

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
BACHARELADO EM METEOROLOGIA**

MOISÉS ELIAS NASCIMENTO RUFINO DA COSTA

**ANÁLISE COMPARATIVA DA SOBREIRRADIÂNCIA EM DIFERENTES
ESCALAS TEMPORAIS PARA CIDADES DO RIO GRANDE DO NORTE**

Natal

2024

ANÁLISE COMPARATIVA DA SOBREIRRADIÂNCIA EM DIFERENTES ESCALAS TEMPORAIS PARA CIDADES DO RIO GRANDE DO NORTE

Por

MOISÉS ELIAS NASCIMENTO RUFINO DA COSTA

Monografia apresentada à
Coordenação do Curso de
Meteorologia da Universidade
Federal do Rio Grande do Norte,
como requisito parcial à obtenção
do Título de Bacharel em
Meteorologia.

Orientador(a): Prof. Pedro Rodrigues Mutti

NATAL

2024



Esta obra está licenciada com uma licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Setorial Prof. Ronaldo Xavier de Arruda - CCET

Costa, Moisés Elias Nascimento Rufino da.

Análise comparativa da estimativa da sobreirradiância em diferentes escalas temporais para cidades do Rio Grande do Norte / Moisés Elias Nascimento Rufino da Costa. - 2024.

55 f.: il.

Monografia (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Curso de Bacharelado em Meteorologia. Natal, RN, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Pedro Rodrigues Mutti.

1. Radiação solar - Monografia. 2. Efeito lente - Monografia.
3. Extremos de irradiância - Monografia. I. Mutti, Pedro Rodrigues. II. Título.

RN/UF/CCET

CDU 551.521.1

MOISÉS ELIAS NASCIMENTO RUFINO DA COSTA

**ANÁLISE COMPARATIVA DA SOBREIRRADIÂNCIA EM DIFERENTES
ESCALAS TEMPORAIS PARA CIDADES DO RIO GRANDE DO NORTE**

Monografia apresentada à
Coordenação do Curso de
Meteorologia da Universidade
Federal do Rio Grande do Norte,
como requisito parcial à obtenção
do Título de Bacharel em
Meteorologia.

Aprovada em: 27/02/2024

BANCA EXAMINADORA

Dr. Pedro Rodrigues Mutti (Orientador)
(Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas da UFRN)

Dr. Bergson Guedes Bezerra (Membro interno)
(Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas da UFRN)

Dra. Samira de Azevedo Santos Emiliavaca (Membro externo)
(Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis)

Dedico ao meus pais.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar agradecendo a minha mãe pela paciência que teve comigo desde o início dessa jornada em 2019 e pelo apoio que me deu para poder concluir essa etapa na minha vida. Durante esse período conheci diversas pessoas que não só me ajudaram como começaram a fazer parte de minha vida, sou eternamente grato as amigadas de Lucas e Paula com quem pude desfrutar muito desse meu tempo. No percurso também pude estagiar com a Paula e conhecer a Samira, minha orientadora de estágio no qual me ajudou a amadurecer muito como profissional, então agradeço profundamente aos seus ensinamentos e ao espelho de profissional que ela se tornou para mim, agravo também ao Alan que me auxiliou bastante no tempo em que estive estagiando, ele é uma pessoa incrível e merece o mundo.

Não posso deixar de agradecer também ao meu orientador prof. Pedro Mutti que me acolheu logo quando entrou na universidade, além de um ótimo professor, ele também foi capaz de simpatizar com meu cotidiano na universidade e me ajudar a trilhar o melhor caminho para essa conclusão. Um grande obrigado também ao prof. Bergson que foi um grande pai não só para mim como para vários alunos dessa instituição! Foi o responsável por me ajudar a ter condições de assistir as aulas online no período de pandemia no qual me encontrei sem computador e ele não mediu esforços para que eu pudesse estar assistindo as aulas.

Por fim, meus agradecimentos a música, a música foi um instrumento revigorador para mim durante esse período, que me ajudou a continuar seguindo em frente, acalmando minha mente, especialmente as da Taylor Swift.

*“I wanna be defined by the things that I love
Not the things I hate, not the things that I'm afraid of
Not the things that haunt me in the middle of the night
I, I just think that you are what you love”*

Taylor Swift – Daylight

RESUMO

A energia solar é uma fonte de energia renovável e abundante, que pode ser utilizada para diversos fins. Com o crescimento exponencial do aproveitamento da energia solar, uma das barreiras que surgiu e ainda é pouco estudada são os eventos de sobreirradiância, que são fenômenos que ocorrem quando a irradiação solar incidente na superfície da Terra é maior que a irradiação solar incidente no topo da atmosfera. Esse fenômeno pode influenciar a quantidade de energia disponível para a produção de eletricidade em sistemas fotovoltaicos, além de impactar no funcionamento de outros dispositivos suscetíveis à luz solar. Este trabalho tem como objetivo analisar, em diferentes escalas de tempo (minuto e segundo), a ocorrência e frequência dos eventos de sobreirradiância nas cidades de Lajes, Pau dos Ferros e Mossoró, no estado do Rio Grande do Norte, para o período entre março de 2022 e fevereiro de 2023. Foi observado como a grande parte dos eventos ocorre em menores intervalos de tempo, em ambas resoluções, e que quase todos os eventos registrados estão na faixa de irradiação entre 1000 W/m² e 1367 W/m². Pau dos Ferros foi a cidade que registou o evento com maior intensidade, com 1636 W/m² e também o evento com maior duração, de 386 segundos. A ocorrência dos eventos tende a crescer durante o outono em Pau dos Ferros e Mossoró, onde houve os maiores índices pluviométricos mensais dessas duas cidades, e diminuir durante o verão nas cidades de Lajes e Pau dos Ferros. O estudo desses eventos é fundamental para o desenvolvimento de soluções que minimizem seus impactos negativos na geração de energia solar e em outros sistemas.

Palavras-chave: Radiação solar, efeito lente, extremos de irradiação

ABSTRACT

Solar energy is a renewable and abundant source of energy that can be used for a variety of purposes. With the exponential growth in the use of solar energy, one of the barriers that has arisen and is still little studied is over-irradiance events, which are phenomena that occur when the solar irradiance incident on the Earth's surface is greater than the solar irradiance incident at the top of the atmosphere. This phenomenon can influence the amount of energy available for electricity production in photovoltaic systems, as well as having an impact on the operation of other devices susceptible to sunlight. The aim of this study is to analyze the occurrence and frequency of over-radiance events in the cities of Lajes, Pau dos Ferros and Mossoró, in the state of Rio Grande do Norte, at different time scales (minutes and seconds) for the period between March 2022 and February 2023. It was observed that most of the events occur in shorter time intervals, in both resolutions, and that almost all the events recorded are in the irradiance range between 1000 W/m^2 and 1367 W/m^2 . Pau dos Ferros was the city that recorded the event with the highest intensity, with 1636 W/m^2 and also the event with the longest duration, of 386 seconds. The occurrence of events tends to increase during the fall in Pau dos Ferros and Mossoró, where there was the highest monthly rainfall in these two cities, and decrease during the summer in the cities of Lajes and Pau dos Ferros. Studying these events is fundamental to developing solutions that minimize their negative impacts on solar energy generation and other systems.

Keywords: Solar radiation, lens effect, irradiance extremes

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
Lista de Figuras	4
Lista de Tabelas	5
Lista de Abreviaturas e siglas	6
1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVO	10
3. REFERÊNCIAL TEÓRICO	11
4. MATERIAL E MÉTODOS	14
4.1 Área de Estudo	14
4.2 Dados e Equipamentos	15
4.3 Identificação dos Eventos de Sobreirradiância	16
4.4 Controle de Dados	17
4.4.1 Requisitos de Medições (EPE)	17
4.4.2 Controle através de <i>flags</i>	18
5. RESULTADOS	25
5.1 Caracterização meteorológica das estações	25
5.2 Eventos gerais de sobreirradiância ($GHI > 1000 \text{ W/m}^2$)	26
5.3 Análise detalhada por faixa de irradiância	37
5.4 Discussão	47
6. CONCLUSÃO	49
7. REFERÊNCIAS	51

Lista de Figuras

Figura 1 – Localização das estações solarimétricas no estado do Rio Grande do Norte – Brasil	17
Figura 2 – Testes do procedimento de garantia de qualidade	22
Figura 3 – Perfil da irradiância (a) para um dia de céu claro, (b) para um dia parcialmente nublado e (c) para um dia completamente nublado, registrados na estação meteorológica do ISI-ER em Lajes-RN	30
Figura 4 – Frequência de ocorrência dos eventos de sobreirradiância mensal ($GHI \geq 1000 \text{ W/m}^2$) dos municípios estudados, na resolução por minuto: (a), (b) e (c); na resolução de segundo: (d), (e) e (f)	34
Figura 5 – Frequência temporal dos eventos de sobreirradiância mensal ($GHI \geq 1000 \text{ W/m}^2$) dos municípios estudados, na resolução por minuto: (a), (b) e (c); na resolução de segundo: (d), (e) e (f)	36
Figura 6 – Frequência de ocorrência dos eventos de sobreirradiância mensal ($1000 \text{ GHI W/m}^2 \geq GHI < 1367 \text{ GHI W/m}^2$) dos municípios estudados, na resolução por minuto: (a), (b) e (c); na resolução de segundo: (d), (e) e (f)	41
Figura 7 – Frequência de ocorrência dos eventos de sobreirradiância mensal ($GHI \geq 1367 \text{ GHI W/m}^2$) dos municípios estudados, na resolução por minuto: (a), (b) e (c); na resolução de segundo: (d), (e) e (f)	46

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Sensores das estações solarimétricas instaladas em cada cidade	19
Tabela 2 – Parâmetros que mensuram a qualidade dos dados	22
Tabela 3 – Médias anuais das variáveis meteorológicas para as três cidades durante o período estudado (março de 2022 à fevereiro de 2023)	29
Tabela 4 – Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m ² para a cidade de Lajes – RN	31
Tabela 5 – Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m ² para a cidade de Pau dos Ferros – RN	32
Tabela 6 – Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m ² para a cidade de Mossoró – RN	33
Tabela 7 – Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m ² e menor que 1367 W/m ² para a cidade de Lajes – RN	38
Tabela 8 – Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m ² e menor que 1367 W/m ² para a cidade de Pau dos Ferros – RN.	39
Tabela 9 – Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m ² e menor que 1367 W/m ² para a cidade de Mossoró – RN.	40
Tabela 10 - Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m ² e menor que 1367 W/m ² para a cidade de Lajes – RN.	43
Tabela 11 - Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m ² e menor que 1367 W/m ² para a cidade de Pau dos Ferros – RN	44
Tabela 12 - Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m ² e menor que 1367 W/m ² para a cidade de Mossoró – RN.	45

Lista de Abreviaturas e siglas

As	Clima tropical de savana com verão seco
BSh	Clima tropical semiárido, seco e quente
BSRN	<i>Baseline Surface Radiation Network</i>
cosθ_z	Cosseno do ângulo zenital
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EMPARN	Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte
flag 1	Dado bom
flag 2	Dado suspeito
flag 3	Dado anômalo
flag 4	Dado previamente anômalo
flag 5	Dado não testado
flag 6	Dado não disponível
GHI	Irradiância Global Horizontal
I₀	Irradiância extraterrestre
I_{bn}	Irradiância direta normal
I_{b,cc}	Irradiância direta de céu claro
I_d	Irradiância difusa
I_{d,cc}	Irradiância difusa de céu claro
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
I_g	Irradiância global
I_{g,cc}	Irradiância global de céu claro
I_{gm}	Irradiância global medida
Isc	Constante solar
ISI-ER	Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis
k_t	Índice de claridade
LAT	<i>Local Apparent Time</i>
long	Longitude local
longderef	Longitude de referência em relação ao meridiano de Greenwich
min	Minuto
NaN	<i>Not a Number</i>
NEB	Nordeste Brasileiro

OMM	Organização Meteorológica Mundial
RN	Rio Grande do Norte
s	Segundo
S_a	Constante solar corrigida pela distância real Sol-Terra
SAD	Sistema de Aquisição de Dados
sd	Desvio padrão
SP	São Paulo
t	Tempo
Temp	Temperatura
TST	<i>True Solar Time</i>
TW	<i>Terawatt</i>
UR	Umidade Relativa
UV	Ultravioleta
Vel	Velocidade do Vento
α	Alfa
d_n	Dia juliano
ϵ_0	Excentricidade da órbita da Terra
Γ	Dia angular
ϕ	Latitude do local
δ	Declinação solar
ω	Ângulo horário solar

1. INTRODUÇÃO

A energia solar provém do aproveitamento da radiação eletromagnética emitida pelo sol. É uma fonte de energia renovável e abundante, que pode ser utilizada para gerar eletricidade, aquecer ambientes e água, e produzir alimentos. Nos últimos anos, a energia solar tem experimentado um crescimento significativo em todo o globo. De acordo com a *Global Market Outlook for Solar Power 2022-2026*, em 2022, a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica no mundo atingiu 1 *terawatt* (TW). Esse crescimento é impulsionado por diversos fatores, incluindo o aumento da conscientização sobre a importância das energias renováveis, a redução dos custos de produção de energia solar e os incentivos governamentais para o setor. (BRESCHI, MALERBA e EDQUIST, 1997; STEFANELLO, MARANGONI e ZEFERINO, 2018)

Com o crescimento exponencial da energia solar, diversos estudos vão surgindo afim de aperfeiçoar a tecnologia ou enfrentar as barreiras que possam surgir ao seu desenvolvimento. Uma dessas barreiras, que ainda é pouco estudada são os eventos de sobreirradiância, que são fenômenos que ocorrem quando a irradiação solar incidente na superfície da Terra é maior que a irradiação solar incidente no topo da atmosfera; trata-se de um fluxo de radiação que persiste por segundos a minutos, relacionado à presença de nuvens fragmentadas, as quais direcionam a incidência difusa de radiação solar para um ponto específico na superfície (PFISTER *et al.*, 2003).

A radiação solar extraterrestre apresenta uma densidade média de fluxo de cerca de 1367 W/m² (conhecida como constante solar - *Isc*) (IQBAL, 1983), representando o valor máximo de irradiação no topo da atmosfera. No entanto, estudos indicam que, em condições bastante específicas, como quando ocorrem reflexões nas bordas de nuvens, as medições de irradiação na superfície terrestre podem exceder esse limite (ALMEIDA *et al.*, 2014; COSTA *et al.*, 2021; GU *et al.*, 2001; JARA *et al.*, 2021). Esses eventos podem influenciar consideravelmente o desempenho e a eficiência dos sistemas fotovoltaicos, sendo crucial compreendê-los para aprimorar a geração de energia, de forma a garantir maior segurança e confiabilidade e mitigando potenciais riscos, além de moldar um caminho para o desenvolvimento de inversores mais robustos e sistemas de controle de energia mais eficientes, afim de otimizar o aproveitamento da luz solar.

Em função disto, é possível notar que, apesar de trabalhos terem sido desenvolvidos para algumas regiões do globo, como para América do Sul (JARA *et al.*, 2021) e para o Mediterrâneo Oriental (TAPAKIS e CHARALAMBIDES, 2014), ainda existe uma lacuna de informações

para diversos locais que precisa ser preenchida. Alguns estudos também foram desenvolvidos para o Brasil, como os apresentados por Andrade e Tiba (2016), que identificaram eventos extremos de até 1648 W/m² para a cidade de Maceió – Alagoas e por Braga *et al.* (2020), que identificaram 2882 eventos de sobreirradiância na primeira das duas estações em Santa Catarina, dos quais 87% tiveram uma duração inferior a 1 minuto e 11251 eventos na segunda estação, também em Santa Catarina, com 94% deles apresentando uma resolução temporal inferior a 1 minuto. Mais estudos como esses são necessários para elucidar a variabilidade da sobreirradiância em diferentes escalas temporais e espaciais, identificar padrões sazonais e avaliar seu impacto específico em diversas regiões geográficas. Além disso, estudos mais detalhados podem contribuir para o desenvolvimento de estratégias eficientes na integração de fontes renováveis de energia, como a solar, no contexto das demandas energéticas contemporâneas.

Portanto, o presente trabalho tem como intuito apresentar uma análise detalhada da frequência de ocorrência e duração dos eventos de sobreirradiância para três cidades do estado do Rio Grande do Norte (RN) utilizando de dados de alta resolução.

2. OBJETIVO

Este estudo teve como objetivo realizar uma comparação entre a ocorrência de eventos de sobreirradiância nas resoluções de minuto e segundo, compreendendo os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar a sazonalidade de ocorrência dos eventos;
- Quantificar a frequência de ocorrência de eventos em diferentes cidades do Rio Grande do Norte.

3. REFERÊNCIAL TEÓRICO

A irradiância solar total que atinge a Terra desempenha um papel crucial no funcionamento do nosso ambiente. Essa energia é a principal fonte de sustento para a vida em nosso planeta e sua interação com a atmosfera é responsável por determinar as condições climáticas básicas, como temperatura, pressão atmosférica, umidade e formação de nuvens.

No entanto, a distribuição dessa radiação solar não é uniforme ao longo das diferentes regiões geográficas e ao longo do dia. Isso se deve a uma variedade de fatores, incluindo o movimento aparente do Sol no céu, a distância entre o Sol e a Terra, as coordenadas geográficas locais (latitude, longitude e altitude), bem como as condições atmosféricas, como a presença de nuvens e a reflexão da radiação pelo solo (PIACENTINI *et al.*, 2011).

Conforme descrito por Mota (1977), a radiação solar que atinge a superfície horizontal é composta por duas partes distintas: a componente direta, que consiste em raios solares paralelos que não sofrem influência da massa ótica, e a componente difusa, que surge da interação da radiação solar com os gases e partículas presentes na atmosfera. A soma dessas duas componentes é conhecida como radiação solar global.

Para medir a radiação global incidente na superfície terrestre, geralmente utiliza-se um piranômetro posicionado horizontalmente em uma superfície também horizontal. Já a radiação direta é medida por meio de um pireliômetro acoplado a um rastreador solar, que capta a radiação incidente sob um ângulo de 90° em relação ao sensor. Para projetar essa radiação no plano horizontal, é necessário multiplicá-la pelo cosseno do ângulo zenital. As irradiações global e direta podem ser calculadas integrando as curvas de irradiância ao longo do tempo desejado.

Este método, que emprega um sistema de rastreamento solar, é considerado razoavelmente preciso, sendo adotado como padrão devido ao fato de que as variações na massa ótica não interferem significativamente nas medidas (IQBAL, 1983).

O Brasil recebe uma quantidade substancialmente alta de radiação solar em grande parte do seu território, conforme documentado por Tiba *et al.* (2002). Como resultado, há um crescimento amplo das gerações de energia elétrica com fontes solares, tais como a fotovoltaica e a heliotérmica. Considerando os altos valores de irradiância como um requisito para a ocorrência, os eventos de sobreirradiância se tornam relativamente comuns nesse cenário (DO NASCIMENTO *et al.*, 2019).

Os eventos de sobreirradiância representam picos temporários na irradiância solar que excedem os valores esperados. Esses altos valores podem ser causados por diversos fatores,

como a presença de nuvens fragmentadas, as quais direcionam a incidência difusa de radiação solar para um ponto específico na superfície (PFISTER *et al.*, 2003). Embora esses eventos sejam transitórios e de curta duração, podem ter um impacto significativo na geração de energia solar, especialmente em sistemas fotovoltaicos (BRAGA *et al.*, 2018).

Esse fenômeno não possui definição formal na literatura, porém já foi observado e documentado desde 1968, com foco na região ultravioleta (UV) do espectro da radiação solar (NARRIS, 1968; MIMS; FREDERICK, 1994; GALLAGHER; LEE, 2006).

Tratando-se de aplicações fotovoltaicas, os estudos são mais recentes, como os apresentados por Pfister *et al.* (2003); Piacentini *et al.* (2011); Almeida; Zilles e Lorenzo (2014); Costa *et al.* (2021).

Piacentini *et al.* (2011), através de medições obtidas ao nível do mar na cidade de Recife/PE, Brasil, apresentou o registro de medições com valores altos e extremos da irradiação solar global em plano horizontal, entre fevereiro de 2008 e janeiro de 2009, demonstrando que em alguns dias esses valores ultrapassaram a Constante Solar corrigida pela distância real Sol-Terra (S_a). O maior valor extremo da irradiação solar total ultrapassou em 7,9% o valor da S_a equivalente ao dia, e em 42,3% o valor estimado do modelo de radiação para céu limpo.

Almeida; Zilles e Lorenzo (2014) apresentaram uma breve análise do evento de sobreirradiância mais extremo relatado no Brasil, até então observado, referentes ao dia 27 de novembro e 21 de dezembro, tendo o último um registro do valor de irradiação de 1590 W/m² medida no município de São Paulo/SP, Brasil, a uma altitude de 760 metros acima do nível do mar. Os autores apontaram que, nos dois dias analisados, cerca de um quarto da irradiação diária correspondeu às irradiações acima do valor utilizado para classificar equipamentos fotovoltaicos, de 1000 W/m².

Estudos como o de Do Nascimento *et al.* (2019), indicam que os eventos de sobreirradiância influenciam significativamente o desempenho das usinas fotovoltaicas, especialmente quando esses eventos persistem por mais de um minuto e coincidem com temperaturas ambiente superiores a 30°C. Sob tais condições, um repentino evento de sobreirradiância pode resultar na queima de fusíveis e na sobrecarga dos inversores, resultando em perdas de energia.

Assim, entende-se que, na atualidade, com o crescente uso de energias com fontes solares, a qual é diretamente impactada pela ocorrência desses eventos, a necessidade de estudar esse fenômeno se dá por esse elevado crescimento e aumento da demanda por energias renováveis e sustentáveis. É preciso entender e quantificar fenômenos como esse afim de otimizar o aproveitamento da energia solar, entender sobre sua frequência, duração e intensidade contribui

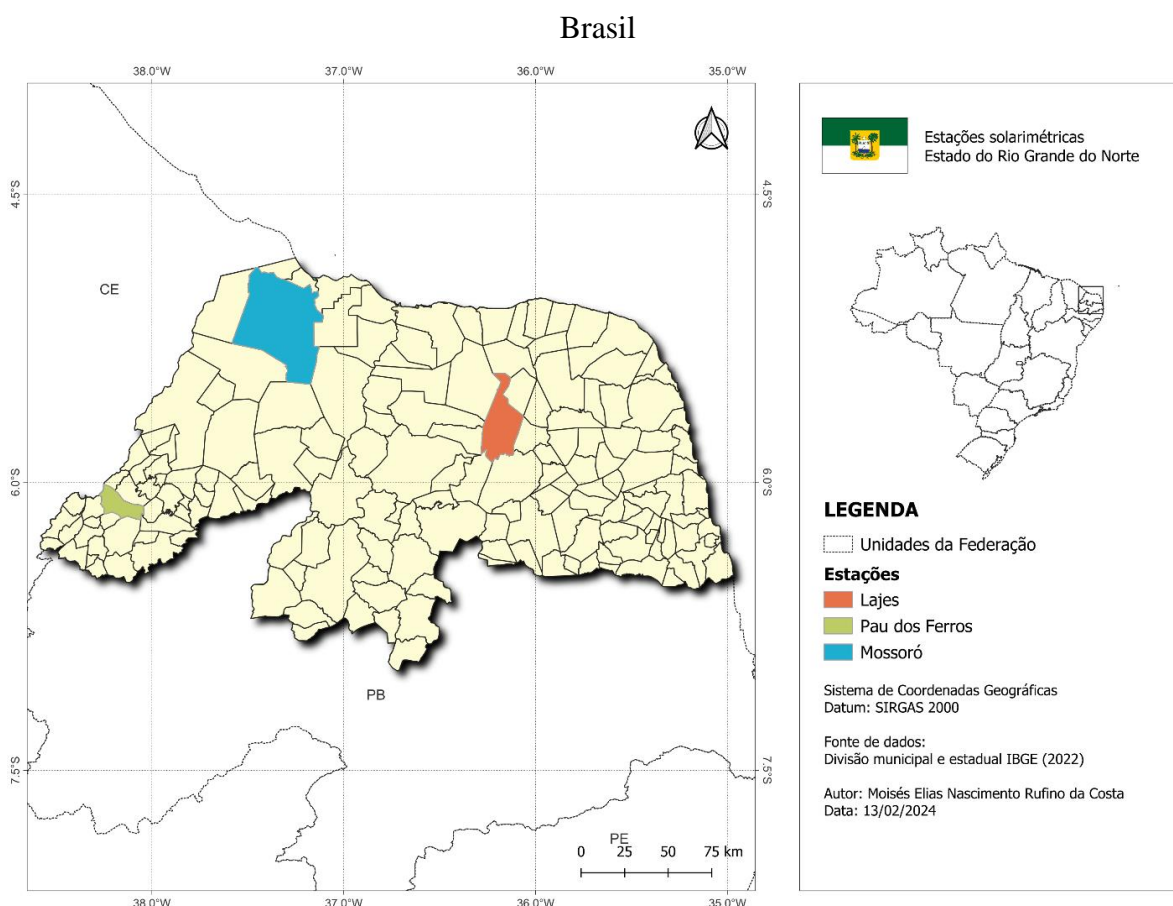
para desenvolver estratégias eficazes de dimensionamento, operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende três cidades do estado do Rio Grande do Norte, Lajes (-5,706841, -36,232853), Pau dos Ferros (-6,144001, -38,190438) e Mossoró (-5,176129, -37,343413). As três cidades fazem parte do semiárido do Nordeste Brasileiro (NEB), Lajes apresentando clima tipo BSh (clima tropical semiárido, seco e quente), Pau dos Ferros com clima As (clima tropical de savana com verão seco) e Mossoró com clima BSh (clima tropical semiárido, seco e quente), de acordo com a classificação climática de KÖPPEN-GEIGER (1936).

Figura 1 – Localização das estações solarimétricas no estado do Rio Grande do Norte –



A influência de cada fator meteorológico na sobreirradiância pode variar de acordo com a localização, época do ano e condições climáticas específicas. Por isso, entender aspectos sobre cada cidade pode ajudar a entender melhor sobre a ocorrência dos eventos.

4.2 Dados e Equipamentos

A pesquisa utilizou dados de Irradiância Global Horizontal (GHI) coletados em estações solarimétricas do Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis (ISI-ER). A medição do GHI foi realizada por piranômetros CMP6 da Kipp & Zonen, que registraram dados a cada segundo. Os dados brutos, coletados a cada segundo, foram posteriormente integrados a cada minuto, essa integração foi realizada por meio de um datalogger CR300 da Campbell Scientific, a integração dos dados resultou em um conjunto de valores de GHI com resolução temporal de um minuto. Os dados nas resoluções coletadas, de minuto e segundo, são adequados para a maioria dos estudos sobre energia solar, pois permite a análise da variabilidade da GHI em escalas de tempo relevantes para aplicações fotovoltaicas. Dados de velocidade do vento, temperatura e umidade também foram coletados nas estações e serão brevemente discutidos na seção de Resultados deste estudo.

A análise dos dados de sobreirradiância foi submetida a um controle de qualidade de dados para garantir o nível de confiança dos dados, como a utilização de *flags*, adotadas por Petribú *et al.* (2017), seguindo também os requisitos de medição solarimétrica da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), durante o período de março de 2022 até fevereiro de 2023 para as cidades de Lajes, Pau dos Ferros e Mossoró, localizadas no estado do Rio Grande do Norte, Brasil.

Como o desempenho dos módulos fotovoltaicos é calculado nas condições padrão de teste, ou seja, sob uma irradiância de 1000 W/m^2 , um espectro AM1.5 G e uma temperatura do módulo de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (definido conforme orientações da *International Electrotechnical Commission* IEC 60904-1:2020 e IEC 61215-1:2021). Os resultados gerados nesse estudo consideraram apenas os eventos de sobreirradiância que foram iguais ou superiores a 1000 W/m^2 , dado que valores inferiores a este não possuem relevância para o estudo. Tais eventos também serão divididos em duas categorias, a primeira com eventos maiores ou iguais a 1000 W/m^2 e menores que 1367 W/m^2 e a segunda com eventos apenas maiores ou iguais a 1367 W/m^2 , ao estabelecer essas duas categorias é possível explorar quais cidades podem apresentar eventos mais intensos e conseqüentemente, dependendo da duração, danosos aos sistemas fotovoltaicos.

A Tabela 1 apresenta a lista de instrumentos utilizados nesse estudo.

Tabela 1 - Sensores das estações solarimétricas instaladas em cada cidade

IDENTIFICAÇÃO DOS INSTRUMENTOS				
Instrumentos	Variável medida	Sigla	Unidade	Série
Datalogger CR300 – CELL215 – Campbell Scitenfic	Aquisição de dados	-	-	26824
Piranômetro CPM 6 – Kipp & Zonen	Irradiância Global Horizontal	GHI	W/m ²	214238
Termohigrômetro Hygro VUE10 – Campbell Scitenfic	Temperatura do ar	Temp	°C	E2191
	Umidade Relativa do ar	UR	%	
Anemômetro Wind SPD Sensor – Met One Instruments	Velocidade do Vento	Vel	m/s	B11083

4.3 Identificação dos Eventos de Sobreirradiância

Para realizar a identificação dos valores de sobreirradiância verificou-se quais valores de GHI medidos superaram os valores da irradiância extraterrestre (I_0). Os valores de I_0 foram estimados a partir da Equação (1):

$$I_0 = I_{sc} \cdot \varepsilon_0 \cdot \cos \theta_z \quad (1)$$

Onde I_{sc} é a constante solar igual a 1367 W/m², ε_0 é a excentricidade da órbita da Terra e $\cos \theta_z$ é o cosseno do ângulo zenital. A excentricidade ε_0 é expressa por:

$$\varepsilon_0 = 1,000110 + 0,0034221 \cos(\Gamma) + 0,001280 \sin(\Gamma) + \\ 0,000719 \cos(2\Gamma) + 0,000077 \sin(2\Gamma) \quad (2)$$

Onde Γ , em radianos, é chamado de dia angular e é representado em função do dia juliano (d_n):

$$\Gamma = 2\pi(d_n - 1)/365 \quad (3)$$

Por sua vez, o cosseno do ângulo zenital ($\cos \theta_z$) é medido em função da latitude do local (ϕ), da declinação solar (δ) e do ângulo horário (ω), sendo representado pela seguinte expressão:

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (4)$$

Se $\theta_z > 90^\circ$, $\cos\theta_z$ é considerado nulo.

δ é a declinação solar e depende do valor do dia juliano (d_n) e tem variação entre $-23^\circ 27'$ no solstício de verão e $23^\circ 27'$ no solstício de inverno e é dado por:

$$\delta = 23,45 \text{sen} \left\{ \frac{360}{365} (d_n + 284) \right\} \quad (5)$$

ω é o ângulo horário solar e corresponde ao deslocamento angular do movimento aparente do sol devido a rotação da terra e varia entre -180° e 180° . Cada hora corresponde a 15° de variação do ângulo solar. Por convenção, nas manhãs são negativos, nas tardes positivos e ao meio dia é igual a zero. Pode ser calculado conhecendo-se a hora local:

$$\omega = \{(TST - 12) 15\} \quad (6)$$

A hora solar verdadeira - TST (True Solar Time) depende da hora local aparente LAT (Local Apparent Time):

$$TST = LAT + (4 (longderef - long) + \epsilon_t) / 60 \quad (7)$$

$longderef$ é a longitude de referência em relação ao meridiano de Greenwich e $long$ é a longitude local. A longitude de referência é um padrão adotado para classificar regiões e seus fusos horários. No Brasil é adotado o valor de 45° Oeste.

A diferença entre a hora solar média e a hora solar verdadeira é definida como sendo a equação do tempo e decorre do fato de que a velocidade da Terra em torno do Sol não é constante (translação numa órbita elíptica). Assim, a equação do tempo varia com o dia do ano:

$$\epsilon_t(\Gamma) = 229,18 (0,000075 + 0,001868 \cos(\Gamma) - 0,032077 \text{sen}(\Gamma) - 0,014615 \cos(2\Gamma) - 0,04089 \text{sen}(2\Gamma)) \quad (8)$$

4.4 Controle de Dados

4.4.1 Requisitos de Medições (EPE)

Os dados também atenderam os critérios de medição estabelecidos pela EPE;

- a) As medições devem ser conduzidas em, pelo menos, uma estação solarimétrica localizada a uma distância não superior a 10 km do local do empreendimento;
- b) As grandezas a serem medidas incluem Irradiação Global Horizontal, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento;
- c) A frequência de medição deve ser de um minuto, com os dados integrados a cada intervalo de dez minutos;
- d) A campanha de medições deve ter duração mínima de 12 meses consecutivos;
- e) O índice de perda de dados não deve exceder 10% e nenhum período contínuo sem medições deve ultrapassar 15 dias;
- f) No caso de perda de dados, é necessário informar a taxa de perda e como os dados foram recuperados, por exemplo, através de correlação com outras fontes representativas da região.

4.4.2 Controle através de *flags*

Foi adotada a mesma utilização de *flags* estabelecida por Petribú *et al.* (2017), na qual os autores utilizam a inclusão de indicadores, também conhecidos como *flags*, nos processos de garantia de qualidade, sendo crucial para determinar a confiabilidade de uma amostra em uma série temporal. Cada etapa do procedimento de garantia de qualidade atribui uma matriz de *flags*, na qual cada amostra da série temporal recebe um único número conforme indicado na Tabela 2. Se um dado recebe a classificação "bom" (*flag* 1), significa que passou em todos os testes anteriores ao teste em questão. Um dado é rotulado como "suspeito" (*flag* 2) quando falha em um teste que não é conclusivo quanto à sua classificação, indicando incerteza se a amostra é um dado correto ou um *outlier*. Ao final do processo, se um dado suspeito não for classificado como anômalo em testes subsequentes, a decisão de utilizar ou não esse dado fica a critério do usuário. Se um dado é classificado como "anômalo" (*flag* 3) em um teste, ele não será considerado nos testes subsequentes, sendo rotulado como "previamente anômalo" (*flag* 4). A classificação "dado não testado" (*flag* 5) indica que uma amostra específica não será avaliada em determinado teste. Por exemplo, neste estudo, todas as amostras de radiação solar que representam o período noturno, além do início e do fim do dia solar, são classificadas como não testadas. Por fim, o indicador "dado não disponível" (*flag* 6) é utilizado para identificar que o dado bruto de um momento específico não foi registrado pelo Sistema de Aquisição de Dados - SAD.

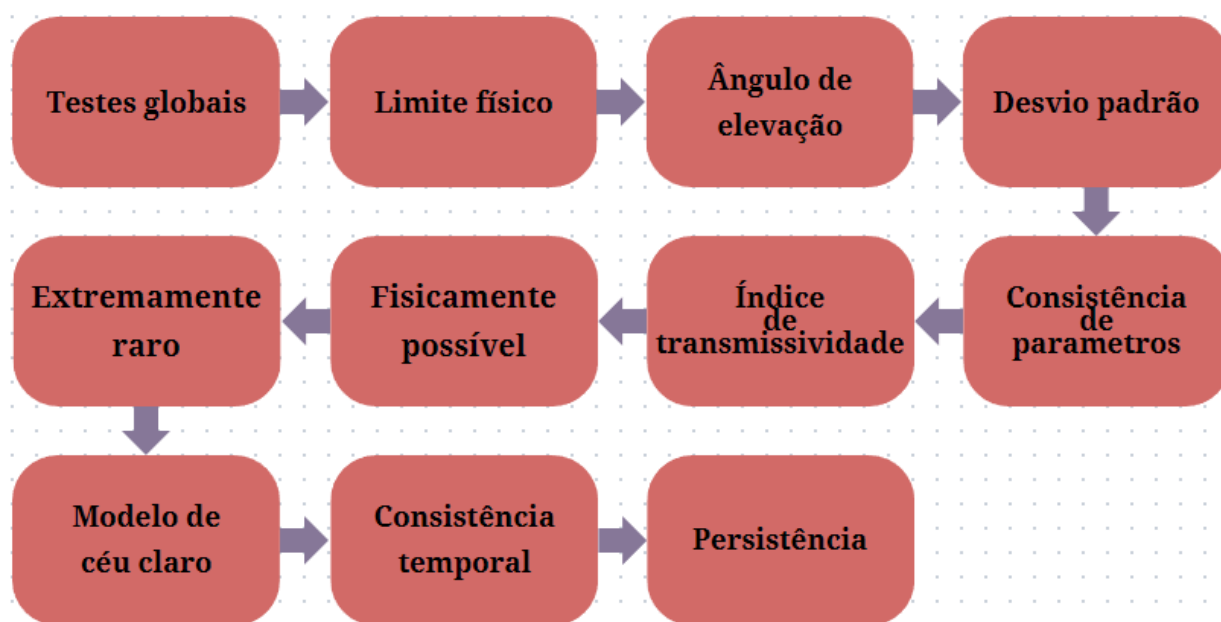
Tabela 2 - Parâmetros que mensuram a qualidade dos dados

Indicador	Descrição
1	Dado bom
2	Dado suspeito
3	Dado anômalo
4	Dado previamente anômalo
5	Dado não testado
6	Dado não disponível

Testes de garantia de qualidade

O procedimento de garantia de qualidade requer a execução sequencial dos testes, conforme indicado na Figura 2. Essa abordagem é adotada porque os testes iniciais têm como objetivo eliminar as anomalias mais evidentes, com base em limites físicos de aceitação para as variáveis em análise. A realização sequencial é crucial para evitar que essas amostras anômalas exerçam uma influência substancial nos testes subsequentes, pois poderiam alterar as distribuições estatísticas envolvidas, impactando, assim, a estimativa dos limites superiores e inferiores de aceitação para as variáveis.

Figura 2 - Testes do procedimento de garantia de qualidade



Fonte: Adaptado de Petribú *et al.* (2017).

Testes Globais

De acordo com Petribú *et al.* (2017), os testes globais são empregados na análise da série temporal como um conjunto, com o objetivo de verificar se há irregularidades, como discontinuidades, dados faltantes, lacunas e erros nos registros de data e hora. Com base nos resultados desses testes globais, a série pode ser descartada ou avançar para a próxima fase do processo, que envolve os testes locais. A aplicação dos testes globais incide nas séries de radiação global, direta e difusa, sendo suas descrições apresentadas a seguir.

a) Descontinuidade

A Empresa de Pesquisa Energética – EPE, estabelece que uma série de dados para a participação de leilões de empreendimentos fotovoltaicos, precisam ter, no mínimo um intervalo contínuo, sem a ausência de informações equivalente a 15 dias ou mais, em um período mínimo de 2 anos. Para evitar a inutilização da série de medição, é permitido subdividi-la em séries temporais independentes, uma que precede e outra que sucede a lacuna.

b) Missing data

De acordo com as diretrizes da EPE, uma série de medição é considerada válida para utilização somente se apresentar, no máximo, 10% de dados faltantes (identificados pelo *flag* 6). Essa condição é verificada nas séries de radiação solar global, direta e difusa.

c) Duplicidade de datas

Na série de dados proveniente do instrumento de medição, estão registradas informações sobre o momento em que cada amostra foi medida. Se houver dois momentos exatamente idênticos na mesma série, as amostras associadas a esses dois instantes de tempo são excluídas.

d) Lacunas

A série temporal consiste em amostras que têm entre si (duas amostras consecutivas) um determinado intervalo de tempo " t ", sendo que cada instante de medição é registrado pelo SAD. Se o intervalo de tempo entre duas amostras consecutivas for maior que " t ", é identificada uma lacuna temporal. Para resolver essa questão, sugere-se preencher as lacunas com NaNs (*Not a Number*), com o objetivo de preservar a sequência temporal e evitar associações incorretas entre dois conjuntos de dados de classes distintas naquele instante de tempo, como, por exemplo, observar a radiação global e a componente direta correspondente.

Testes Locais

Os testes locais abordam especificidades relacionadas à qualidade dos dados em cada localidade. Isso inclui verificações de limites físicos para a Irradiância Global Horizontal (GHI), eliminação de dados com ângulos de elevação abaixo de determinado limiar, avaliação do desvio padrão para garantir a consistência dos dados, além de testes para verificar a coerência entre os parâmetros derivados da radiação solar. Também são realizados testes para identificar e eliminar outliers evidentes, bem como para garantir a consistência temporal dos dados.

a) Limite físico

Os limites físicos com dados de Irradiância Global Horizontal (GHI) referem-se aos valores extremos que essa medida pode alcançar em condições naturais específicas. Nesse trabalho foram adotados os valores entre $-5 < \text{GHI} < 2000 \text{ W/m}^2$.

b) Ângulo de elevação

Conforme indicado por Maxwell *et al.* (1993), dados de radiação solar com ângulo de elevação $\alpha \leq 10^\circ$ devem ser eliminados devido à faixa de incerteza associada aos sensores de medição. Como nesse trabalho é utilizado equipamentos de alta precisão, o limite do ângulo de elevação adotado é $\alpha \leq 7^\circ$. Portanto, esse teste será implementado em todas as séries temporais, e todos os dados dentro desse intervalo serão designados como "dado não testado", recebendo o *flag* 5.

c) Desvio padrão

O desvio padrão é uma medida de dispersão de uma amostra, e segundo Gurgel (1958), serve para dar uma ideia o quão distante a amostra está da média. O desvio padrão é dado pela Equação (9).

$$sd = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (9)$$

d) Consistência de parâmetros

A BSRN propõe um teste para avaliar a coerência entre os parâmetros derivados da radiação solar na sua componente global. Nesse teste, são definidos limites mínimo e máximo de variação para a razão entre a irradiância global medida (I_{gm}) e a irradiância global calculada, que é igual a soma da irradiância difusa (I_d) e da irradiância direta normal (I_{bn}), multiplicado

pelo $\cos(\theta_z)$. Dado que não é possível identificar qual ou quais componentes apresentam anomalia, as componentes envolvidas recebem o *flag 2* em caso de falha no teste.

$$\left| \frac{I_d + I_{bn} \cdot \cos(\theta_z) - I_{gm}}{I_{gm}} \right| \leq 0,08 \text{ para } \theta_z < 75^\circ \text{ e } I_d + I_{bn} \cdot \cos(\theta_z) > 50 \text{ W/m}^2 \quad (10)$$

$$\left| \frac{I_d + I_{bn} \cdot \cos(\theta_z) - I_{gm}}{I_{gm}} \right| \leq 0,15 \text{ para } 75^\circ < \theta_z < 93^\circ \text{ e } I_d + I_{bn} \cdot \cos(\theta_z) > 50 \text{ W/m}^2 \quad (11)$$

e) *Índice de transmissividade*

No processo de garantia de qualidade, é preferível iniciar a eliminação dos outliers mais evidentes, que se destacam significativamente dos demais dados. Para isso, definem-se o índice de claridade (k_t), relacionado à irradiância global (I_g). Younes *et al.* (2005) estabelecem que $0 < k_t < 1$. Considerando as incertezas dos sensores de medição, optou-se por limites de $0 < k_t < 1,2$, atribuindo o *flag 3* aos dados de irradiância global que ultrapassem esses limites. O teste aplicado para esse índice foi o apresentado na equação 12.

$$GHI \text{ min} < GHI \text{ avg} < GHI \text{ max} \quad (12)$$

Onde ‘min’ representa mínimo, ‘avg’ representa médio e ‘max’ representa máximo.

f) *Fisicamente possível*

Determinar a leitura "fisicamente possível" envolve comparar o valor medido com o máximo possível em condições ideais. Para isso, são empregados o valor da constante solar ajustada para a distância Terra-Sol (S_a) - ou seja, a irradiação que atinge o topo da atmosfera sem interferências de nuvens e partículas - e os valores do cosseno do ângulo zenital solar [$\cos(\theta_z)$] na análise. Em essência, a avaliação consiste em confrontar a medida realizada com o valor teoricamente máximo alcançável em circunstâncias ideais.

$$GHI > -4 \text{ GHI} < S_a \times 1,5 \times \cos(\theta_z)^{1,2} + 100 \text{ Wm}^{-2} \quad (13)$$

g) *Extremamente raro*

O dado é considerado "extremamente raro" mesmo se o dado for considerado fisicamente possível, se os valores permanecem fora de um limite considerado usual.

$$-4 < \text{GHI} < -2 \text{ GHI} > S_a \times 1,5 \times \cos(\theta_z)^{1,2} + 50 \quad (14)$$

$$-4 < \text{GHI} < -2 \text{ GHI} < S_a \times 1,5 \times \cos(\theta_z)^{1,2} + 100 \quad (15)$$

h) Modelo de céu claro

O modelo delineado no Atlas Solarimétrico Europeu (ESRA) para descrever a irradiância em céu claro, considerando suas componentes global ($I_{g,cc}$), direta ($I_{b,cc}$) e difusa ($I_{d,cc}$), serve como referência para estabelecer limites máximos nos valores medidos de irradiância solar. Os valores máximos permitidos para cada componente de radiação não devem exceder 10% da radiação de céu claro para a radiação global e direta. Quanto à difusa, a radiação de céu claro não deve ultrapassar 20% da radiação medida. A concessão de uma tolerância maior para a componente difusa se justifica pelo fato de que em dias com índices de claridade elevados ou médios, os valores de I_d são tipicamente baixos. Tais medições apresentam propensão a erros mais significativos, pois estão localizadas na região de maior incerteza na faixa de operação do sensor utilizado. Na simulação do modelo ESRA, adotou-se um valor de Turbidez de Linke igual a 2,5, conforme estabelecido por Ruiz-Arias *et al.* (2010). Os dados medidos que superarem seus respectivos índices, serão categorizados com o *flag 2*, no teste de Modelo de Céu Claro.

i) Consistência temporal

O propósito do teste de consistência temporal é estabelecer um limite aceitável para a variação na magnitude da radiação solar entre amostras consecutivas ao longo do tempo. A Organização Meteorológica Mundial (OMM) propõe testes de controle de qualidade para duas categorias de dados. A primeira abrange dados brutos, nos quais o processo de controle de qualidade é aplicado em estações meteorológicas automáticas, visando eliminar erros grosseiros. A segunda categoria refere-se a dados processados, nos quais os testes aplicados têm um nível de refinamento mais elevado, sendo utilizados após a eliminação de erros grosseiros. De acordo com a OMM, o teste de consistência temporal estabelece um limite máximo de 800 W/m² para dados brutos e 1000 W/m² para dados processados. Neste estudo, adotamos o limite de 1000 W/m², uma vez que os outliers mais evidentes já foram previamente

removidos pelos testes anteriores. Dessa forma, amostras consecutivas com uma diferença superior a 1000 W/m^2 serão classificadas como anômalas, e ambas receberão o *flag* 3.

j) Persistência

Falhas no sensor, interrupções de energia ou sombras persistentes podem resultar em dados consecutivos idênticos ao longo de um período específico. O teste de persistência tem como objetivo identificar um comprimento máximo aceitável para repetições de valores idênticos ao longo do tempo. Os dados que excederem 20 minutos ou mais para cada distribuição serão considerados anômalos e receberão o *flag* 3.

5. RESULTADOS

5.1 Caracterização meteorológica das estações

Nessa primeira seção será apresentada uma breve caracterização climatológica das áreas de estudo e também meteorológica no período do experimento, considerando-se as medições de velocidade do vento, temperatura, umidade e precipitação observadas.

Lajes é uma cidade localizada na mesorregião central potiguar no estado do RN, com clima quente e semiárido, com estação chuvosa atrasando-se para o outono (BSh). Nos 12 meses analisados, novembro e janeiro foram os meses que apresentaram as maiores temperaturas, com 36,28°C e 36,16°C, respectivamente. O mês de fevereiro foi o mês com maior índice de precipitação, com 135mm e também o mês que menos apresentou ocorrências na resolução de segundo, enquanto que setembro, outubro e novembro não registraram chuva, mas contaram com 473, 186 e 269 ocorrências.

Durante o período de estudo, Pau dos Ferros contou a maior precipitação anual acumulada, o mês com maior pluviosidade foi o de março, com 335mm, onde diferente de Lajes, não apresentou a menor quantidade de ocorrências de sobreirradiância, contando com 20 ocorrências na resolução de minuto e 153 na de segundo.

Por fim, a cidade de Mossoró faz parte da mesorregião do Oeste e caracteriza-se por um clima semiárido quente e seco (BSh). Esse padrão climático é notável por suas temperaturas diárias elevadas, com uma média anual de temperatura do ar de 27,5 °C, uma umidade relativa do ar de 68,9%, e uma precipitação pluviométrica anual de 670 mm (SANTOS *et al.*, 2014). Mossoró contou com dois meses de alto índice pluviométrico, março com 283mm e maio com 253mm, assim como Pau dos Ferros, nenhum dos dois meses foi responsável pelo maior registro de ocorrências.

As médias anuais de velocidade do vento, temperatura e umidade relativa obtidas através dos equipamentos do Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis (ISI-ER) são expressas na Tabela 3.

Tabela 3 – Médias anuais das variáveis meteorológicas para as três cidades durante o período estudado (março de 2022 à fevereiro de 2023).

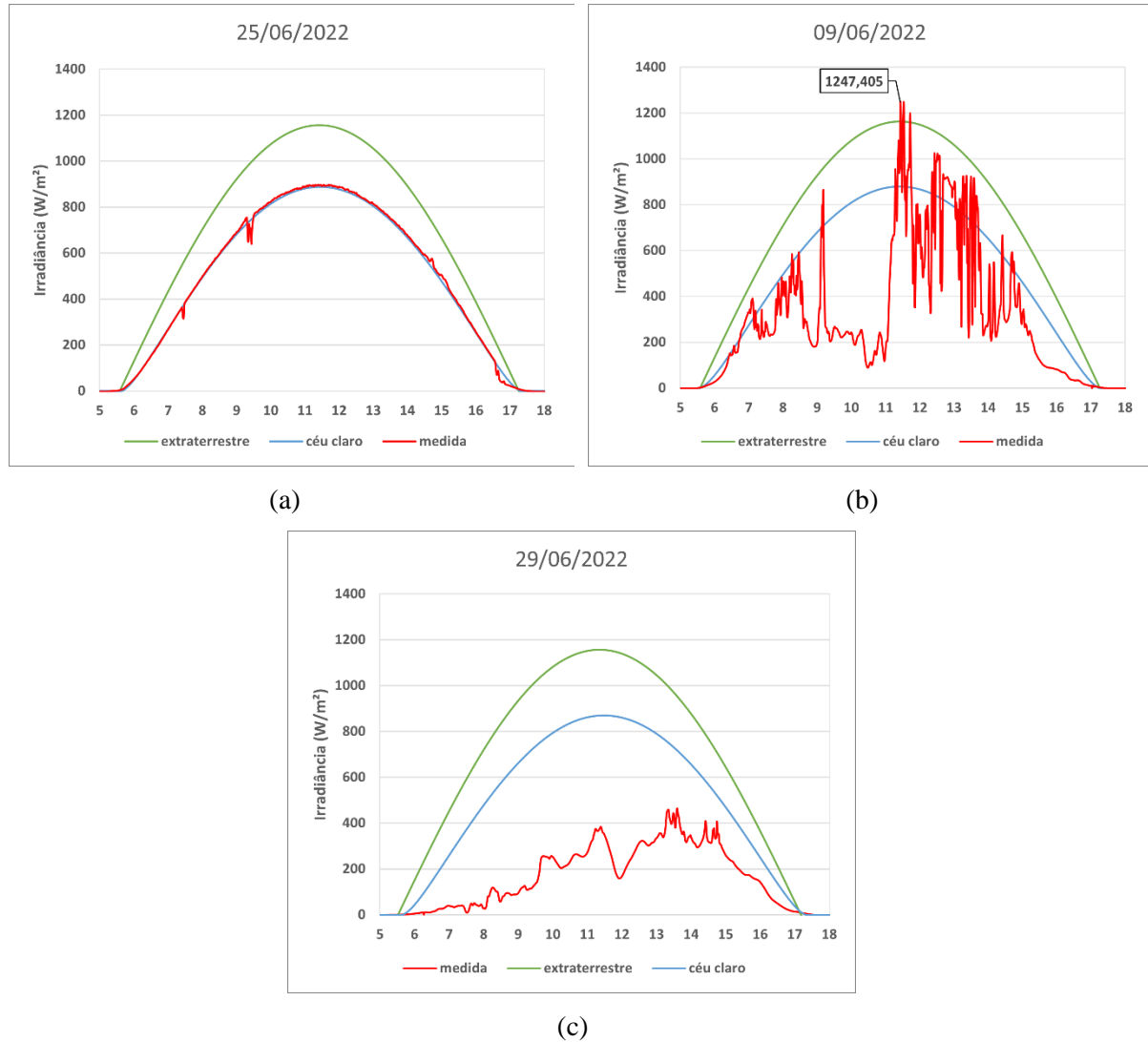
	Velocidade do Vento (m/s)	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Precipitação* (mm)
Lajes	3,24	26,87	70,88	572
Pau dos Ferros	1,78	27,09	71,75	1277
Mossoró	2,49	27,63	72,47	1096

*Os dados de precipitação foram obtidos através dos postos da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN) para o período estudado.

5.2 Eventos gerais de sobreirradiância ($GHI > 1000 \text{ W/m}^2$)

A obtenção de dados de radiação em diversas resoluções temporais possibilita uma compreensão mais precisa de seu padrão de comportamento. Nesta seção, é fornecido um comparativo que destaca as diferenças na taxa de coleta de dados ao registrar um evento de sobreirradiância, seja em minutos ou segundos. A figura 3 exemplifica como é o perfil de irradiância em condições de céu claro, parcialmente nublado e completamente nublado.

Figura 3 - Perfil da irradiância global horizontal (a) para um dia de céu claro, (b) para um dia parcialmente nublado e (c) para um dia completamente nublado, registrados na estação meteorológica do ISI-ER em Lajes-RN



Fonte: Elaborada pelo autor.

As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam os dados em resolução de um minuto e um segundo com valor de irradiância maior ou igual a 1000 W/m², sendo possível observar a duração, quantidade de ocorrências, frequência, valor médio e máximo. A partir dessas tabelas é possível observar que enquanto os dados são integrados em intervalos de minuto, os eventos com um minuto de duração representam mais da metade das ocorrências, com a cidade Lajes tendo 154 ocorrências (71%), Pau dos Ferros 170 ocorrências (77%) e Mossoró 67 ocorrências (77%).

A partir do momento em que os dados são analisados na resolução de segundo, a maior frequência e quantidade de ocorrências dos eventos passa a ser com duração inferior a 30

segundos, Lajes contando com 2243 ocorrências (85,6%), Pau dos Ferros 1607 ocorrências (81,5%) e Mossoró 930 ocorrências (86,8%).

Os maiores registros de irradiância para cada cidade foram observados na resolução de segundo, onde para Lajes foi registrado um valor de irradiância de 1537 W/m², no dia 05/03/2022, para Pau dos Ferros de 1636 W/m², no dia 07/11/2022 e de 1555 W/m² para Mossoró no dia 13/11/2022.

Tabela 4 - Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m² para a cidade de Lajes – RN

≥ 1000 GHI (W/m²) - Lajes - (min)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
1 minuto	154	71%	1252	1490
2 minutos	43	20%	1284	1451
3 minutos	13	6%	1238	1412
4 minutos	5	2%	1183	1273
≥ 5 minutos	3	1%	1279	1315
≥ 1000 GHI (W/m²) - Lajes - (s)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
< 30 segundos	2243	85,6%	1293	1518
1 minuto	238	9,1%	1303	1492
2 minutos	110	4,2%	1268	1537
3 minutos	20	0,8%	1223	1471
4 minutos	6	0,2%	1209	1448
5 minutos	0	0,0%	-	-
> 5 minutos	2	0,1%	1287	1301

Tabela 5 - Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m² para a cidade de Pau dos Ferros – RN

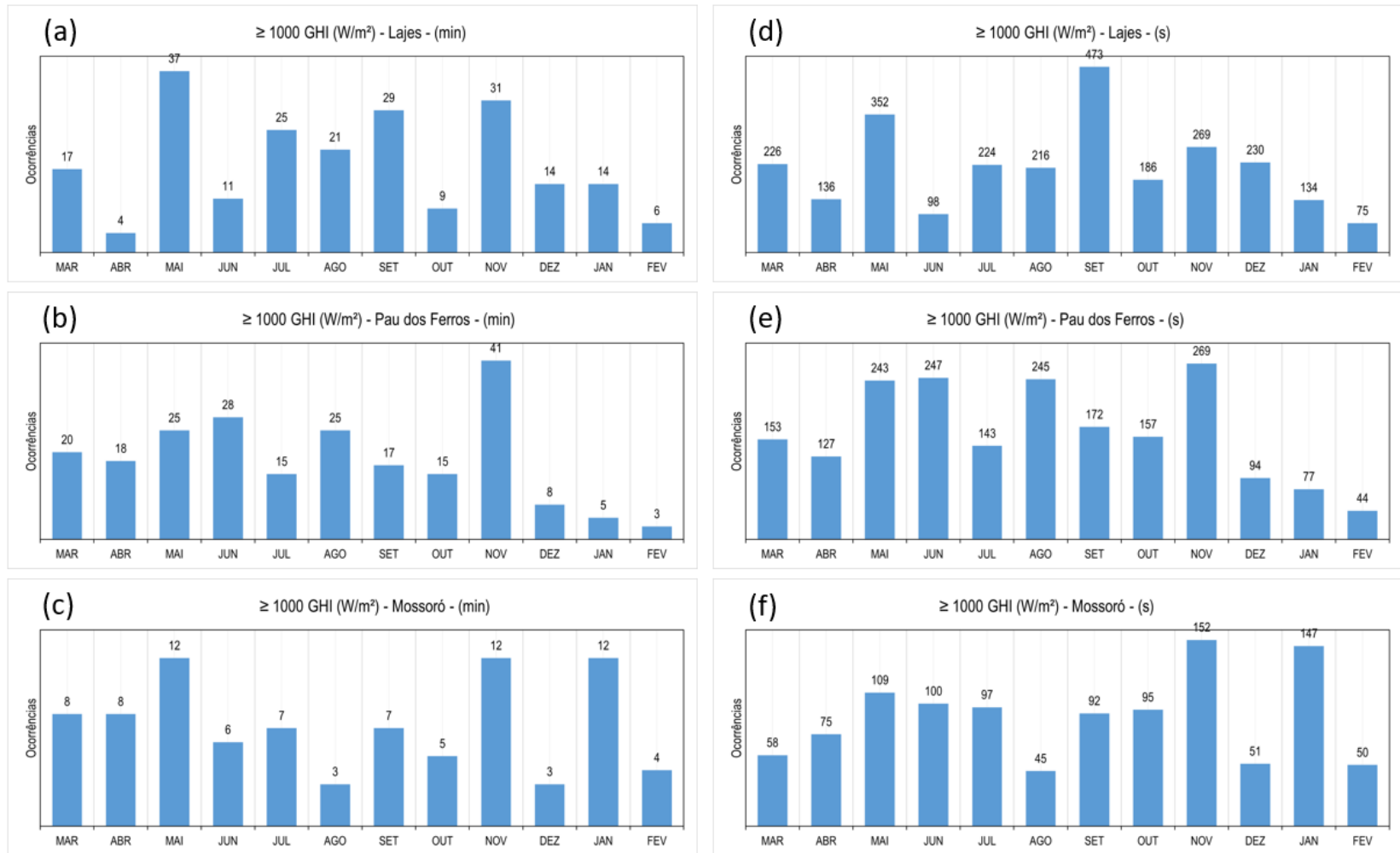
≥ 1000 GHI (W/m²) - Pau dos Ferros - (min)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
1 minuto	170	77%	1281	1429
2 minutos	33	15%	1193	1448
3 minutos	8	4%	1138	1361
4 minutos	4	2%	1171	1323
≥ 5 minutos	5	2%	1196	1465
≥ 1000 GHI (W/m²) - Pau dos Ferros - (s)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
< 30 segundos	1607	81,5%	1293	1582
1 minuto	226	11,5%	1288	1636
2 minutos	111	5,6%	1283	1618
3 minutos	16	0,8%	1182	1444
4 minutos	6	0,3%	1164	1326
5 minutos	1	0,1%	1102	1184
> 5 minutos	4	0,2%	1214	1496

Tabela 6 - Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m² para a cidade de Mossoró – RN

≥ 1000 GHI (W/m²) - Mossoró - (min)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
1 minuto	67	77%	1267	1422
2 minutos	15	17%	1217	1343
3 minutos	1	1%	1156	1200
4 minutos	2	2%	1173	1252
≥ 5 minutos	2	2%	1302	1356
≥ 1000 GHI (W/m²) - Mossoró - (s)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
< 30 segundos	930	86,8%	1288	1502
1 minuto	97	9,1%	1280	1555
2 minutos	31	2,9%	1247	1438
3 minutos	12	1,1%	1269	1433
4 minutos	0	0,0%	-	-
5 minutos	0	0,0%	-	-
> 5 minutos	1	0,1%	1305	0

A figura 4 mostra as distribuições de ocorrências dos eventos durante o período analisado para as três cidades nas resoluções de minuto e segundo. A distribuição dos eventos nas três cidades é diferente, o maior número de ocorrências na resolução de minuto ocorre nos meses de maio e novembro em Lajes, novembro e junho em Pau dos Ferros e maio, novembro e janeiro em Mossoró, com novembro sendo um mês em comum entre as três cidades. Na resolução de segundo, maio e setembro possuem as maiores ocorrências na cidade de Lajes, novembro e junho na cidade de Pau dos Ferros e novembro e janeiro na cidade de Mossoró.

Figura 4 - Frequência de ocorrência dos eventos de sobreirradiância mensal ($GHI \geq 1000 \text{ W/m}^2$) dos municípios estudados, na resolução por minuto: (a), (b) e (c); na resolução de segundo: (d), (e) e (f)



Fonte: Elaborado pelo autor

A frequência temporal dos eventos de sobreirradiância são ilustrados na Figura 5, afim de entender em qual período do ano acontecem os eventos mais duradouros.

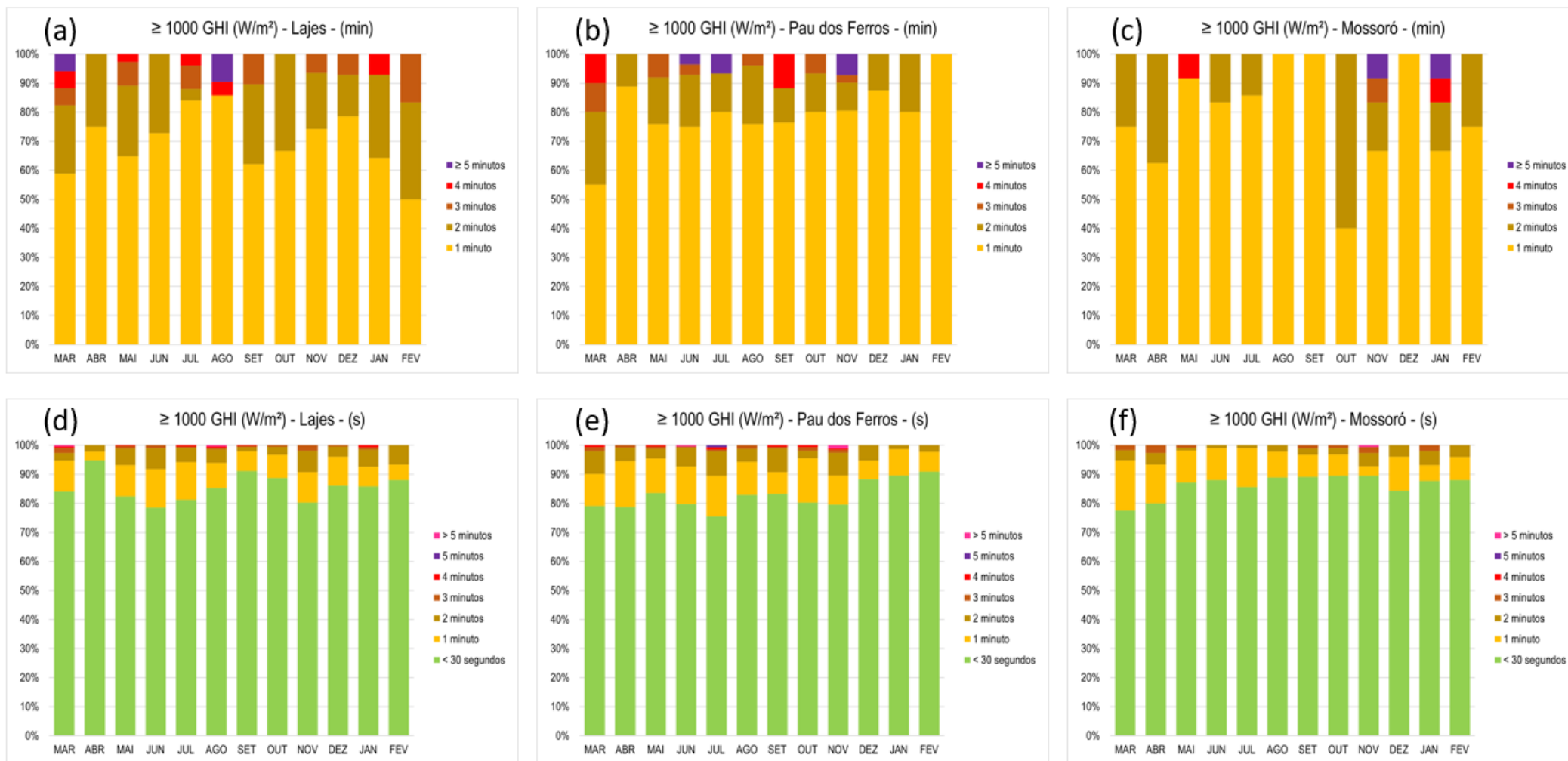
A Figura 5 mostra como a maior parte dos eventos, quando registrados na resolução de minuto, duram apenas um minuto. O mês com a maior frequência de eventos de um minuto para a cidade de Lajes foi o mês de agosto com 86%, fevereiro para Pau dos Ferros, com 100% e agosto, setembro e dezembro em Mossoró, os três contando com 100%. Eventos com 5 minutos ou mais de duração estão presentes nas três cidades, ocorrendo uma maior quantidade nos meses de março e agosto em Lajes, junho, julho e novembro em Pau dos Ferros e novembro e janeiro em Mossoró.

Na resolução de segundo, todos os meses nas três cidades tem uma quantidade expressivamente maior de eventos registrados com menos de 30 segundos. Em Lajes, o mês com a maior frequência desses eventos foi o de abril com 95%, fevereiro em Pau dos Ferros, com 91% e agosto, setembro, outubro e novembro para Mossoró, todos com 89%.

Os meses com registro de ocorrência mais duradouros dos eventos na resolução de minuto foram março e agosto em Lajes, junho, julho e novembro em Pau dos Ferros e novembro e janeiro em Mossoró. Na resolução de segundo, para Lajes, o mês com o evento mais duradouro foi o mês de agosto, contando com 385 segundos, novembro em Pau dos Ferros, com 386 segundos e três eventos com mais de 5 minutos e novembro em Mossoró, que contou com um evento de 321 segundos.

Figura 5 - Frequência temporal dos eventos de sobreirradiância mensal ($GHI \geq 1000 \text{ W/m}^2$) dos municípios estudados, na resolução por minuto:

(a), (b) e (c); na resolução de segundo: (d), (e) e (f)



Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 Análise detalhada por faixa de irradiância

As Tabelas 7, 8, 9, 10, 11 e 12, assim como as Figuras 6 e 7 que serão apresentadas a seguir, estarão segmentando os dados já apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6 e Figura 4, em duas faixas de irradiância, a primeira com eventos de irradiância maior ou igual a 1000 W/m² e menor que 1367 W/m² e a segunda apenas com eventos iguais ou maiores que 1367 W/m².

As Tabelas 7, 8 e 9 consideram limites de Irradiância Global Horizontal (GHI) entre 1000 W/m² e 1367 W/m².

Na Tabela 7 (Lajes), para eventos com duração de 1 minuto, há 138 ocorrências, representando 71% do total, com um valor médio de 1172 W/m² e um valor máximo de 1364 W/m². Similarmente, para eventos com duração inferior a 30 segundos, existem 1918 ocorrências, correspondendo a 85,4% do total, com um valor médio de 1212 W/m² e um valor máximo de 1366 W/m².

Para Pau dos Ferros (Tabela 8), eventos de 1 minuto são os mais frequentes (76%), com valor médio de 1208 W/m² e máximo de 1366 W/m². A frequência diminui com o aumento da duração dos eventos, sendo que eventos com mais de 5 minutos são menos frequentes (2%) e apresentam um valor médio de 1123 W/m². Na resolução de segundo, a tabela mostra eventos de curta duração (menos de 30 segundos) como os mais frequentes (81,4%). Eventos com mais de 5 minutos são raros (0,2%), com um valor médio de 1112 W/m².

Eventos de 1 minuto são os mais frequentes também em Mossoró (75%), com valor médio de 1213 W/m² e máximo de 1366 W/m². Eventos com mais de 5 minutos representam 3% das ocorrências, com um valor médio mais elevado de 1302 W/m². Na resolução de segundo, a Tabela 9 mostra eventos de curta duração (menos de 30 segundos) como os mais frequentes (86,4%).

Tabela 7 - Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m² e menor que 1367 W/m² para a cidade de Lajes – RN

≥ 1000 GHI (W/m²) < 1367 GHI (W/m²) - Lajes - (min)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
1 minuto	138	71%	1172	1364
2 minutos	37	19%	1228	1366
3 minutos	12	6%	1217	1338
4 minutos	5	3%	1183	1273
≥ 5 minutos	3	2%	1279	1315
≥ 1000 GHI W/m² < 1367 GHI (W/m²) - Lajes - (s)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
< 30 segundos	1918	85,4%	1212	1366
1 minuto	203	9,0%	1228	1366
2 minutos	99	4,4%	1203	1366
3 minutos	19	0,8%	1201	1322
4 minutos	5	0,2%	1174	1256
5 minutos	0	0,0%	-	-
> 5 minutos	2	0,1%	1287	1301

Tabela 8 - Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m² e menor que 1367 W/m² para a cidade de Pau dos Ferros – RN

≥ 1000 GHI (W/m²) < 1367 GHI (W/m²) - Pau dos Ferros - (min)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
1 minuto	149	76%	1208	1366
2 minutos	32	16%	1171	1343
3 minutos	8	4%	1138	1361
4 minutos	4	2%	1171	1323
≥ 5 minutos	4	2%	1123	1267
≥ 1000 GHI (W/m²) < 1367 GHI (W/m²) - Pau dos Ferros - (s)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
< 30 segundos	1425	81,4%	1210	1366
1 minuto	203	11,6%	1219	1366
2 minutos	97	5,5%	1194	1366
3 minutos	15	0,9%	1159	1333
4 minutos	6	0,3%	1164	1326
5 minutos	1	0,1%	1102	1184
> 5 minutos	3	0,2%	1112	1184

Tabela 9 - Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m² e menor que 1367 W/m² para a cidade de Mossoró – RN

≥ 1000 GHI (W/m²) < 1367 GHI (W/m²) - Mossoró - (min)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
1 minuto	59	75%	1213	1366
2 minutos	15	19%	1217	1343
3 minutos	1	1%	1156	1200
4 minutos	2	3%	1173	1252
≥ 5 minutos	2	3%	1302	1356
≥ 1000 GHI (W/m²) < 1367 GHI (W/m²) - Mossoró - (s)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
< 30 segundos	823	86,4%	1205	1366
1 minuto	87	9,1%	1203	1366
2 minutos	30	3,2%	1233	1366
3 minutos	11	1,2%	1248	1363
4 minutos	0	0,0%	-	-
5 minutos	0	0,0%	-	-
> 5 minutos	1	0,1%	1305	0

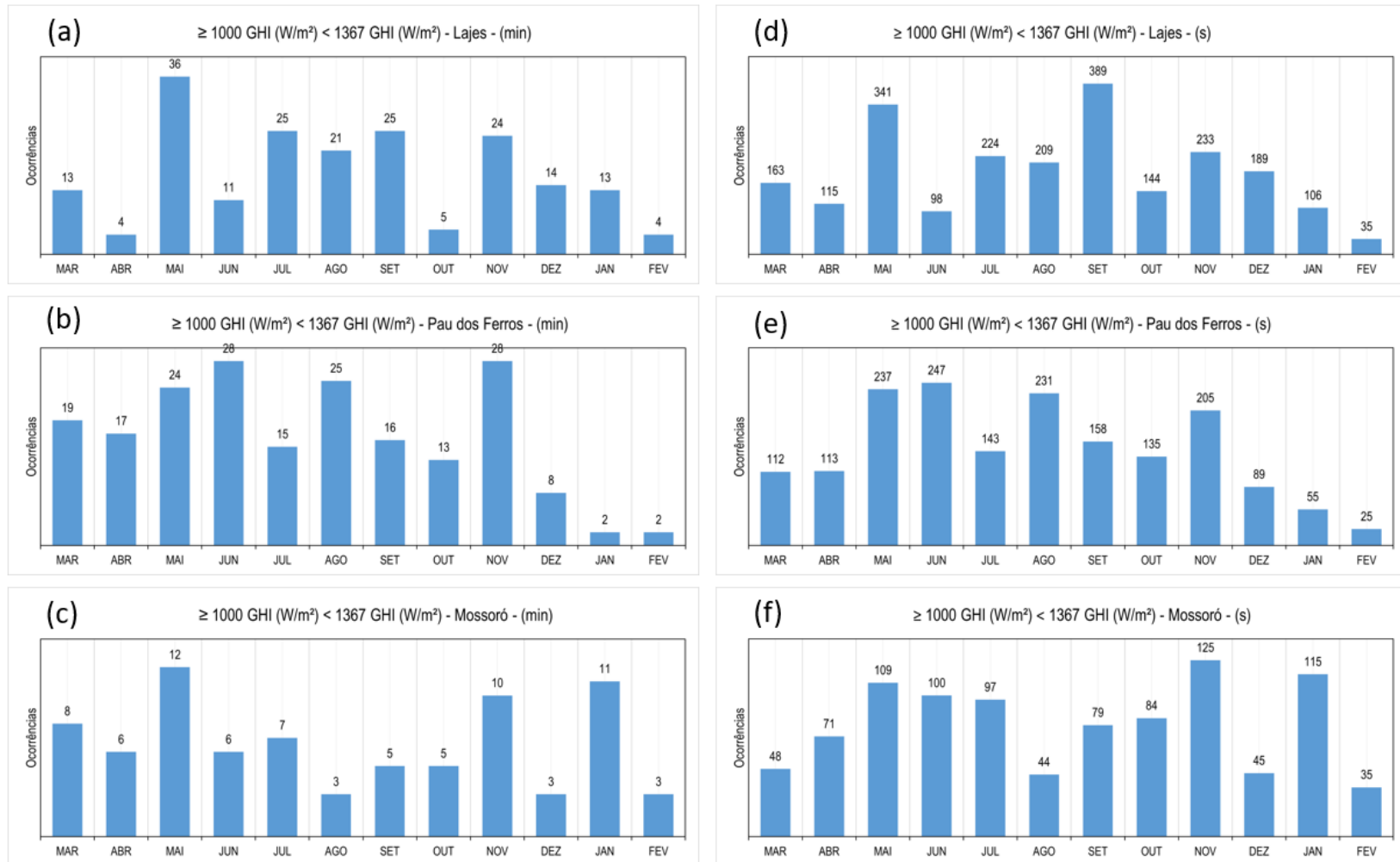
A Figura 6 se assemelha muito a Figura 4, visto que a maior parte dos eventos de sobreirradiância se concentra na faixa de irradiância entre 1000 W/m² e 1367 W/m², dessa forma, os meses com o maior número de ocorrências nas duas resoluções para as três cidades se mantêm quase os mesmos que mencionados na Figura 4.

Para a cidade de Lajes, na resolução de minuto, os meses com maior número de ocorrências foram maio com 36, seguido de julho e setembro com 25 e novembro com 24. Na resolução de segundo, o mês com maiores ocorrências foi o de setembro, com 389, seguido de maio com 341.

Em Pau dos Ferros, os meses de novembro e junho tiveram as maiores ocorrências de sobreirradiância, com 28 cada, seguido de agosto com 24 e maio com 24. Na resolução de segundo, junho foi o mês mais elevado, com 247, seguido de maio com 237 e agosto com 231.

Na cidade de Mossoró, em minuto, os meses de maio, janeiro e novembro tiveram as maiores ocorrências, com 12, 11 e 10 respectivamente. Para a resolução de segundos, os meses de novembro com 125, janeiro com 115 e maio com 109 foram os com maiores ocorrências.

Figura 6 - Frequência de ocorrência dos eventos de sobreirradiação mensal ($1000 \text{ GHI W/m}^2 \geq \text{GHI} < 1367 \text{ GHI W/m}^2$) dos municípios estudados, na resolução por minuto: (a), (b) e (c); na resolução de segundo: (d), (e) e (f)



Fonte: Elaborado pelo autor

As Tabelas 10, 11 e 12 apresentam dados relacionados à sobreirradiância com valores iguais ou superiores a 1367 W/m^2 em diferentes resoluções temporais (minuto e segundo) para as cidades de Lajes, Pau dos Ferros e Mossoró, respectivamente.

Na Tabela 10, na resolução de minuto, há 16 ocorrências de sobreirradiância, sendo a maioria com duração de 1 minuto (70%), seguido por 2 minutos (26%). Não foram registradas ocorrências com duração maior que 2 minutos. Na resolução de segundo, a maioria das ocorrências (87,1%) tem duração inferior a 30 segundos, com uma ocorrência de 1 minuto (9,4%) e algumas com durações superiores, mas raras. O maior valor registrado foi de 1537 W/m^2 .

Na Tabela 11, em minutos, 21 ocorrências de sobreirradiância, predominantemente com duração de 1 minuto (91%) e uma ocorrência com duração de 5 minutos (4%). Na resolução de segundo, a maioria das ocorrências (82,7%) tem duração inferior a 30 segundos, seguida por 1 minuto (10,5%) e 2 minutos (6,4%). O maior valor registrado foi de 1636 W/m^2 .

Na Tabela 12, na resolução de minuto, há 8 ocorrências de sobreirradiância, todas com duração de 1 minuto (100%). Na resolução de segundo, a maioria das ocorrências (89,9%) tem duração inferior a 30 segundos, com algumas ocorrências de 1 e 2 minutos e o maior valor registrado foi de 1555 W/m^2 .

Tabela 10 - Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m² e menor que 1367 W/m² para a cidade de Lajes – RN

≥ 1367 GHI (W/m²) - Lajes - (min)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
1 minuto	16	70%	1390	1490
2 minutos	6	26%	1407	1451
3 minutos	1	0%	1386	1412
4 minutos	0	0%	-	-
≥ 5 minutos	0	0%	-	-
≥ 1367 (W/m²) - Lajes - (s)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
< 30 segundos	325	87,1%	1389	1518
1 minuto	35	9,4%	1414	1492
2 minutos	11	2,9%	1424	1537
3 minutos	1	0,3%	1448	1471
4 minutos	1	0,0%	1386	1448
5 minutos	0	0,0%	-	-
> 5 minutos	0	0,0%	-	-

Tabela 11 - Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m² e menor que 1367 W/m² para a cidade de Pau dos Ferros – RN

≥ 1367 GHI (W/m²) - Pau dos Ferros - (min)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
1 minuto	21	91%	1391	1429
2 minutos	1	4%	1420	1448
3 minutos	0	0%		0
4 minutos	0	0%	-	-
≥ 5 minutos	1	0%	1417	1465
≥ 1367 (W/m²) - Pau dos Ferros - (s)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
< 30 segundos	182	82,7%	1392	1582
1 minuto	23	10,5%	1406	1636
2 minutos	14	6,4%	1432	1618
3 minutos	1	0,5%	1388	1444
4 minutos	0	0,0%	-	-
5 minutos	0	0,0%	-	-
> 5 minutos	1	0,0%	1419	1496

Tabela 12 - Dados em resolução de minuto (min) e segundo (s) com valor de Irradiância Global Horizontal (GHI) maior ou igual a 1000 W/m² e menor que 1367 W/m² para a cidade de Mossoró – RN

≥ 1367 GHI (W/m²) - Mossoró - (min)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
1 minuto	8	100%	1397	1422
2 minutos	0	0%	-	-
3 minutos	0	0%	-	-
4 minutos	0	0%	-	-
≥ 5 minutos	0	0%	-	-
≥ 1367 GHI (W/m²) - Mossoró - (s)				
Duração	Ocorrências	Frequência	Valor médio	Valor máximo
< 30 segundos	107	89,9%	1399	1502
1 minuto	10	8,4%	1412	1555
2 minutos	1	0,8%	1414	1438
3 minutos	1	0,8%	1395	1433
4 minutos	0	0,0%	-	-
5 minutos	0	0,0%	-	-
> 5 minutos	0	0,0%	-	-

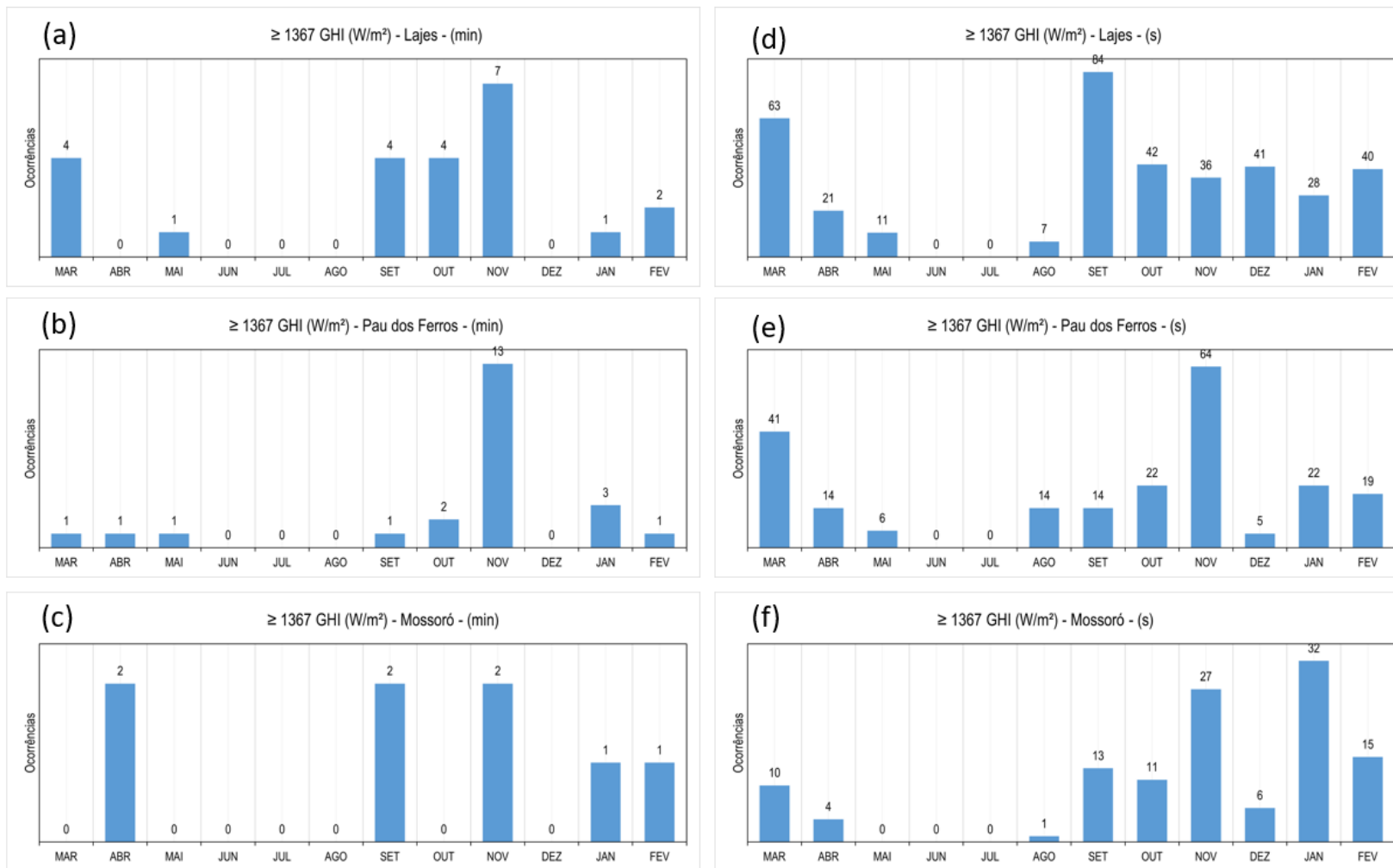
A Figura 7 apresenta a frequência de ocorrência mensal de eventos de sobreirradiância para dados acima de 1367 W/m² nos municípios de Lajes, Pau dos Ferros e Mossoró, nas resoluções de minuto e segundo.

Diferente das Figuras 4 e 6, a Figura 7 apresenta uma quantidade muito menor de dados, uma vez que são eventos extremos e mais raros, essas ocorrências podem ter um impacto muito mais significativo uma vez que são medidas maiores que a da constante solar.

O mês de novembro tem destaque nas cidades de Pau dos Ferros e Mossoró nas duas resoluções, sendo sempre um mês com mais ocorrências. Na resolução de segundo, o mês de março para a cidade de Pau dos Ferros é o com segundo maior número de ocorrências, enquanto que na cidade de Mossoró, janeiro é o mês com maior número (32), seguido de novembro (27) e fevereiro (15).

A cidade de Lajes não conta com muitas ocorrências na resolução de minuto, mas possui mais que as outras duas cidades (30), o mesmo acontece na resolução de segundo.

Figura 7 – Frequência de ocorrência dos eventos de sobreirradiação mensal ($GHI \geq 1367$ GHI W/m^2) dos municípios estudados, na resolução por minuto: (a), (b) e (c); na resolução de segundo: (d), (e) e (f)



Fonte: Elaborado pelo autor

5.4 Discussão

As tabelas 4, 5 e 6 indicam como a resolução de segundo permite uma análise mais detalhada dos eventos de sobreirradiância, revelando melhores padrões temporais e eventos de curta duração que poderiam passar despercebidos em resoluções temporais mais baixas como a de minuto.

A análise das distribuições de ocorrências dos eventos de sobreirradiância nas resoluções de minuto e segundo revela padrões sazonais distintos em cada cidade (Figura 4). A observação de meses específicos com maior incidência de eventos em ambas as resoluções sugere que há uma variabilidade sazonal na ocorrência desses eventos. É possível destacar como a ocorrência dos eventos tende a crescer durante o outono em Pau dos Ferros e Mossoró, onde houve os maiores índices pluviométricos mensais dessas duas cidades, e diminuir durante o verão nas cidades de Lajes e Pau dos Ferros, o mesmo chegou a ocorrer também em Mossoró, com exceção do mês de janeiro que apresentou uma quantidade grande de ocorrências em comparação ao seu mês antecedente e subsequente, esse mesmo padrão ocorre durante o mês de maio na cidade de Lajes e em novembro em Pau dos Ferros.

A coincidência de alguns meses referente a maior ou menor quantidade de ocorrências entre as cidades indica uma similaridade em seus padrões temporais, isso pode estar relacionado a fatores climáticos regionais ou características geográficas compartilhadas que influenciam a incidência de sobreirradiância, como o clima tropical, topografia e proximidade a linha do Equador.

Por outro lado, a diferença nas distribuições de ocorrências em Lajes, especialmente nos meses de maior incidência em resoluções temporais diferentes, indica uma resposta temporal específica para essa localidade. A variação entre maio e setembro como meses de destaque em resoluções distintas pode apontar para diferentes fenômenos climáticos ou condições atmosféricas que afetam a ocorrência de sobreirradiância em momentos específicos do ano.

A separação dos eventos por faixa de intensidade é importante para uma análise mais detalhada e específica da sobreirradiância, o que proporciona uma melhor contextualização em relação aos eventos.

Dados acima de 1000 W/m^2 indicam a ocorrência de condições de irradiância consideradas elevadas e que podem influenciar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. A restrição adicional de serem inferiores a 1367 W/m^2 , destaca eventos em que a irradiância atinge níveis próximos da quantidade máxima de radiação solar que atinge a parte superior da atmosfera terrestre em condições ideais. Já os eventos com intensidade superior a 1367 W/m^2 podem ser

considerados como sobreirradiância extrema. Isso significa que, em determinados momentos, a quantidade de radiação solar recebida na superfície da Terra é excepcionalmente alta, a análise desses eventos serve também como uma oportunidade para validar a precisão dos instrumentos de medição de radiação solar.

A identificação de valores que ultrapassam a constante solar pode indicar a necessidade de verificar a calibração dos instrumentos ou avaliar se esses valores são realisticamente possíveis em condições locais, além de demandar estratégias específicas para lidar com picos de geração de energia. De acordo com Andrade e Tiba (2016), alguns fatores podem contribuir para a ocorrência dos eventos extremos de irradiância, como os múltiplos espalhamentos que ocorrem na superfície das nuvens, a irradiância direta do Sol sob condições de um dia de céu muito claro e as reflexões nas bordas de nuvens Cumulus.

A irradiância também exerce influência sobre a carga do inversor, sendo que níveis elevados de irradiância podem resultar na queima dos fusíveis, mesmo com o dimensionamento adequado do dispositivo. Esses valores extremos de irradiância, quando mantidos por períodos prolongados e associados a fatores como temperatura elevada do fusível, podem levar à queima dos fusíveis das *strings* do sistema fotovoltaico (BRAGA *et al.*, 2018).

6. CONCLUSÃO

O mapeamento dos eventos de sobreirradiância neste trabalho identificou um total de 218 ocorrências na resolução de minuto para a cidade de Lajes, 220 para Pau dos Ferros e 87 para Mossoró, assim também para a resolução de segundo, onde foram registradas 2619 ocorrências para Lajes, 1971 para Pau dos Ferros e 1071 para Mossoró. Os meses com maior ocorrência de eventos foram maio e novembro em Lajes, junho e novembro em Pau dos Ferros, maio novembro e janeiro em Mossoró para a resolução de minuto. Na resolução de segundo, os meses com maior ocorrência foram setembro e maio em Lajes, novembro e junho em Pau dos Ferros e novembro e janeiro em Mossoró.

Os resultados mostram que grande parte das ocorrências, na resolução de minuto e segundo, ocorrem com um minuto ou menos de trinta segundos, respectivamente, essa dinâmica de curta duração destaca a natureza pontual e efêmera dos eventos. Essa característica é relevante ao considerar a resposta dinâmica e instantânea desses eventos nos sistemas fotovoltaicos e suas implicações na geração de energia. Em termos de quantificação dos eventos, a resolução em segundos oferece uma visão mais detalhada e precisa, permitindo uma análise mais acurada dos eventos mais intensos e de curta duração.

Os eventos com maior intensidade registrados nas três cidades foram de 1537 W/m^2 em Lajes, 1636 W/m^2 em Pau dos Ferros e 1555 W/m^2 em Mossoró, com o evento de Lajes sendo o mais duradouro, com 2 minutos. Os meses com registro de ocorrência mais duradouros dos eventos na resolução de minuto foram março e agosto em Lajes, junho, julho e novembro em Pau dos Ferros e novembro e janeiro em Mossoró, na resolução de segundo, para Lajes, o mês com o evento mais duradouro foi o mês de agosto, contando com 385 segundos. Novembro em Pau dos Ferros, com 386 segundos e três eventos com mais de 5 minutos e novembro em Mossoró, que contou com um evento de 321 segundos.

Foi possível observar durante o período de estudo (Figura 4) como a ocorrência dos eventos tende a crescer durante o outono em Pau dos Ferros e Mossoró, onde houve os maiores índices pluviométricos mensais dessas duas cidades e diminuir durante o verão nas cidades de Lajes e Pau dos Ferros, essa diminuição também chegou a ocorrer em Mossoró, com exceção do mês de janeiro que apresentou grande quantidade de ocorrências em comparação ao seu mês antecedente e subsequente, esse mesmo padrão ocorre durante o mês de maio na cidade de Lajes e novembro em Pau dos Ferros.

Na comparação entre os eventos de sobreirradiância nas resoluções de minuto e segundo, ficou claro como a resolução de segundo é mais adequada para entender e analisar os eventos

de sobreirradiância com maior detalhe. Essa resolução fornece uma visão mais refinada e granular desses eventos, possibilitando uma análise mais precisa e abrangente. Isso se traduz em uma capacidade aprimorada de identificar padrões temporais, avaliar a intensidade dos eventos e compreender variações rápidas na irradiância. Em contraste, a resolução de minuto pode suavizar alguns desses detalhes, perdendo nuances importantes nos dados. Portanto, a escolha da resolução temporal depende da natureza da análise desejada, sendo a resolução de segundo mais indicada para investigações mais detalhadas e sensíveis às variações rápidas nos eventos de sobreirradiância.

É esperado que os dados apresentados nesse trabalho viabilizem ajustes para o melhor dimensionamento de sistemas fotovoltaicos assegurando que a capacidade instalada seja apropriada para lidar com variações na irradiação solar, especialmente durante eventos de sobreirradiância. Os dados de sobreirradiância nas diferentes resoluções apresentadas fornecem informações acerca de flutuações rápidas na produção de energia solar. Esses dados podem ser integrados aos sistemas de gestão de energia para ajustar dinamicamente a operação dos inversores fotovoltaicos. Por exemplo, durante períodos de sobreirradiância, os inversores podem ser adaptados para lidar eficientemente com picos de produção, otimizando, assim, a eficiência global do sistema.

Essas descobertas desempenham um papel fundamental no planejamento e na administração de sistemas fotovoltaicos, ao mesmo tempo em que contribuem para a compreensão dos padrões temporais nas ocorrências de sobreirradiância.

7. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Marcelo Pinho; ZILLES, Roberto; LORENZO, Eduardo. Extreme overirradiance events in São Paulo, Brazil. **Solar Energy**, v. 110, p. 168-173, 2014.
- BRAGA, Marília et al. Avaliação de desempenho de diferentes tecnologias fotovoltaicas em Irecê, BA. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2018.
- BRAGA, Marília et al. Solar over-irradiance events: Preliminary results from a global study. In: 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). IEEE, 2020. p. 2764-2770.
- BRESCHI, Stefano; MALERBA, Franco; EDQUIST, Charles. Systems of innovation: technologies, institutions and organizations. **Systems of innovation: technologies, institutions and organizations**, 1997.
- DA MOTA, F. S.; BEIRSDORF, M. I. C.; ACOSTA, M. J. C. Estimates of solar radiation in Brazil. **Agricultural Meteorology**, v. 18, n. 4, p. 241-254, 1977.
- 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.
- DE OLIVEIRA SANTOS, Wesley et al. Precipitações máximas para o município de Mossoró de 1964 a 2011 pela distribuição de Gumbel. **Irriga**, v. 19, n. 2, p. 207-213, 2014.
- DO NASCIMENTO, Lucas Rafael 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.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Empreendimentos Fotovoltaicos - Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à Participação nos Leilões de Energia Elétrica 2021. Disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/leiloes-de-energia/leiloes/instrucoes-para-cadastramento>
- EUROPE, SolarPower. Global market outlook for solar power 2022–2026. **Solar Power Europe: Brussels, Belgium**, 2022.
- GALLAGHER, Richard P.; LEE, Tim K. Adverse effects of ultraviolet radiation: a brief review. **Progress in biophysics and molecular biology**, v. 92, n. 1, p. 119-131, 2006.
- GU, Lianhong et al. Cloud modulation of surface solar irradiance at a pasture site in southern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 106, n. 2, p. 117-129, 2001.
- GURGEL, J. T. A.; GOMES, Frederico Pimentel; TRIVELIN, A. P. Determinação da média aritmética e desvio padrão de quocientes de séries independentes e dependentes. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 14, p. 31-42, 1958.

GURGEL, Amanda Lopes; DE MEDEIROS, Jacimária Fonseca. Caracterização das condições climáticas de Pau dos Ferros-RN. **Revista Geotemas**, v. 8, n. 2, p. 100-115, 2018.

IQBAL, M. An introduction to solar radiation. Vancouver, Canada: Academic Press, 1983.

JARA, MA Zamalloa et al. Extreme Overirradiance events and their spectral distribution in Lima, Peru. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2021. p. 012006.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. Das Geographische System Der Klimate. 1936. **Köppen, W.; Geiger, R. Handbuch Der Klimatologie. Berlin: Gebrüder Bornträger.**

LONG, C. N.; SHI, Y. The QCRad value added product: Surface radiation measurement quality control testing, including climatology configurable limits. **Atmospheric Radiation Measurement Program Technical Report**, 2006.

MAXWELL, E.; WILCOX, S.; RYMES, M. Users manual for SERI QC software, assessing the quality of solar radiation data. **Solar Energy Research Institute, Golden, CO**, 1993.

MIMS III, Forrest M.; FREDERICK, John E. Cumulus clouds and UV-B. **Nature**, v. 371, n. 6495, p. 291-291, 1994.

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

PETRIBÚ, Leonardo et al. Procedimento objetivo para a garantia de qualidade de dados de radiação solar. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 21, 2017.

PFISTER, G. et al. Cloud coverage based on all-sky imaging and its impact on surface solar irradiance. **Journal of applied meteorology and climatology**, v. 42, n. 10, p. 1421-1434, 2003.

PIACENTINI, Rubén 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.

RUIZ-ARIAS, J. A. et al. Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 5, p. 881-893, 2010.

STEFANELLO, Camila; MARANGONI, Filipe; ZEFERINO, Cristiane Lionço. A importância das políticas públicas para o fomento da energia solar fotovoltaica no Brasil. In: **Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2018.

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, Fraidenraich N, Moskowicz M, Cavalcanti ESC, Lyra FJM, Nogueira AMB, Grossi Gallegos H. Atlas Solarimétrico do Brasil, CD ROM. Editora Universitária da UFPE; 2002 [In Portuguese].

YOUNES, S.; CLAYWELL, R.; MUNEER, T. Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches. **Energy**, v. 30, n. 9, p. 1533-1549, 2005.