nos meses de maior insolação a nebulosidade normalmente é reduzida. Novamente fica clara a relação entre a superirradiância da região e a nebulosidade.

Tabela 3.4. Resultados da correlação entre eventos de superirradiância e precipitação, insolação e nebulosidade mensais para 4 estações do Nordeste brasileiro, usando o coeficiente de Spearman (ρ)

| | Precipitação | | | Insolação | | | Nebulosidade | | |
|-----------|--------------|---------|---------|-----------|---------|---------|--------------|---------|---------|
| | ρ | p-value | Signif. | ρ | p-value | Signif. | ρ | p-value | Signif. |
| Caicó | 0,37 | 0,23 | NS | -0,08 | 0,79 | NS | 0,37 | 0,22 | NS |
| Natal | 0,29 | 0,35 | NS | -0,37 | 0,22 | NS | 0,77 | 0,002 | S |
| Petrolina | 0,45 | 0,14 | NS | 0,14 | 0,65 | NS | -0,02 | 0,94 | NS |
| São Luís | 0,87 | 0,0002 | S | -0,9 | 0,00005 | S | 0,92 | 0,00005 | S |

NS = Não significativo, S = Significativo

No que se refere à duração dos eventos, na Tabela 3.5 apresenta-se a duração em minutos dos eventos, e a irradiância média e irradiância máxima para cada período. Nota-se que a maior ocorrência de superirradiância e superirradiância extrema ocorre em período de 1 a 2 minutos. Este comportamento é identificado em todas as estações. Castillejo-Cuberos e Escobar (2020) afirmam que os episódios de superirradiância são transitórios e de alta frequência. Os autores também acrescentam em seu trabalho que eventos de superirradiância nunca acontecem em dias totalmente nublados ou claros, mas em dias com variabilidade na nebulosidade.

Para eventos com durações maiores, as irradiâncias tendem a reduzir. Entretanto, em Natal, observou-se uma irradiância máxima de 1513 W/m² em evento com mais de 5 minutos de duração. Trata-se de um evento com 7 minutos ocorrido no dia 31/01/2008 iniciado às 11:28 horas com média de 1508 W/m² demonstrado na Figura 3.4. As irradiâncias máximas nas estações foram registradas em eventos com 2 minutos de duração.

O pico de maior intensidade foi registrado na estação Natal, de 1575 W/m² no dia 30/01/2008 às 11:33 horas e duração de 2 minutos. A segunda maior irradiância medida foi de 1574 W/m³ em São Luís no dia 21/03/2013. Em Petrolina, o pico teve valor de 1507 W/m² no dia 24/01/2018. Enquanto em Caicó, o máximo registrado de 1496 W/m², ocorreu no dia 02/01/2004 às 12:13 horas. De acordo com Tiba e Silva Leal (2017), a superirradiância no Nordeste brasileiro tende a ocorrer em horários próximos ao meio-dia e durante o verão.

Por outro lado, o evento de maior duração dentre todas as estações foi registrado em São Luís no dia 25/02/2019 iniciado às 14:41 horas e terminado em 14:54 horas,

com duração total de 14 minutos. Contudo, a média de irradiância deste evento foi de 1060 W/m². É importante ressaltar que eventos com durações maiores tendem a ter menor intensidade. Para Do Nascimento *et al.* (2019), valores menores que a irradiância adotada nas condições de teste padrão, em inglês standard test conditions (STC), não causariam efeitos sobre sistemas FV. Esta explicação pode se estender a fenômenos que ultrapassam, em pequena intensidade, o valor 1000 W/m² usados nas de condições de teste padrão (STC).

Tabela 3.5. Duração em minutos dos eventos de superirradiância, irradiância média e irradiância máxima registrados em cada período, para as 4 localidades

| Duração | | Caicó | Natal | Petrolina | São Luís |
|----------------|--|-------|-------|-----------|----------|
| 1 min | Número de eventos | 150 | 67 | 114 | 141 |
| | Irradiância média (W/m ²) | 1265 | 1312 | 1316 | 1243 |
| | Irradiância máxima (W/m ²) | 1495 | 1516 | 1482 | 1463 |
| 2 min | Número de eventos | 45 | 19 | 35 | 34 |
| | Irradiância média (W/m ²) | 1264 | 1313 | 1296 | 1229 |
| | Irradiância máxima (W/m ²) | 1496 | 1575 | 1507 | 1574 |
| 3min | Número de eventos | 16 | 5 | 2 | 6 |
| | Irradiância média (W/m ²) | 1254 | 1191 | 1318 | 1258 |
| | Irradiância máxima (W/m ²) | 1451 | 1404 | 1361 | 1436 |
| 4 min | Número de eventos | 11 | 6 | 2 | 4 |
| | Irradiância média (W/m ²) | 1147 | 1285 | 1427 | 1252 |
| | Irradiância máxima (W/m ²) | 1321 | 1503 | 1460 | 1461 |
| 5 min | Número de eventos | 2 | 1 | - | 3 |
| | Irradiância média (W/m ²) | 1068 | 1254 | - | 1251 |
| | Irradiância máxima (W/m ²) | 1153 | 1292 | - | 1425 |
| Mais que 5 min | Número de eventos | 3* | 2** | 3*** | 2**** |
| | Irradiância média (W/m ²) | 1219 | 1286 | 1346 | 1100 |

* 21/01/2003 – 11 min; 20/02/2007 – 7 min; 08/03/2004 – 6 min
 ** 31/01/2008 – 7 min; 19/02/2016 – 6 min
 *** 30/12/2015 – 12 min; 19/02/2018 – 10 min; 21/02/2015 – 7 min
 **** 25/02/2019 – 14 min; 08/03/2019 – 6 min

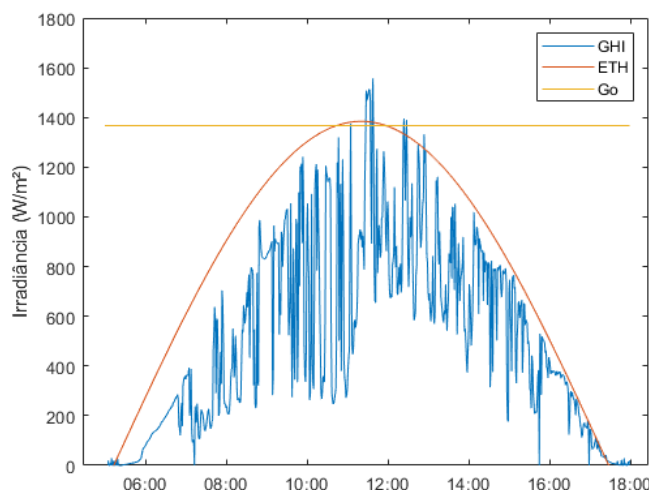


Figura 3.4. Perfil diário (31/01/2008) de GHI medida, estimada e Constante Solar na estação Natal com pico máximo de superirradiância medida de 1575 W/m²

Os horários de ocorrência dos eventos de superirradiância identificados nas estações analisadas estão apresentados na Figura 3.5. Nota-se uma pequena quantidade de eventos nas primeiras horas do dia, procedidos por aumento significativo a partir das 10:00 horas. Neste ponto, cada estação possui seu próprio horário de pico com muitos eventos registrados. Em Caicó, o pico com maior registro de eventos ocorre às 13:30 horas, diferente de Natal, no qual ocorre por volta das 11:30 horas. Na estação Petrolina o pico é atingido às 12:00 horas. No entanto, para São Luís o horário com mais eventos é entre 14:30 e 15:00 horas.

De Andrade e Tiba (2016) associam o horário de provável ocorrência dos eventos em Maceió-AL ao ciclo diário da velocidade do vento, no qual são observadas velocidade maiores a tarde do que pela manhã, contribuindo para dispersão de nuvens causadoras de superirradiância no período vespertino.

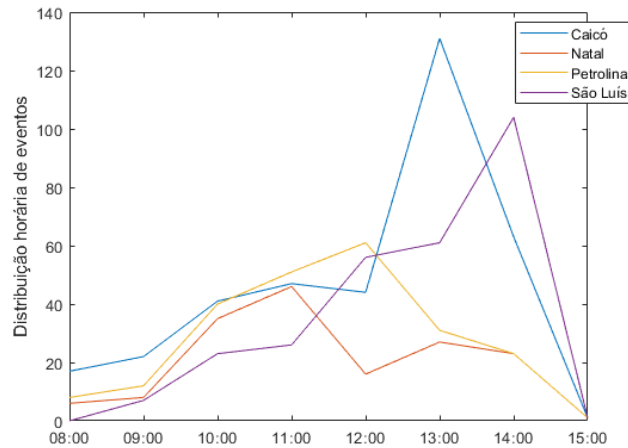


Figura 3.5. Perfil diário dos horários de ocorrências dos eventos de superirradiância para as quatro estações durante o período analisado

No que se refere à análise de séries de irradiância global é importante destacar as diversas possibilidades de aplicação dos resultados, não somente na meteorologia, mas também na agricultura, saúde humana e animal, energia solar entre muitas outras finalidades. Tendo em vista a crescente expansão do mercado brasileiro de energia solar, seja nas usinas solares ou consumidores residenciais, é importante levantar a discussão de como eventos de superirradiância podem afetar o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, a fim de evitar problemas nos seus componentes.

3.4 CONCLUSÃO

As distribuições médias mensais dos totais diários de irradiância global horizontal das 4 estações localizadas na região Nordeste brasileira são apresentadas neste trabalho. Contudo, a maior contribuição deste trabalho trata-se da compreensão dos eventos de superirradiância e superirradiância extrema. A estação Caicó registrou maior quantidade de eventos de superirradiância. Por outro lado, Petrolina registrou mais fenômenos de superirradiância extrema.

Os resultados encontrados permitiram inferir que eventos de superirradiância podem ocorrer em todos os meses do ano, sendo a superirradiância extrema mais comum em meses de verão. A correlação da distribuição mensal dos eventos com as variáveis climatológicas precipitação, insolação e nebulosidade mensal também foi investigada. Na estação de Natal, o aumento da nebulosidade mensal esteve associado positivamente com o aumento do número de eventos. Na estação São Luís, tanto

nebulosidade mensal quanto precipitação mensal estiveram relacionadas significativamente à maior ocorrência mensal de eventos de superirradiância, enquanto a insolação teve correlação significativa negativa. Nas estações Caicó e Petrolina não foram observadas correlações significativas.

O maior pico de superirradiância extrema foi registrado na estação Natal com 1575 W/m². Notaram-se maiores ocorrências de eventos de superirradiância com duração de 1 a 2 minutos, enquanto eventos de superirradiância extrema possuem duração máxima de 2 minutos. O perfil diário de horários mais comuns de ocorrência de eventos também foi traçado para cada estação. Uma maior ocorrência de superirradiância é notada por volta das 12 horas nas estações Natal, Petrolina e São Luís. Em Caicó, o horário mais comuns de registro de eventos foi em torno de 13:30 horas.

Diante do exposto, vale ressaltar a importância da realização de estudos que abordem fenômenos atmosféricos de curta duração, mas que geram impactos em tantas áreas conforme mencionadas. Para um estudo voltado para avaliação dos impactos da superirradiância, sugere-se que a frequência dos dados seja igual ou inferior à usada neste trabalho, e que se possível utilizem-se imagens do céu para comprovar a identificação da superirradiância.

3.5 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. P.; ZILLES, R.; LORENZO, E. Extreme overirradiance events in São Paulo, Brazil. **Sol. Energy**, 110, p. 168-173, 2014.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020. Brasília, 2022.

CASTILLEJO-CUBEROS, A.; ESCOBAR, R. Detection and characterization of cloud enhancement events for solar irradiance using a model-independent, statistically-driven approach. **Solar Energy**, v. 209, p. 547-567, 2020.

DE ANDRADE, RICARDO CESAR; TIBA, CHIGUERU. Extreme global solar irradiance due to cloud enhancement in northeastern Brazil. **Renewable energy**, v. 86, p. 1433-1441, 2016.

DESCHAMPS, E. M.; RUTHER, R. Optimization of inverter loading ratio for grid connected photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 179, p. 106-118, 2019.

DO NASCIMENTO, L. R *et al.* Extreme solar overirradiance events: Occurrence and impacts on utility-scale photovoltaic power plants in Brazil. **Solar Energy**, v. 186, p. 370-381, 2019.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. John Wiley & Sons, 2013.

GUEYMARD, C. A.; RUIZ-ARIAS, J. A. Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct irradiance predictions from 1-min global irradiance. **Solar Energy**, v. 128, p. 1-30, 2016.

INPE. SONDA: Sistema Nacional de Organização de Dados Ambientais, 2022. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/>. Acesso em: 30/05/2022.

KOTTEK, M. *et al.* World Map of the Koppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v.15, 259-263, 2006.

LIU, Kuo-Nan. An Introduction to Atmospheric Radiation. **Elsevier**, 2nd, p.7, 2002.

LIU, D. *et al.* A Spearman Correlation Coefficient Ranking for Matching-score Fusion on Speaker Recognition. In: **Tecnon 2010-2010 IEE Region 10 Conference**. IEEE, p. 736-741, 2010.

MEDEIROS, F. J. de; SILVA, C. M. S; BEZERRA, B. G. Calibration of ångström- Prescott equation to estimate daily solar radiation on Rio Grande do Norte state, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 409-416, 2017.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de energia solar**. 2. Ed. São José dos Campos: INPE, 80p, 2017.

PIACENTINI, R. D.; CEDE, A.; BÁRCENA, H. Extreme solar total and UV irradiances due to cloud effect measured near the summer solstice at the high-altitude desertic plateau Puna of Atacama (Argentina). **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n. 6, p. 727-731, 2003.

PIACENTINI, R. D. *et al.* Extreme total solar irradiance due to cloud enhancement at sea level of the NE Atlantic coast of Brazil. **Renewable Energy**, v. 36, n. 1, p. 409-412, 2011.

PFENNINGER, Stefan; STAFFELL, Iain. Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data. **Energy**, v. 114, p. 1251-1265, 2016.

SPENCER, J.W. Fourier series representation of the position of the Sun. **Search**, v. 2, p. 162- 172, 1971.

TIBA, CHIGUERU; SILVA LEAL, SÉRGIO DA. Enhancement of UV radiation by cloud effect in NE of Brazil. **InterNatalional Journal of Photoenergy**, v. 2017, 2017.

YORDANOV, G. *et al.* Overirradiance (Cloud Enhancement) Events at High Latitudes. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 3, n. 1, p. 271-277, 2013.

CAPÍTULO 4

4. ARTIGO: IMPACTOS DA SUPERIRRADIÂNCIA E SUPERIRRADIÂNCIA EXTREMA NA PRODUÇÃO FOTOVOLTAICA DE USINA EM OPERAÇÃO NA CIDADE DE JOÃO PESSOA-PARAÍBA

Resumo: A intermitência do recurso solar devido à presença de nuvens pode comprometer a geração de energia fotovoltaica (FV). Embora seja de conhecimento geral que as nuvens podem reduzir a irradiância, poucos são os trabalhos que apresentam a intensificação de irradiância global devido ao efeito das nuvens, conhecido como superirradiância. Diante disso, o objetivo do presente estudo foi identificar eventos de superirradiância extrema para a cidade de João Pessoa-Paraíba e entender os impactos na produção FV de uma usina solar em funcionamento. Nesse sentido, dois critérios foram usados para categorizar os eventos: superirradiância e superirradiância extrema. Os dados utilizados foram: irradiância global medida em estação meteorológica e imagens do céu registradas por uma câmera específica para tal finalidade. Além disso, dados de produção fotovoltaica de uma usina solar em funcionamento foram analisados para determinar os impactos provocados pelos eventos. Como resultados, foram identificados 229 picos de superirradiância extrema durante o período estudado. Os resultados indicam que os eventos de superirradiância extrema provocam elevação da temperatura do inversor e conseqüentemente geram aumento na potência instantânea e corrente dos módulos fotovoltaicos conectados ao inversor. Entretanto, se o dimensionamento estiver correto, normalmente os danos não são expressivos para os componentes do sistema fotovoltaico.

Palavras-Chave: Irradiância; Danos; Eletricidade; Energia solar.

Abstract: The intermittency of solar resources due to the presence of clouds can compromise the generation of photovoltaic (PV) energy. Although it is common knowledge that clouds can reduce irradiance, few studies have presented the intensification of global irradiance due to the effect of clouds, known as superirradiance. In view of this, the aim of this study was to identify extreme over-irradiance events for the city of João Pessoa-Paraíba and to understand the impacts on the PV production of an operating solar plant. Two criteria were used to categorize the events: superirradiance and extreme superirradiance. The data used was: global irradiance measured at a weather station and images of the sky recorded by a specific camera. In

addition, photovoltaic production data from an operating solar plant was analyzed to determine the impacts caused by the events. As a result, 229 extreme superradiance peaks were identified during the period studied. The results indicate that extreme over-radiance events cause the temperature of the inverter to rise and consequently generate an increase in the instantaneous power and current of the photovoltaic modules connected to the inverter. However, if the sizing is correct, the damage to the components of the photovoltaic system is usually not significant.

Keywords: Irradiance; Damage; Eletricity; Solar energy.

4.1 INTRODUÇÃO

Uma das fases do dimensionamento de projetos fotovoltaicos consiste em avaliar a irradiância na região do projeto. Em média, os módulos fotovoltaicos são projetados para atuarem com irradiância solar em torno de 1000 W/m² conforme as condições de teste padrão, em inglês *standard test conditions* (STC). Entretanto, alguns estudos ao redor do mundo têm relatado fenômenos de irradiância extrema, chamado de superirradiância, em inglês *overirradiance*, associado a presença de nuvens, superando os modelos de estimativa de irradiância para dias de céu claro (DO NASCIMENTO *et al.*, 2019; INMAN; CHU; COIMBRA, 2016; TAPAKIS; CHARALAMBIDES, 2014; PIACENTINI *et al.*, 2011; HANSEN; STEIN; ELLIS, 2010).

O efeito das nuvens sobre a irradiância tem sido chamado de aprimoramento de nuvens, em inglês *cloud enhancement*. Almeida, Zilles e Lorenzo (2014) afirmam que o aprimoramento de nuvens está relacionado principalmente à presença de nuvens cumulus ao redor do disco solar que obstrui o Sol. O aprimoramento ocorre devido à sobreposição da irradiação difusa espalhada nas bordas das nuvens (ZHANG *et al.*, 2018). Eventos frequentes de superirradiância com duração de segundos a minutos poderiam causar impactos importantes e consequências severas, especialmente em usinas fotovoltaicas (RUTHER *et al.*, 2017).

Em Järvelä e Valkealahti (2020), os autores apontam que os dias parcialmente nublados possuem duas características que podem aumentar a produção de eletricidade em sistemas fotovoltaicos: a diminuição na temperatura de operação dos módulos devido ao período de sombra e a irradiância intensificada devido ao aprimoramento de nuvens. Nessas situações, os inversores do módulo passam a operar no modo de limitação de potência, de modo que aumenta a tensão de operação, reduz a corrente e

consequentemente a potência (JÄRVELÄ; LAPPALAINEN; VALKEALAHTI, 2020). Segundo Lappalainen e Kleissl (2020) eventos de superirradiância não causam grandes problemas para operação de sistemas fotovoltaicos.

Para Yordanov *et al.* (2013), o fenômeno de superirradiância pode ser mais frequente em regiões costeiras em dias parcialmente nublados e, de certa forma, é influenciado pela velocidade do vento. Se o vento estiver calmo a duração dos eventos pode ser maior que alguns minutos, mas se o vento estiver mais veloz a duração pode ser menor. Além das condições meteorológicas locais, os autores citam que regiões do Hemisfério Sul como Austrália, África do Sul, Chile e Brasil têm maior potencial para eventos de aprimoramento de nuvens devido à combinação do elevado ângulo zenital e a menor distância Terra-Sol no verão devido ao periélio.

Nesse sentido, tendo em vista a importância do estudo desses eventos para a produção FV, o objetivo do presente trabalho foi identificar eventos de superirradiância extrema para a cidade de João Pessoa-Paraíba e entender os impactos na produção FV de uma usina solar em funcionamento.

4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Método de identificação de superirradiância extrema

Segundo Do Nascimento *et al.* (2019), a superirradiância extrema pode ser identificada por meio do critério $GHI > G_o$, em que GHI é a irradiância global horizontal medida e G_o é a constante solar. G_o , sendo a quantidade de energia incidente de forma perpendicular em unidade de área no topo da atmosfera a uma distância média Terra-Sol (LIOU, 2002).

Vale ressaltar que G_o sofre pequena variação ao longo do ano, sendo a média de 1367 W/m² usada como padrão na literatura. Nesse sentido, reconhecer um pico de irradiância como evento extremo sem um valor de referência de irradiância para o dia e local em questão poderia gerar equívocos na identificação de eventos de superirradiância extrema. Portanto, no presente trabalho, optou-se por acrescentar ao critério de identificação a condição preliminar de que GHI seja superior a irradiância extraterrestre estimada (ETH), ou seja: $GHI > ETH$.

O método para encontrar ETH é representado pela Equação 4.1 (FRÖHLICH; WEHRLI, 1981).

$$ETH = G_o \cdot \varepsilon_o \cdot \cos\theta_z \quad (4.1)$$

no qual ε_o é o fator de correção da excentricidade da órbita da Terra e θ_z é o ângulo zenital. O fator de correção da excentricidade foi desenvolvido por Spencer (1971) em termos de uma série de Fourier (Equação 4.2).

$$\varepsilon_o = 1,000110 + 0,034221\cos \Gamma + 0,001280\sen \Gamma + 0,000719\cos 2 \Gamma + 0,000077\sen 2 \Gamma \quad (4.2)$$

em que Γ é o ângulo do dia em radiano, conforme calculado pela Equação 4.3.

$$\Gamma = 2\pi \frac{(d_n - 1)}{365} \quad (4.3)$$

sendo d_n o dia de ordem do ano, no qual 1 de janeiro é 1 e 31 de dezembro é o dia 365. Duffie e Beckman (2013) elaboraram uma expressão mais simples para chegar ao valor e criaram uma tabela com a excentricidade da órbita da Terra para cada dia do ano. O cosseno do ângulo zenital é descrito pela Equação 4.4.

$$\cos\theta_z = \sen\delta + \sen\phi + \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cosh \quad (4.4)$$

no qual δ é a declinação solar, ϕ é latitude do local e h o ângulo horário. O cosseno do ângulo zenital relaciona conceitos de astronomia, cálculo diferencial e trigonometria esférica. O ângulo de declinação solar (δ) é formado pela inclinação do plano equatorial da Terra e a linha de direção Sol-Terra, com variação entre $-23^\circ 27'$ e $+23^\circ 27'$.

Nesse sentido, foram utilizados diferentes bancos de dados nesta pesquisa: irradiância global horizontal de estação meteorológica, imagens do céu capturadas por câmera instalada na Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e dados de produção FV fornecidos pela Usina Escola pertencentes a projeto de pesquisa da Universidade. O detalhamento das bases de dados está descrito nas seções seguintes. O período dos dados foi de 01 de janeiro a 30 de abril de 2023. Uma vez identificados os eventos de superirradiância extrema através dos dados de irradiância global utilizando o critério $GHI > ETH$, as imagens do céu confirmaram a ocorrência dos eventos. Conjuntamente,

as variáveis relacionadas à produção FV foram analisadas para entender o impacto da superirradiância extrema.

4.2.2 Dados de irradiância global horizontal medidos em superfície

Os dados foram obtidos pela estação meteorológica do Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR), localizada no Campus I da UFPB, na cidade de João Pessoa, Paraíba, Nordeste do Brasil. A localização geográfica está descrita na Tabela 4.1. A estação é composta por vários instrumentos meteorológicos, no qual para os fins deste artigo foi utilizado somente as medições do sensor de irradiância global horizontal. Na Figura 4.1, apresenta-se a estação meteorológica do CEAR-UFPB em João Pessoa. A cidade de João Pessoa, capital do estado da Paraíba, possui clima quente e úmido, com irradiação global horizontal média diária em torno de 5.5 Wh/m² (PEREIRA *et al.*, 2017) e insolação média diária de 7.4 horas. A média anual da temperatura mínima da cidade é em torno de 23,7°C e a temperatura máxima 29,8°C. A normal da precipitação acumulada anual é de 1914 mm, cujo período chuvoso é entre os meses de abril a julho e o período seco entre setembro e dezembro (INMET, 2022).

Tabela 4.1. Localização geográfica da estação meteorológica do CEAR-UFPB localizada no Campus I (João Pessoa)

| | |
|------------------|---------|
| Latitude | 07°08'S |
| Longitude | 34°51'O |
| Altitude | 12 m |



Figura 4.1. Estação meteorológica do CEAR-UFPB localizada no Campus I (João Pessoa)

Fonte: Autor (2023).

Os dados fornecidos pela estação são coletados a cada 10 segundos e integralizados em período de 10 minutos. Contudo, para cada variável, existe uma coluna com a média e desvio padrão dos 10 minutos, valor máximo e mínimo observados durante o intervalo de 10 minutos. Para a finalidade da análise de eventos de superirradiância, foram analisados os valores máximos da irradiância horizontal global.

4.2.3 Imagens do céu

As imagens do céu foram capturadas por uma câmera All-Sky modelo Ocellus da marca Starlight Xpress como apresentado na Figura 4.2. O formato de lente “olho de peixe” permite o registro de imagens em 150°. As fotos foram tiradas a cada 20 segundos e armazenadas em formato Portable Network Graphic (PNG). A câmera também está instalada no Campus I da UFPB.



Figura 4.2. Modelo de câmera Ocellus All-Sky

Fonte: SXCCD

4.2.4 Dados do sistema fotovoltaico

Os dados relacionados ao sistema fotovoltaico foram fornecidos pela Usina Escola da UFPB na unidade Mangabeira conforme Figura 4.3. Em funcionamento desde janeiro de 2023, a usina possui um sistema de rastreamento solar usado para orientar a superfície de um sistema FV em direção ao Sol para capturar a máxima quantidade de energia disponível (NGO *et al.*, 2020). A usina é composta de 372 painéis, sendo 46 por *string*, equipada com dois inversores da marca Huawei de potência nominal 100 kW cada. As variáveis analisadas foram temperatura interna, potência instantânea, corrente

e tensão do inversor. Os dados de produção possuem frequência de aquisição de 10 segundos.

A localização da Usina está descrita na Tabela 4.2. A distância entre a estação meteorológica do CEAR-UFPB e a Usina Escola da UFPB é de aproximadamente 4,4 km. Embora seja uma distância significativa, ainda assim é menor do que a escala de grade de muitos modelos de estimativa de dados de irradiância que fazem interpolações na ordem de dezenas a centenas quilômetros de distância (LOGHMARI; TIMOUMI; MESSADI, 2018; ZOU *et al.*, 2016). Na Figura 4.3, apresentam-se alguns módulos fotovoltaicos instalados na Usina.

Tabela 4.2. Localização geográfica da Usina Escola da UFPB localizada na Unidade Mangabeira (João Pessoa)

| | |
|------------------|----------|
| Latitude | 07°09' S |
| Longitude | 34°49' O |



Figura 4.3. Usina Escola da UFPB localizada na Unidade Mangabeira (João Pessoa)

Fonte: UFPB

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da análise dos dados de irradiância global horizontal medidos na estação foi possível observar a ocorrência de 229 picos de superirradiância extrema cidade de João Pessoa no período do estudo. Na Figura 4.4, é apresentada a quantidade de eventos de superirradiância extrema. Vale ressaltar que são considerados eventos de superirradiância extrema todos os picos de irradiância superiores a 1367 W/m^2 (G_o).

Nota-se que picos de intensidade entre 1367 e 1399 W/m² apresentaram-se em maior quantidade, enquanto irradiâncias acima de 1500 W/m² somaram 12 casos.

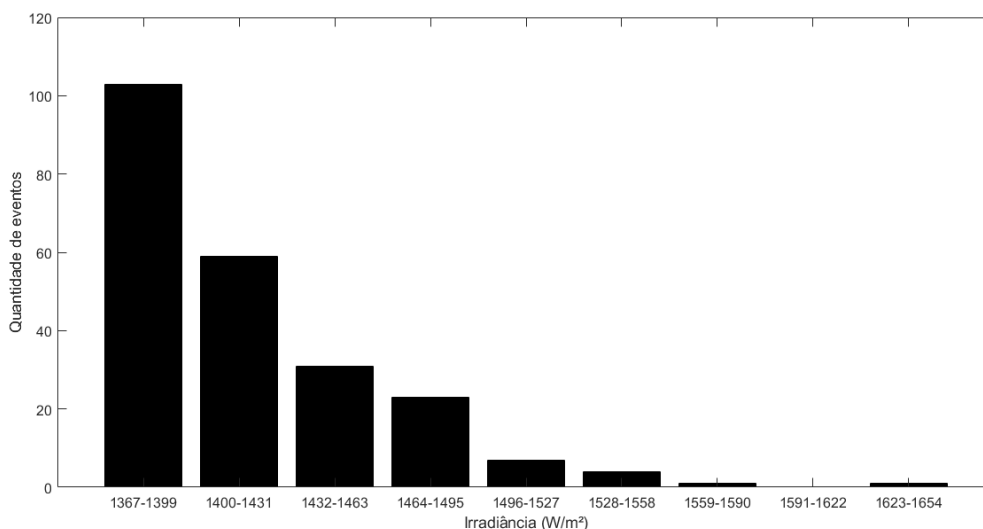


Figura 4.4. Quantidade de eventos de superirradiância extrema por intervalos de irradiância para a cidade de João Pessoa-Paraíba no período de 01 de janeiro a 30 de abril de 2023

Ao analisar a quantidade de eventos por mês na Tabela 4.3, observa-se que dos 120 dias (somatório de 1 de janeiro a 30 de abril), em 59 dias ocorreram eventos de superirradiância extrema. Não obstante, em 45 dos 59 dias foram observados eventos consecutivos. Embora fevereiro seja o mês com menor número de dias, foi observada a maior quantidade de eventos. Uma possível explicação pode estar no fato de que em um único dia podem ser registrados vários picos de superirradiância extrema.

Vale ressaltar que não foi possível inferir a duração real dos eventos, mais sim a quantidade de eventos consecutivos, pois os dados utilizados tratam da máxima irradiância global registrada no intervalo de 10 minutos.

Em vista da distinção entre eventos esporádicos e eventos consecutivos de superirradiância extrema, as análises das variáveis do inversor deram-se em duas vertentes: o dia com maior pico e o dia com mais eventos consecutivos de superirradiância extrema. Com isso, ao escolher um dia representativo para cada ocasião, buscou-se entender quais são os impactos desse tipo de evento sobre a produção fotovoltaica e se há diferença significativa entre impactos em dias de picos mais intensos ou picos mais duradores.

Tabela 4.3. Quantidade de dias e número de eventos de superirradiância extrema separados por mês para a cidade de João Pessoa-Paraíba entre os dias 01 de janeiro a 30 de abril de 2023

| Categoria | Janeiro | Fevereiro | Março | Abril |
|---|----------------|------------------|--------------|--------------|
| Dias com eventos de superirradiância extrema | 18 | 16 | 19 | 6 |
| Número de eventos de superirradiância extrema | 71 | 85 | 62 | 11 |

O maior valor registrado durante o período estudado (1649 W/m^2) ocorreu em 10 de fevereiro de 2023 no intervalo de medição de 11 horas conforme Figura 4.5 (a). Ademais, no mesmo dia foi registrado outro pico com intensidade de 1535 W/m^2 no intervalo de medição entre 10:20 e 10:30 horas. Nota-se pela distribuição de irradiância que se trata de um dia típico de céu claro, com valores próximos ou acima da estimativa do modelo de céu limpo (ETH), exceto durante os eventos em que ocorre oscilação.

No evento apresentado na Figura 4.5 (b), registrado no dia 04 de março de 2023 como o de maior número de picos consecutivos, sendo a primeira observação no intervalo de 10:30 horas e o último registro no intervalo das 12:20 horas, contabilizando 13 picos. Diferente da Figura 4.5 (a), no dia 04 de março, Figura 4.5(b), a passagem de nuvens não provocou a redução repentina seguida pela intensificação da irradiância, mas sim contribuiu diretamente na geração de superirradiância extrema. O fenômeno da diminuição de irradiância por nuvens é chamado de rampa de irradiância por Inmam *et al.* (2016). Além disso, a GHI medida se manteve acima da ETH em grande parte do dia.

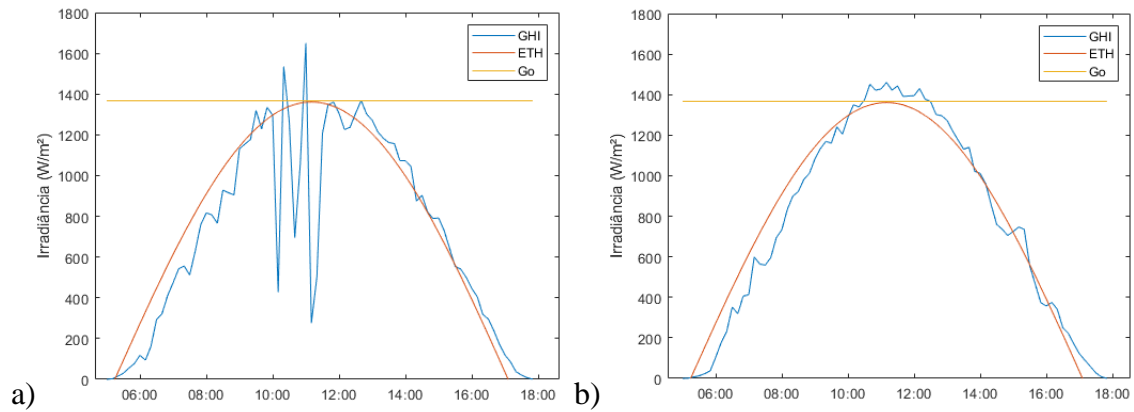


Figura 4.5. Perfil diário de irradiância solar com destaque para eventos de superirradiância extrema nos dias: a) 10 de fevereiro de 2023; b) 04 de março de 2023 em que GHI é a irradiância global horizontal medida na superfície, ETH é a irradiância extraterrestre

Na Figura 4.6, apresenta-se a sequência de imagens captadas pela câmera All-Sky no dia 04 de março de 2023, que permitiu confirmar os eventos consecutivos de superirradiância extrema apresentados na Figura 4.5 (b). Nota-se que o feixe de raio solar tende a ser aprimorado com a passagem da nuvem que cerca o Sol, mas não bloqueia a passagem do feixe, fazendo com que haja um forte espalhamento de irradiância (GELSOR *et al.*, 2018; GUEYMARD, 2017).

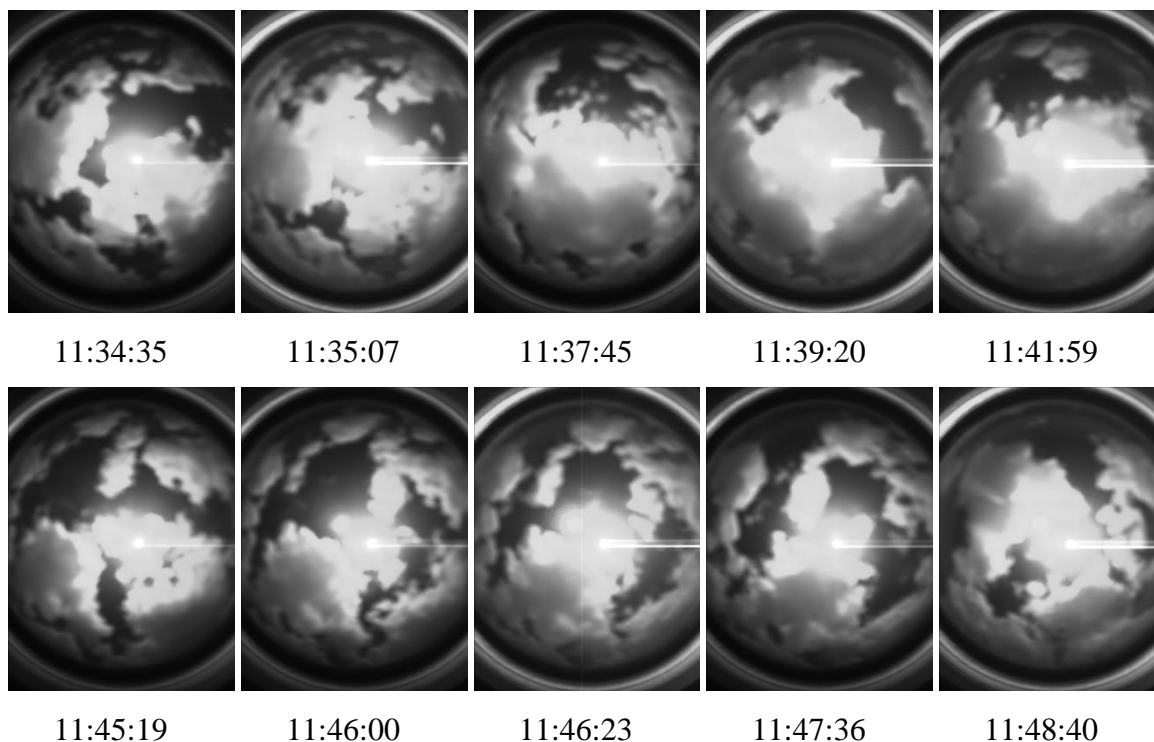


Figura 4. 6. Sequência de eventos de superirradiância extrema registrados entre 10:30 e 12:20 horas do dia 04 de março de 2023 pela câmera All-Sky com destaque para imagem das 11:46:23 no qual foi observado a maior intensidade do feixe de luz que provocou um reflexo exagerado na imagem

No que se refere ao comportamento da potência instantânea e temperatura do inversor do sistema fotovoltaico (Figura 4.7 (a) e 4.7 (b), respectivamente) durante os picos de 10 de fevereiro, observou-se que o comportamento das variáveis se assemelha à distribuição de irradiância global da Figura 4.5 (a). A potência nominal do inversor (100 kW) é atingida várias vezes ao longo do dia na Figura 4.7(a). De acordo com Scarabelot, Rampinelli e Rambo (2021), nos momentos em que o inversor atinge sua potência nominal, há um corte de energia e maior dissipação de energia térmica.

No horário próximo das 10:00 horas, é observada uma redução da temperatura e posteriormente aumento da potência instantânea. Após às 12 horas, nota-se que a temperatura interna também esteve acima da temperatura de operação (linha vermelha), chegando a alcançar uma diferença de quase 10°C. Tendo em vista que o período entre 12 e 17 horas do referido dia apresentou eventos de superirradiância ($GHI > ETH$), portanto é possível inferir que a superirradiância teve relação com a sobretemperatura do inversor (SCARABELOT; RAMPINELLI; RAMBO, 2021).

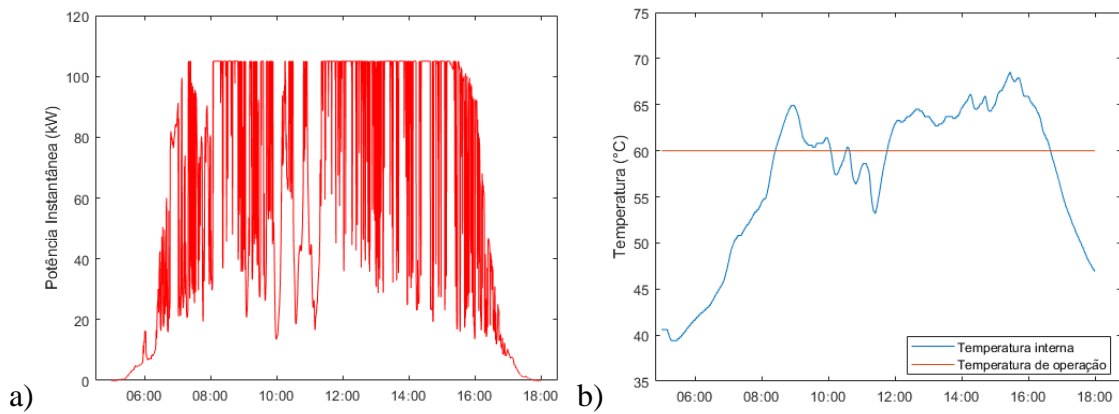


Figura 4.7. a) Potência instantânea e b) Temperatura interna do inversor do sistema fotovoltaico no dia 10 de fevereiro de 2023 na cidade de João Pessoa

Na Figura 4.8 (a), observa-se que a potência nominal também foi alcançada durante grande parte do dia, com exceção do intervalo das 8 às 9 horas. Ademais, a sobretemperatura pode ser ainda mais acentuada durante eventos de superirradiância extrema consecutiva do dia 04 de março conforme Figura 4.8 (b). Cabe destacar que o inversor da Huawei não conta com mecanismos de refrigeração automática que poderia reduzir a vida útil dos equipamentos. Entretanto, segundo Lillo-Bravo *et al.* (2018), a refrigeração natural não é considerada um grande problema, tendo em vista que o sistema de gerenciamento térmico forçado é o que causa mais falhas nos inversores.

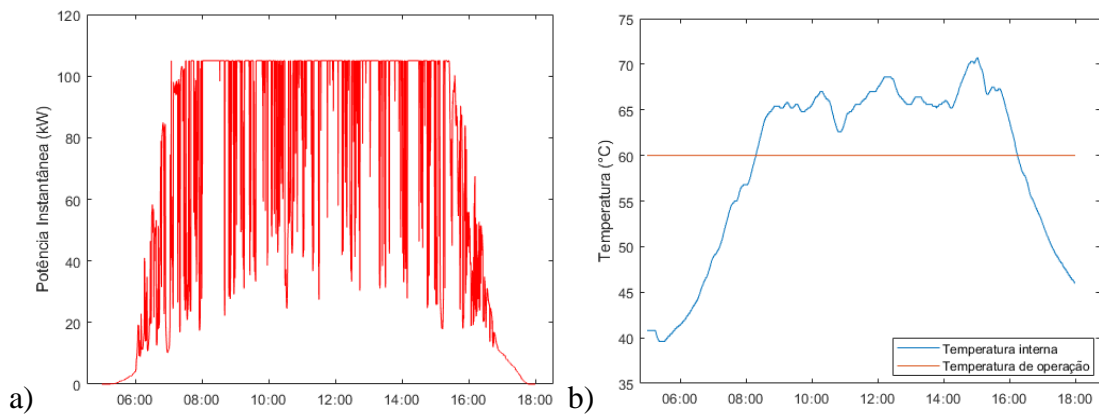


Figura 4.8. a) Potência instantânea e b) Temperatura interna do inversor do sistema fotovoltaico no dia 04 de março de 2023 na cidade de João Pessoa

No que se refere a tensão dos módulos conectados aos inversores apresentados na Figura 4.9 (a) para o dia 10 de fevereiro e 4.9 (b) para o dia 04 de março, não foi possível observar impacto associado aos eventos de superirradiância ou a superirradiância extrema. Lappalainen e Kleissl (2020) explicam que eventos de

superirradiância, mesmo que aumentem um pouco as tensões, não causam danos de curto prazo ao equipamento, assim como não causam desconexão dos sistemas fotovoltaicos. Entretanto, o aumento da tensão da corrente contínua reduz a eficiência dos inversores.

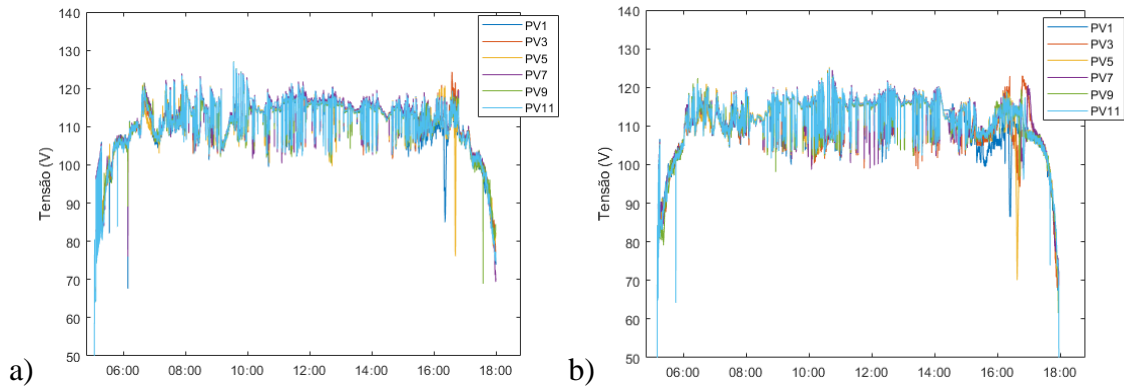


Figura 4.9. Tensão nos módulos fotovoltaicos (PV) conectados ao inversor: a) Dia 10 de fevereiro de 2023 e b) Dia 04 de março de 2023 na cidade de João Pessoa

A corrente de saída no dia 10 de fevereiro, Figura 4.10 (a), registrou valores acima da corrente máxima de 15 A em todos os módulos, sendo os maiores picos do módulo PV 9 (verde) e PV 3 (vermelho) por volta de 10 horas e por volta das 12 horas no módulo PV 7 (roxo). No dia 04 de março (Figura 4.10.b), as correntes mais elevadas de 21 A foram dos módulos PV 3 e PV 7, também entre 10 e 12 horas. De acordo com Lappalainen e Kleissl (2020), a corrente contínua dos módulos FV aumenta ligeiramente com o aumento da temperatura de operação.

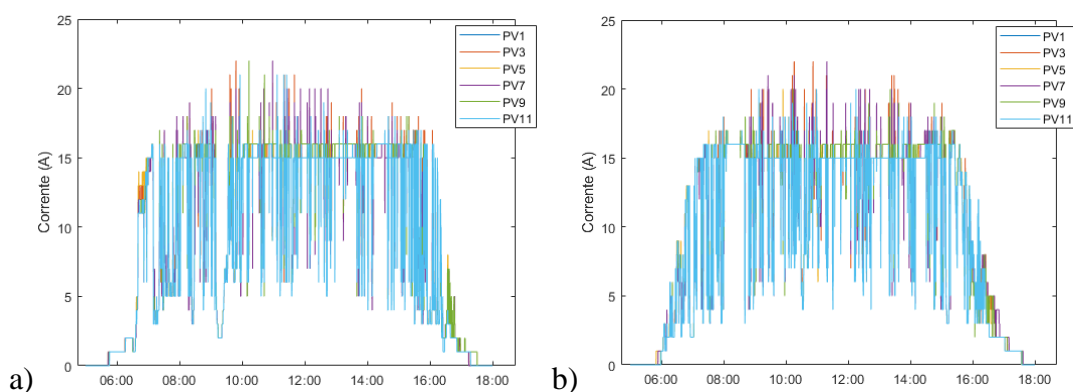


Figura 4.10. Correntes dos módulos fotovoltaicos (PV) conectados ao inversor: a) Dia 10 de fevereiro de 2023 e b) Dia 04 de março de 2023 na cidade de João Pessoa

Portanto, na análise dos fenômenos de irradiância aprimorada por nuvens, foi possível perceber que mesmo em dias de eventos de superirradiância extrema, no qual a irradiância observada em superfície é superior ao valor da constante solar, há também eventos de superirradiância.

Além disso, no que se refere aos impactos, diferente do proposto por Do Nascimento *et al.* (2019) e Gueymard (2017) cujas avaliações de impactos não inclui critério de superirradiância, sob justificativa de que o evento não produz efeitos significantes em usinas fotovoltaicas, no presente trabalho foi possível evidenciar que eventos de superirradiância podem gerar impactos tanto quanto eventos de superirradiância extrema.

Assim como no trabalho de Inmam *et al.* (2016), no presente estudo, notou-se através do perfil diário de irradiância (Figura 4.5.a) que a passagem de nuvens produz rampas de irradiância com diferentes declives. No entanto, também foi constatado através da análise da Figura 4.5 (b) que nem todos eventos de superirradiância extrema produzem rampas ou declinação. De acordo com Piotrowicz e Maránda (2013), as variações repentinas de irradiância exigem uma maior capacidade dos algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência dos inversores.

No que se refere aos tipos de impactos provocados por eventos de superirradiância extrema, os efeitos da sobretemperatura dos inversores foram significativos sobre a potência instantânea e correntes dos módulos. Durante os eventos, o aumento da temperatura eleva a potência, de modo que se faz necessário a redução na potência instantânea para que não exceda a potência nominal (SCARABELOT; RAMPINELLI; RAMBO, 2021). Não obstante, a elevação da temperatura também provocou aumento modesto da corrente dos módulos assim como apontado no trabalho de Lappalainen e Kleissl (2020).

4.4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram apresentados os eventos de superirradiância extrema por meio de diferentes bases de dados para a cidade de João Pessoa-Paraíba. Trata-se de um estudo inédito para a região a cerca deste tema. É importante ressaltar o uso das imagens para confirmação da ocorrência dos eventos, além de que as imagens permitem a visualização exata do fenômeno provocado pela passagem das nuvens. Outrossim, os dados da Usina Solar trouxeram ainda mais embasamento para as afirmações que já

constam na literatura, assim como aprofundaram nos efeitos que os eventos causam na temperatura interna do inversor.

Notou-se que tanto superirradiância, quanto superirradiância extrema produzem elevação da temperatura, seja de maneira transitória ou duradoura, gerando efeitos na potência instantânea e corrente dos módulos conectados ao inversor. Devido aos avanços na tecnologia de fabricação destes equipamentos, os inversores mais modernos possuem mecanismos para evitar danos severos aos sistemas, no entanto, em sistemas fotovoltaicos subdimensionados, os impactos podem provocar danos.

Diante disso, as informações apresentadas neste estudo servem de base para o dimensionamento de futuras usinas a serem instaladas em João Pessoa ou outras áreas com características semelhantes. A metodologia utilizada neste trabalho pode ser reproduzida por outros pesquisadores, de modo a contribuir para um melhor aproveitamento energético em sistemas fotovoltaicos e progressão da participação desses sistemas na matriz elétrica mundial.

4.5 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. P.; ZILLES, R.; LORENZO, E. Extreme overirradiance events in São Paulo, Brazil. **Sol. Energy**, 110, p. 168-173, 2014.

DE ANDRADE, R.; TIBA, C. Extreme global solar irradiance due to cloud enhancement in northeastern Brazil. **Renewable energy**, v. 86, p. 1433-1441, 2016.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Wiley: Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition - John A. Duffie, William A. Beckman. 2013.

FRÖHLICH, C.; WEHRLI, C. Magnetic tape received by personal communication. **World Radiation Center**, Davos, Suíça, 1981.

GUEYMARD, C. A. Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high-frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. Part 1: Impacts on global horizontal irradiance. **Solar Energy**, v. 153, p. 755-765, 2017.

HANSEN, C.; STEIN, J.; ELLIS, A. Statistical criteria for characterizing irradiance time series. **Sandia National Laboratories (SNL)**, Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2010.

IQBAL, M. An introduction to solar radiation. Canadá: **Academic Press**, 1983.

INMAN, R.; CHU, Y.; COIMBRA, C. Cloud enhancement of global horizontal irradiance in California and Hawaii. **Solar Energy**, v. 130, p. 128-138, 2016.

JÄRVELÄ, M.; VALKEALAHTI, S. Operation of a PV power plant during overpower events caused by the cloud enhancement phenomenon. **Energies**, v. 13, n. 9, p. 2185, 2020.

JÄRVELÄ, M.; LAPPALAINEN, K.; VALKEALAHTI, S. Characteristics of the cloud enhancement phenomenon and PV power plants. **Solar Energy**, v. 196, p. 137-145, 2020.

LAPPALAINEN, K.; KLEISSL, J. Analysis of the cloud enhancement phenomenon and its effects on photovoltaic generators based on cloud speed sensor measurements. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 12, n. 4, p. 043502, 2020.

LILLO-BRAVO, I. *et al.* Impact of energy losses due to failures on photovoltaic plant energy balance. **Energies**, v. 11, n. 2, p. 363, 2018.

LIU, Kuo-Nan. An Introduction to Atmospheric Radiation. **Elsevier**, 2nd, p.7, 2002.

LOGHMARI, I.; TIMOUMI, Y.; MESSADI, A. Performance comparison of two global solar radiation models for spatial interpolation purposes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 837-844, 2018.

NGO, X. C. *et al.* Grid-connected photovoltaic systems with single-axis sun tracker: case study for Central Vietnam. **Energies**, v. 13, n. 6, p. 1457, 2020.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de energia solar**. 2. Ed. São José dos Campos: INPE, 80p, 2017.

PIACENTINI, R. *et al.* Extreme total solar irradiance due to cloud enhancement at sea level of the NE Atlantic coast of Brazil. **Renewable Energy**, v. 36, n. 1, p. 409-412, 2011.

PIOTROWICZ, M.; MARÁÑDA, W. Report on efficiency of field-installed PV-inverter with focus on radiation variability. In: **Proceedings of the 20th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems-MIXDES 2013**. IEEE, p. 440-443, 2013.

RUTHER, R.; DO NASCIMENTO, L.; CAMPOS, R. Performance assessment issues in utility-scale photovoltaics in warm and sunny climates. **Renewable Energy and Environmental Sustainability**, v. 2, p. 35, 2017.

SCARABELOT, L. T.; RAMPINELLI, G. A.; RAMBO, C. R. Overirradiance effect on the electrical performance of photovoltaic systems of different inverter sizing factors. **Solar Energy**, v. 225, p. 561-568, 2021.

SPENCER, J.W. Fourier series representation of the position of the Sun. **Search**, v. 2, p. 162- 172, 1971.

SXCCD. Starlight Xpress, 2023. Câmera Oculus All-Sky 150°. Disponível em: <https://www.sxccd.com/product/oculus-all-sky-camera-150/>. Acesso em: 31 de mai. de 2023.

TAPAKIS, R.; CHARALAMBIDES, A. G. Enhanced values of global irradiance due to the presence of clouds in Eastern Mediterranean. **Renewable energy**, v. 62, p. 459-467, 2014.

TIBA, CHIGUERU; SILVA LEAL, SÉRGIO DA. Enhancement of UV radiation by cloud effect in NE of Brazil. **International Journal of Photoenergy**, v. 2017, 2017.

UFPB passa a contar com usina-escola que utiliza inteligência artificial para ampliar eficiência energética. **ASCOM**, 2023. Disponível em: <https://www.ufpb.br/ufpb/contents/noticias/ufpb-passa-a-contar-com-usina-escola-que-utiliza-inteligencia-artificial-para-ampliar-eficiencia-energetica>. Acesso em: 31 de mai. de 2023

YORDANOV, G. *et al.* Overirradiance (Cloud Enhancement) Events at High Latitudes. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 3, n. 1, p. 271-277, 2013.

ZHANG, J. *et al.* Physical process and statistical properties of solar irradiance enhancement observed under clouds. **Japanese Journal of Applied Physics**, 57, 08RG11, 2018

ZOU, L. *et al.* Estimation of global solar radiation using an artificial neural network based on an interpolation technique in southeast China. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 146, p. 110-122, 2016.

CAPÍTULO 5

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Através da revisão de literatura dos eventos de superirradiância e os seus impactos em sistemas fotovoltaicos, ficou evidente que se trata de um tema ainda pouco discutido, no qual os artigos mais relevantes começaram a ser publicados apenas nos últimos 10 anos. No que se refere aos eventos de superirradiância, notou-se que ocorrem devido a passagem de nuvens cujas bordas podem intensificar a quantidade de irradiância solar medida em superfície, de modo que fatores climáticos e geográficos não influenciam na ocorrência dos eventos. Os principais impactos negativos dizem respeito a excedência da potência nominal do inversor, flutuação de energia em rede que comprometem a qualidade do fornecimento de energia e aumento da temperatura dos inversores. Por outro lado, impactos positivos dos eventos de superirradiância foram notados sobre os módulos fotovoltaicos que tendem ao aumento da eficiência entre a passagem da nuvem e o efeito provocado pelas bordas.

No estudo da irradiância solar global em estações solarimétricas do Nordeste brasileiro, foi observado que eventos de superirradiância tendem a ser registrados em todos os meses do ano, entretanto eventos de superirradiância extrema são mais comuns em meses de verão. A associação entre os eventos e algumas variáveis climatológicas foram investigadas por meio do teste de correlação de Spearman. Para a estação Natal, um aumento no número de eventos associou-se positivamente a meses com maior nebulosidade. Em São Luís, a nebulosidade e a precipitação mensal associaram-se também aos meses com mais eventos, enquanto a insolação esteve associada negativamente aos eventos. Com relação a duração, eventos de superirradiância duram em média de 1 a 2 minutos, enquanto os extremos duram em média 2 minutos. Os horários mais comuns para ocorrência dos eventos foram notados entre 12 e 13 horas.

No artigo sobre impactos da superirradiância e superirradiância extrema na produção de energia em usina solar de João Pessoa, foi destacado o caráter inédito do estudo para a região. A possibilidade de construir uma metodologia com dados de estação meteorológica, imagens do céu e dados reais de produção contribuíram para corroborar a importância deste estudo no dimensionamento de sistemas. Notou-se que os dois critérios de identificação de eventos geram impactos nos sistemas fotovoltaicos,

distintos somente devido ao caráter transitório ou mais duradouro. No que se refere aos impactos foram observados aumentos na temperatura de operação do inversor, elevação da potência instantânea e na corrente dos módulos conectados ao inversor.

Diante do exposto, este trabalho revela as diversas formas de impactos que eventos de superirradiância e superirradiância extrema podem provocar na geração de energia fotovoltaica. Por se tratar de um assunto recente, as grandes usinas não têm conhecimentos de tais impactos, assim como os profissionais que dimensionam projetos de geração distribuída também os desconhecem. Dessa maneira, este estudo serve de referência para o assunto, especialmente na região Nordeste brasileira no qual grandes empreendimentos de energia solar já existem e muitos outros estão sendo implantados para entrar em operação nos próximos anos.

Sugere-se para os trabalhos futuros:

- Utilizar bases de dados de confiança com resolução de 1 minuto ou menor de irradiância solar global com no mínimo 1 ano de campanha de medição.
- Analisar os eventos identificados através dos critérios expostos neste trabalho e buscar associar aos dados de produção de energia solar.
- Propor um método de identificação objetiva de superirradiância provocadas por nuvens com uso de imagens de câmeras que registram imagens do céu.

REFERÊNCIAS DE TODA A DISSERTAÇÃO

ALMEIDA, M. P.; ZILLES, R.; LORENZO, E. Extreme overirradiance events in São Paulo, Brazil. **Sol. Energy**, 110, p. 168-173, 2014.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020. Brasília, 2022.

CASTILLEJO-CUBEROS, A.; ESCOBAR, R. Detection and characterization of cloud enhancement events for solar irradiance using a model-independent, statistically-driven approach. **Solar Energy**, v. 209, p. 547-567, 2020.

CHASE, O. A. *et al.* A low-cost, stand-alone sensory platform for monitoring extreme solar overirradiance events. **Sensors**, v. 18, n. 8, p. 2685, 2018.

DE ANDRADE, R. C.; TIBA, C. Extreme global solar irradiance due to cloud enhancement in northeastern Brazil. **Renewable energy**, v. 86, p. 1433-1441, 2016.

DE GRUIJL, F. R. Skin cancer and solar UV radiation. **European Journal of Cancer**, v. 35, n. 14, p. 2003-2009, 1999.

DEO, R. C. *et al.* Forecasting solar photosynthetic photon flux density under cloud cover effects: novel predictive model using convolutional neural network integrated with long short-term memory network. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, p. 1-38, 2022.

DESCHAMPS, E. M.; RÜTHER, R. Optimization of inverter loading ratio for grid connected photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 179, p. 106-118, 2019.

DO NASCIMENTO, L. R. *et al.* Extreme solar overirradiance events: Occurrence and impacts on utility-scale photovoltaic power plants in Brazil. **Solar Energy**, v. 186, p. 370-381, 2019.

DO NASCIMENTO, L. R. *et al.* Performance assessment of solar photovoltaic technologies under different climatic conditions in Brazil. **Renewable Energy**, v. 146, p. 1070-1082, 2020.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Wiley: Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition - John A. Duffie, William A. Beckman. 2013.

EPE: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Ministério de Minas e Energia. Relatório Síntese 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/balancoenergetico-nacional-2022>. Acesso em: 05/06/2022.

FEISTER, U.; CABROL, N.; HÄDER, D. UV irradiance enhancements by scattering of solar radiation from clouds. **Atmosphere**, v. 6, n. 8, p. 1211-1228, 2015.

FRÖHLICH, C.; WEHRLI, C. Magnetic tape received by personal communication. **World Radiation Center**, Davos, Suíça, 1981.

GELSOR, N. *et al.* Solar energy on the Tibetan Plateau: Atmospheric influences. **Solar Energy**, v. 173, p. 984-992, 2018.

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. **Global and Planetary Change**, 100, p. 172-182, 2013.

GU, L. *et al.* Cloud modulation of surface solar irradiance at a pasture site in southern Brazil. **Agric. For. Meteorol.** 106 (2), 117-129, 2001.

GUEYMARD, C. A. Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high-frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. Part 1: Impacts on global horizontal irradiance. **Solar Energy**, v. 153, p. 755-765, 2017a.

GUEYMARD, C. A. Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high-frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. Part 2:

Performance of separation and transposition models for global tilted irradiance. **Solar Energy**, v. 153, p. 766-779, 2017b.

GUEYMARD, C. A.; RUIZ-ARIAS, J. A. Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct irradiance predictions from 1-min global irradiance. **Solar Energy**, v. 128, p. 1-30, 2016.

HANSEN, C.; STEIN, J.; ELLIS, A. Statistical criteria for characterizing irradiance time series. **Sandia National Laboratories (SNL)**, Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2010.

INMAN, R.H.; CHU, Y.; COIMBRA, C. F. M. Cloud enhancement of global horizontal irradiance in California and Hawaii. **Solar Energy**, v. 130, p. 128-138, 2016.

INPE. SONDA: Sistema Nacional de Organização de Dados Ambientais, 2021. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/>. Acesso em: 30/05/2022.

IQBAL, M. An introduction to solar radiation. Canadá: **Academic Press**, 1983.

IRENA. Renewable Capacity Statistics 2022. The International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, 2022.

JAMROEN, C. *et al.* A novel UV sensor-based dual-axis solar tracking system: Implementation and performance analysis. **Applied Energy**, v. 299, p. 117295, 2021.

JÄRVELÄ, M.; LAPPALAINEN, K.; VALKEALAHTI, S. Characteristics of the cloud enhancement phenomenon and PV power plants. **Solar Energy**, v. 196, p. 137-145, 2020.

JÄRVELÄ, M.; VALKEALAHTI, S. Operation of a PV power plant during overpower events caused by the cloud enhancement phenomenon. **Energies**, v. 13, n. 9, p. 2185, 2020.

KEMPE, MICHAEL D. Ultraviolet light test and evaluation methods for encapsulants of photovoltaic modules. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 94, n. 2, p. 246-253, 2010.

KILLINGER, S.; ENGERER, N.; MÜLLER, B. QCPV: A quality control algorithm for distributed photovoltaic array power output. **Solar Energy**, v. 143, p. 120-131, 2017.

KOTTEK, M. *et al.* World Map of the Koppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v.15, 259-263, 2006.

KREUWEL, F. P. M. *et al.* Analysis of high frequency photovoltaic solar energy fluctuations. **Solar Energy**, v. 206, p. 381-389, 2020.

LABREN. Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia. Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª Edição (2017). Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 01/06/2022.

LAPPALAINEN, K.; KLEISSL, J. Analysis of the cloud enhancement phenomenon and its effects on photovoltaic generators based on cloud speed sensor measurements. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 12, n. 4, p. 043502, 2020.

LAPPALAINEN, K. ; VALKEALAHTI, S. Analysis of shading periods caused by moving clouds. **Solar Energy**, v. 135, p. 188-196, 2016a.

LAPPALAINEN, K.; VALKEALAHTI, S. Apparent velocity of shadow edges caused by moving clouds. **Solar Energy**, v. 138, p. 47-52, 2016b.

LEVY, Y.; ELLIS, T. J. A system approach to conduct an effective literature review in support of information systems research. *Informing Science Journal*, v. 9, p. 181-212, 2006.

LILLO-BRAVO, I. *et al.* Impact of energy losses due to failures on photovoltaic plant energy balance. **Energies**, v. 11, n. 2, p. 363, 2018.

- LIU, Kuo-Nan. An Introduction to Atmospheric Radiation. **Elsevier**, 2nd, p.7, 2002.
- LOGHMARI, I.; TIMOUMI, Y.; MESSADI, A. Performance comparison of two global solar radiation models for spatial interpolation purposes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 837-844, 2018.
- LOHMANN, G. M.; MONAHAN, A. H.; HEINEMANN, D. Local short-term variability in solar irradiance. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, n. 10, p. 6365-6379, 2016.
- LUOMA, J.; KLEISSL, J.; MURRAY, K. Optimal inverter sizing considering cloud enhancement. **Solar energy**, v. 86, n. 1, p. 421-429, 2012.
- MARTINS, G. L.; MANTELLI, S. L.; RUTHER, R. Evaluating the performance of radiometers for solar overirradiance events. **Solar Energy**, v. 231, p. 47-56, 2022.
- MAYER, M. J. Effects of the meteorological data resolution and aggregation on the optimal design of photovoltaic power plants. **Energy Conversion and Management**, v. 241, p. 114313, 2021.
- MEDEIROS, F. J. de; SILVA, C. M. S; BEZERRA, B. G. Calibration of ångström- Prescott equation to estimate daily solar radiation on Rio Grande do Norte state, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 409-416, 2017.
- MONGEON, P.; PAUL-HUS, A. The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. **Scientometrics**, v. 106, n. 1, p. 213-228, 2016.
- NGO, X. C. *et al.* Grid-connected photovoltaic systems with single-axis sun tracker: case study for Central Vietnam. **Energies**, v. 13, n. 6, p. 1457, 2020.
- NORRIS, D. J. Correlation of solar radiation with clouds. **Solar Energy**, v. 12, n. 1, p. 107-112, 1968.

OMAZIC, A. *et al.* Relation between degradation of polymeric components in crystalline silicon PV module and climatic conditions: A literature review. **Solar energy materials and solar cells**, v. 192, p. 123-133, 2019.

PANDEY, A.; PANDEY, P.; TUMULURU, J. S. Solar energy production in India and commonly used technologies—An overview. **Energies**, v. 15, n. 2, p. 500, 2022.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de energia solar**. 2. Ed. São José dos Campos: INPE, 80p, 2017.

PFENNINGER, Stefan; STAFFELL, Iain. Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data. **Energy**, v. 114, p. 1251-1265, 2016.

PIACENTINI, R. D. *et al.* Extreme total solar irradiance due to cloud enhancement at sea level of the NE Atlantic coast of Brazil. **Renewable Energy**, v. 36, n. 1, p. 409-412, 2011.

PIACENTINI, R. D.; CEDE, A.; BÁRCENA, H. Extreme solar total and UV irradiances due to cloud effect measured near the summer solstice at the high-altitude desertic plateau Puna of Atacama (Argentina). **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n. 6, p. 727-731, 2003.

PIEDEHIERRO, A. A. *et al.* Evaluation of enhancement events of total solar irradiance during cloudy conditions at Granada (Southeastern Spain). **Atmospheric Research**, v. 135, p. 1-7, 2014.

PIOTROWICZ, M.; MARAÑDA, W. Report on efficiency of field-installed PV-inverter with focus on radiation variability. In: **Proceedings of the 20th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems-MIXDES 2013**. IEEE, p. 440-443, 2013.

RUTHER, R.; DO NASCIMENTO, L. R.; CAMPOS, R. A. Performance assessment issues in utility-scale photovoltaics in warm and sunny climates. **Renewable Energy and Environmental Sustainability**, v. 2, p. 35, 2017.

SANTIAGO, I. *et al.* Classification of daily irradiance profiles and the behaviour of photovoltaic plant elements: The effects of cloud enhancement. **Applied Sciences**, v. 11, n. 11, p. 5230, 2021.

SCARABELOT, L. T.; RAMPINELLI, G. A.; RAMBO, C. R. Overirradiance effect on the electrical performance of photovoltaic systems of different inverter sizing factors. **Solar Energy**, v. 225, p. 561-568, 2021.

SPENCER, J.W. Fourier series representation of the position of the Sun. **Search**, v. 2, p. 162- 172, 1971.

SXCCD. Starlight Xpress, 2023. Câmera Oculus All-Sky 150°. Disponível em: <https://www.sxccd.com/product/oculus-all-sky-camera-150/>. Acesso em: 31 de mai. de 2023.

TANESAB, J. *et al.* The contribution of dust to performance degradation of PV modules in a temperate climate zone. **Solar Energy**, v. 120, p. 147-157, 2015.

TAPAKIS, R.; CHARALAMBIDES, A. G. Enhanced values of global irradiance due to the presence of clouds in Eastern Mediterranean. **Renewable energy**, v. 62, p. 459-467, 2014.

TIBA, C.; SILVA LEAL, S. D. Enhancement of UV radiation by cloud effect in NE of Brazil. **International Journal of Photoenergy**, v. 2017, 2017.

UFPB passa a contar com usina-escola que utiliza inteligência artificial para ampliar eficiência energética. **ASCOM**, 2023. Disponível em: <https://www.ufpb.br/ufpb/contents/noticias/ufpb-passa-a-contar-com-usina-escola-que-utiliza-inteligencia-artificial-para-ampliar-eficiencia-energetica>. Acesso em: 31 de mai. de 2023.

URBACH, Frederick. Potential effects of altered solar ultraviolet radiation on human skin cancer. **Photochemistry and photobiology**, v. 50, n. 4, p. 507-513, 1989.

VAMVAKAS, I.; SALAMALIKIS, V.; KAZANTZIDIS, A. Evaluation of enhancement events of global horizontal irradiance due to clouds at Patras, South-West Greece. **Renewable Energy**, v. 151, p. 764-771, 2020.

WEN, G.; MARSHAK, A.; CAHALAN, R. F. Importance of molecular Rayleigh scattering in the enhancement of clear sky reflectance in the vicinity of boundary layer cumulus clouds. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 113, n. D24, 2008.

YORDANOV, G. *et al.* Overirradiance (Cloud Enhancement) Events at High Latitudes. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 3, n. 1, p. 271-277, 2013a.

YORDANOV, G; SAETRE, T. O.; MIDTGÅRD, O. M.. 100-Millisecond Resolution for Accurate Overirradiance Measurements. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 3, n. 4, p. 1354-1360, 2013b.

YORDANOV, G. H. A study of extreme overirradiance events for solar energy applications using NASA's I3RC Monte Carlo radiative transfer model. **Solar Energy**, v. 122, p. 954-965, 2015.

ZEHNER, M. *et al.* Systematic analysis of meteorological irradiation effects. *In: Proc. 25th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf. Exhib.*, Valência, Espanha, 2010, P. 4545-4548.

ZEHNER, M. *et al.* Energy loss due to irradiance enhancement. *In: Proc. 26th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf. Exhib.*, Hamburgo, Alemanha, 2011, P. 3935-3938.

ZHANG, J. *et al.* Physical process and statistical properties of solar irradiance enhancement observed under clouds. **Japanese Journal of Applied Physics**, 57, 08RG11, 2018.

ZOU, L. *et al.* Estimation of global solar radiation using an artificial neural network based on an interpolation technique in southeast China. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 146, p. 110-122, 2016.