

METODOLOGIA PARA AUTOMATIZAR A DETECÇÃO DO EFEITO BORDA DE NUVEM UTILIZANDO PYTHON

Thiago Natan Souza Genuíno

tnsg@discente.ifpe.edu.br

Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho

manoel@pesqueira.ifpe.edu.br

RESUMO

Este trabalho investiga de forma abrangente o efeito borda de nuvem, fenômeno atmosférico no qual a irradiância solar pode ultrapassar valores esperados devido à interação da radiação com as bordas das nuvens, resultando em focalização e aumento da componente difusa. Inicialmente, apresenta-se uma contextualização sobre a radiação solar, abordando o processo de atenuação da energia desde o topo da atmosfera até a superfície terrestre, bem como a composição da irradiância global em radiação direta e difusa. Em seguida, discute-se a relevância dos modelos de céu claro, com destaque para o método de Gueymard, amplamente utilizado em estudos que analisam desvios extremos associados aos picos característicos do efeito borda de nuvem. A revisão bibliográfica evidencia que variações rápidas e intensas de irradiância afetam a confiabilidade das medições, impactam a calibração de sensores, influenciam previsões meteorológicas e exigem maior rigor em análises solarimétricas devido à natureza súbita e transitória desses eventos. Com base nesses fundamentos, o presente estudo aplica um tratamento automatizado de dados medidos para analisar a ocorrência desses picos, identificando padrões característicos e comparando-os com limites típicos previstos para condições de céu claro. Os dados da estação de Cedro-PE, referentes ao ano de 2022, foram processados em ambiente Python, substituindo o tratamento manual anteriormente realizado em planilhas Excel. O algoritmo desenvolvido permitiu filtrar, agrupar e determinar a duração dos eventos com maior precisão e eficiência, e a validação demonstrou equivalência em relação

aos resultados manuais, confirmando a confiabilidade da abordagem automatizada e sua aplicabilidade em análises solarimétricas de grande escala.

Palavras-chave: Irradiância solar. Efeito borda de nuvem. Rede Solarimétrica. Python. Processamento de dados.

ABSTRACT

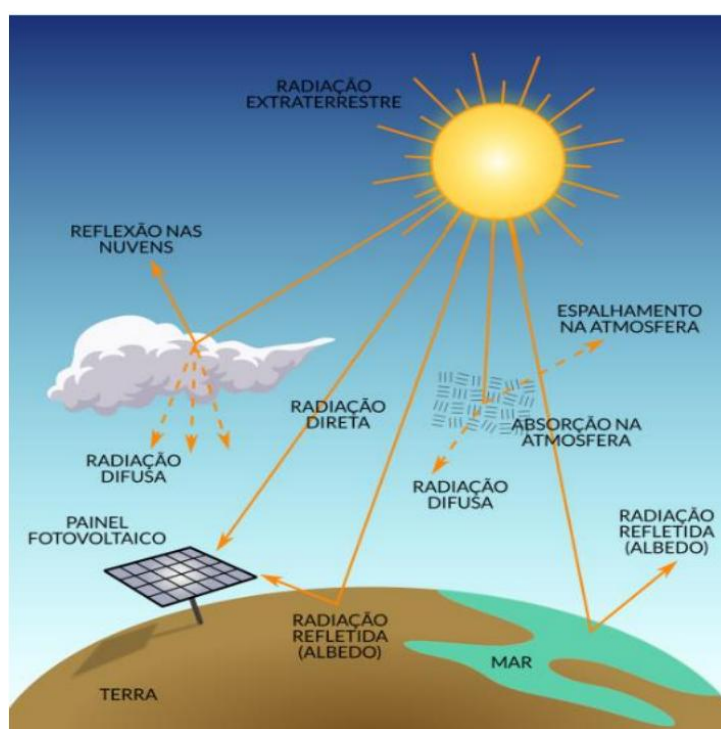
This work provides a comprehensive investigation of the cloud enhancement effect, an atmospheric phenomenon in which solar irradiance exceeds expected values due to the interaction of sunlight with cloud edges, resulting in radiative focusing and an increase in the diffuse component. The study begins with an introduction to solar radiation, highlighting the attenuation of energy from the top of the atmosphere to the surface, as well as the composition of global irradiance into direct and diffuse components. It then discusses the importance of clear-sky models, with emphasis on Gueymard's method and its contributions to improving irradiance estimates, particularly in studies addressing extreme deviations such as the peaks associated with cloud enhancement. The literature review shows that rapid and intense irradiance fluctuations can compromise the reliability of measurement instruments, affect sensor calibration, influence weather forecasting, and require greater rigor in solarimetric analyses due to the sudden and short-lived nature of these events. Based on these foundations, the present study applies measured data processing to analyze the occurrence of such peaks, identifying characteristic patterns and comparing them with clear-sky reference irradiance limits. Data from the Cedro-PE station (2022) were processed in Python, replacing the manual Excel-based workflow. The implemented algorithm enabled more precise and efficient filtering, grouping, and duration estimation of events. Validation confirmed equivalence with manual results, demonstrating the reliability of the automated approach and its applicability to large-scale solarimetric analyses, reinforcing the relevance of this study for improving solar energy monitoring, diagnostics, and forecasting methods.

Keywords: Cloud enhancement. Solar irradiance. Clear-sky model. Gueymard method. Data processing.

1 INTRODUÇÃO

A radiação solar constitui-se na principal fonte de energia disponível na Terra, sendo liberada pelo Sol por meio de ondas eletromagnéticas que abrangem diversos comprimentos de onda, tais como as faixas do espectro visível, do infravermelho e da radiação ultravioleta.

Figura 1: Componentes da radiação solar.



Fonte: (SOUZA et al, 2018)

A intensidade dessa radiação incidente sobre a superfície terrestre apresenta variação em função de múltiplos fatores, entre os quais se destacam a latitude, a longitude, o ângulo zenital, as condições atmosféricas e a refletividade do solo (albedo), além de outras variáveis ambientais relevantes como algumas delas podem ser vistas na Figura 1.

Estudos desenvolvidos por Teixeira e Pedrosa Filho(2022) evidenciam que o efeito borda de nuvem pode ocasionar impactos expressivos em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, sobretudo quando provoca condições de operação além dos limites nominais dos equipamentos.

Com o propósito de identificar a ocorrência desse fenômeno, Gueymard (2017) propôs um método fundamentado na análise de parâmetros pré-estabelecidos, em especial o índice de claridade (KT) e o ângulo zenital (θ_z). A aplicação dessa metodologia pode ser observada no estudo de Pedrosa filho e Silva (2023), que investigou a frequência do efeito borda de nuvem no estado de Pernambuco. Os dados utilizados foram obtidos junto à Rede Solarimétrica de Pernambuco – **REDESOLPE** (Pedrosa Filho, 2022) e, posteriormente, organizados e tratados manualmente por meio de planilhas eletrônicas.

Considerando-se o elevado volume de dados provenientes de estações solarimétricas, algumas das quais possuem séries históricas superior a dez anos e que este volume tende a sempre crescer, torna-se imprescindível a automatização dos processos de obtenção e tratamento dessas informações. Tal medida permite maior agilidade na análise, bem como a redução de possíveis erros decorrentes do processamento manual.

2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um Script em Python com o propósito de automatizar o tratamento de dados da REDESOLPE para análise do efeito borda de nuvem.

2.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Analisar algoritmos desenvolvidos em trabalhos anteriores
- ✓ Desenvolver um código para conexão com o banco de dados da rede solarimétrica de Pernambuco.
- ✓ Desenvolver um código capaz de identificar o efeito borda de nuvem e de contabilizar e organizar suas ocorrências por ano, mês, dia e hora.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

A revisão bibliográfica teve como objetivo abordar os aspectos conceituais relacionados ao efeito borda de nuvem, fundamentando-se principalmente nas Instituto Federal de Pernambuco. Campus Pesqueira. Curso de Bacharelado em engenharia elétrica.
15 de dezembro de 2025

definições propostas por Gueymard (2017) e em trabalhos anteriores desenvolvidos pelo IFPE (INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO). Além da parte teórica, também foram discutidas as implicações práticas desse fenômeno, considerando sua influência na variabilidade da irradiância solar e nos impactos sobre o desempenho de sistemas fotovoltaicos.

3.1 REVISÃO DE CONCEITOS DO EFEITO BORDA DE NUVEM

O efeito borda de nuvem é um fenômeno atmosférico que ocorre quando a luz solar atravessa ou é dispersa nas bordas das nuvens, resultando em aumentos temporários e localizados na intensidade da radiação solar que atinge a superfície terrestre. Essa amplificação da irradiância é causada pela interação da luz com as partículas de água presentes nas nuvens, que atuam como lentes naturais, concentrando a luz solar em áreas específicas. Esse efeito é particularmente evidente em regiões com céu parcialmente nublado, onde a movimentação das nuvens cria variações rápidas e significativas na intensidade da luz solar recebida no solo.

Estudos recentes indicam que a variabilidade da irradiância solar na superfície está fortemente relacionada à distribuição, espessura e movimentação das nuvens, mesmo em condições parcialmente nubladas (Schade et al., 2021). Pesquisas observacionais e modelagens atmosféricas mostram que as bordas das nuvens e formações de nuvens finas podem intensificar a radiação incidente, produzindo aumentos temporários de irradiância reconhecidos como *cloud enhancement* (Kleissl, 2013). Esses eventos geram picos abruptos e de curta duração, frequentemente superiores aos valores previstos para céu claro (Nouri et al., 2022), resultando em flutuações rápidas que influenciam a calibração de instrumentos, a confiabilidade de previsões meteorológicas e a operação de sistemas fotovoltaicos. Assim, a literatura enfatiza a necessidade de métodos rigorosos para detecção, filtragem e análise desses episódios, especialmente em estudos solarimétricos de alta resolução temporal.

O efeito borda de nuvem, também denominado *cloud enhancement*, pode ser identificado por meio de metodologias que relacionam valores observados de irradiância com estimativas teóricas de céu claro. Nesse contexto, Gueymard (2017)

propõe um procedimento de análise fundamentado no índice de claridade (KT) e na irradiância global horizontal (GHI). Em situações normais de céu claro, tais valores raramente superam a irradiância extraterrestre; entretanto, durante episódios de sobreirradiância, causados pela concentração da radiação solar nas bordas das nuvens, esses parâmetros podem ultrapassar os limites esperados.

O autor destaca que esses eventos são caracterizados quando a irradiância medida excede a irradiância de céu claro em determinado patamar de referência. Devido ao índice de claridade (KT) estar diretamente relacionado ao valor da irradiância global medida nas estações (GHI_{medido}) e à irradiância extraterrestre efetiva ($I_{0,eff}$), no instante correspondente ao ângulo zenital solar (θ_z), que varia de acordo com o horário do dia, tem-se a relação mostrada na equação 1:

$$KT = \frac{GHI_{medido}}{I_{0,eff} \cdot \cos \theta_z} \quad (1)$$

Quando $KT > 1$, isso significa que a irradiância medida em superfície superou o valor esperado a partir da irradiância extraterrestre incidente no topo da atmosfera projetada no plano horizontal. Como, em condições normais, a atmosfera apenas atenua a radiação solar, esse excesso só pode ser explicado pela ocorrência de processos de realce, como o **efeito borda de nuvem**, no qual a presença e o posicionamento das nuvens intensificam a radiação recebida através de dispersão e reflexão lateral. Dessa forma, valores de KT acima da unidade indicam a ocorrência desse fenômeno.

Além disso, ressalta que se trata de episódios transitórios, exigindo registros de alta resolução temporal, como medições em intervalos de segundos ou minutos, para que possam ser corretamente identificados (GUEYMARD, 2017).

Em síntese, a proposta metodológica consiste em comparar medições reais com valores de irradiância de céu claro, estabelecendo limiares que permitem reconhecer de forma sistemática a ocorrência do efeito borda de nuvem.

3.2 REVISÃO DE TRABALHOS QUE ANALISARAM O EFEITO BORDA DE NUVEM

Como demonstrado em estudos de **Santos e Pedrosa Filho (2022)**, o fenômeno conhecido como efeito borda de nuvem ocorre quando a irradiância solar global medida ao nível do solo supera temporariamente os valores da irradiância extraterrestre, geralmente devido à borda de nuvens que somam a radiação difusa e direta. O trabalho foi desenvolvido utilizando os dados de Afogados da Ingazeira, no semiárido do Nordeste brasileiro, utilizando dados entre 2015 e 2017, indicaram que os eventos são mais frequentes entre maio e setembro, com predominância de curta duração (1–2 minutos), embora possam durar até 12 minutos. A frequência horária desses eventos é maior durante a manhã (7h–11h), diminuindo à tarde.

A detecção e a classificação desses eventos dependem de algoritmos específicos, que processam dados minuto a minuto convertendo o instante em dia decimal e analisando diferenças consecutivas para determinar a duração. Esses procedimentos permitem quantificar a frequência, duração e padrão temporal do fenômeno, fornecendo dados essenciais para análises de irradiância solar e modelagem de sistemas fotovoltaicos.

Segundo **Teixeira e Pedrosa Filho (2022)**, o efeito borda de nuvem impacta diretamente os parâmetros elétricos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, causando variações rápidas de corrente e tensão nos módulos e inversores devido aos picos de irradiância. Tais flutuações podem afetar a qualidade da energia injetada na rede, exigir respostas rápidas dos inversores e, em alguns casos, provocar desarme de proteções ou redução da vida útil de equipamentos. A aplicação de algoritmos de monitoramento e classificação desses eventos permite planejar estratégias de mitigação, como ajuste de pontos de operação dos inversores, uso de armazenamento temporário ou controle ativo da potência injetada, garantindo estabilidade e eficiência mesmo durante eventos de rápida variação de irradiância. Para regiões com maior incidência de nuvens, considerar o efeito borda é essencial tanto no dimensionamento de sistemas FV quanto na operação segura da rede elétrica.

O estudo de **Pedrosa Filho e Silva (2023)** consistiu no levantamento de dados de diversas localidades de Pernambuco, com o intuito de realizar análises detalhadas para cada cidade. Para organizar as informações, foi utilizado um editor de planilhas, Instituto Federal de Pernambuco. Campus Pesqueira. Curso de Bacharelado em engenharia elétrica.

que permitiu tratar os dados coletados. Contudo, considerando o elevado volume de dados — incluindo algumas estações com séries históricas superiores a 10 anos —, o tratamento manual revelou-se extremamente complexo, demorado e suscetível a erros. Essa dificuldade evidencia a necessidade de abordagens automatizadas, como a utilização de códigos em Python, capazes de processar grandes volumes de informações de forma eficiente, confiável, tornando viável a análise de fenômenos atmosféricos com precisão e agilidade.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho envolveu a construção de um script que integra o banco de dados da rede solarimétrica de pernambuco (REDESOLPE). A linguagem Python foi escolhida como base para o desenvolvimento, aproveitando suas capacidades de manipulação de dados e automação de processos. Para alcançar os objetivos propostos, foram utilizadas diversas bibliotecas essenciais, incluindo Pandas, NumPy.

4.1 BIBLIOTECAS UTILIZADAS

O desenvolvimento do programa foi realizado em Python, utilizando diversas bibliotecas para manipulação de dados, cálculos matemáticos, visualização e acesso a banco de dados. A seguir, são descritas as principais bibliotecas utilizadas e suas respectivas finalidades:

- **csv**: utilizada para leitura e escrita de arquivos CSV de forma simples, permitindo a extração de dados brutos de sensores ou sistemas de monitoramento.
- **numpy**: aplicada para realizar operações matemáticas eficientes, como cálculos vetoriais, diferenças entre pontos de dados e tratamento de séries temporais.

- **pandas**: principal biblioteca para a manipulação e análise dos dados tabulares. Foi usada para carregar, organizar e filtrar os dados de irradiância e demais variáveis envolvidas no processo de identificação do efeito borda de nuvem.
- **requests**: usada para realizar requisições HTTP, permitindo a obtenção de dados meteorológicos ou de irradiância solar em tempo real a partir de APIs online (caso aplicável no código).
- **datetime**: empregada para manipulação de datas e horários, fundamental na análise temporal dos dados e na detecção dos momentos exatos em que ocorrem os eventos de interesse.
- **math**: utilizada para cálculos matemáticos básicos e funções auxiliares que não são cobertas pelo numpy, como operações trigonométricas, logarítmicas ou arredondamentos.
- **matplotlib.pyplot**: responsável pela geração de gráficos e visualizações dos dados, facilitando a identificação visual de picos de irradiância e variações bruscas características do efeito borda de nuvem.
- **sqlalchemy**: usada como interface de alto nível para conexão com bancos de dados SQL. Facilitou a leitura, escrita e consulta em bases de dados estruturadas contendo históricos de dados solares.
- **mysql.connector**: biblioteca específica para conectar o Python diretamente a bancos de dados MySQL. Permitiu realizar inserções, buscas e atualizações em tempo real durante a execução do programa.

4.2 FONTE DE DADOS

Os dados de irradiância solar utilizados neste trabalho foram obtidos diretamente da Rede Solarimétrica de Pernambuco (Pedrosa Filho, 2022), um laboratório multiusuário que reúne 75 estações de medição distribuídas por todo o estado de Pernambuco (www.redesolpe.com.br). A Rede Solarimétrica de Pernambuco é um sistema que monitora a radiação solar no estado. Ela coleta dados

de forma contínua e padronizada, permitindo acompanhar como a irradiância varia ao longo do tempo. Esses registros apoiam pesquisas e estudos relacionados à energia solar.

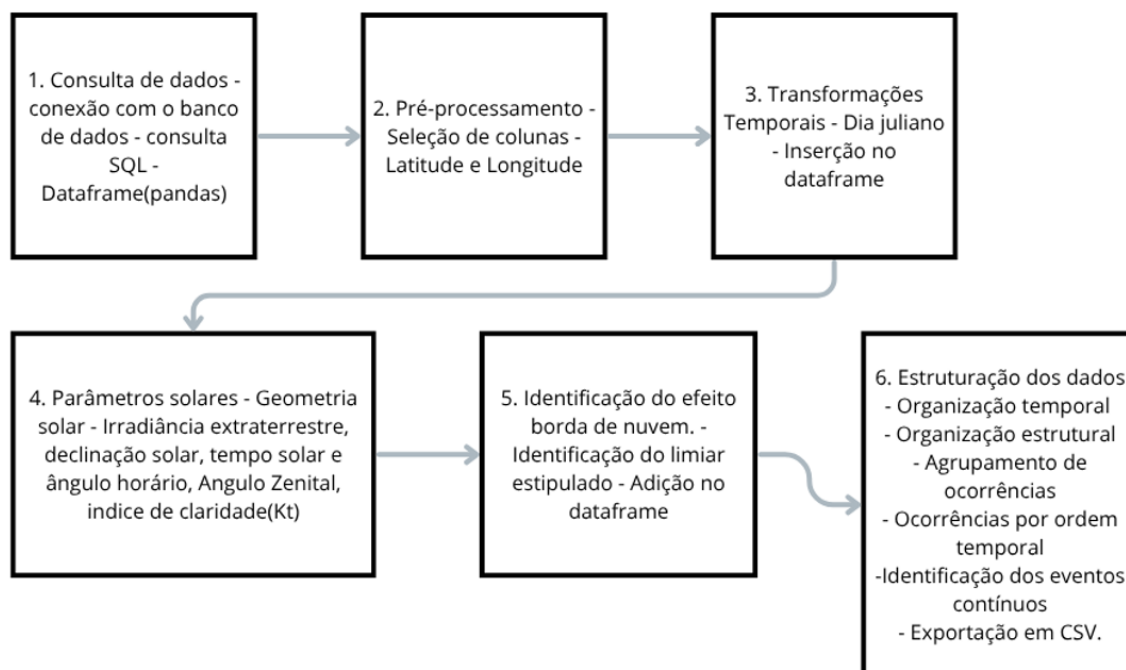
A rede é composta por equipamentos das instituições, Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), tendo como principal objetivo fornecer dados confiáveis e de alta qualidade sobre a radiação solar, viabilizando estudos de previsão, planejamento energético e avaliação da viabilidade de empreendimentos fotovoltaicos.

Esses dados são disponibilizados em uma plataforma online, onde é possível acessar medições de irradiância global com alta resolução temporal, fundamentais para a análise do fenômeno conhecido como efeito borda de nuvem.

4.3 ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO

A Figura 2 apresenta o fluxograma que representa a sequência lógica das etapas implementadas no algoritmo. O processo tem início na consulta e extração dos dados, prosseguindo com o pré-processamento das variáveis de entrada, transformações temporais e o cálculo dos parâmetros solares. Em seguida, ocorre a identificação do efeito borda de nuvem e, por fim, a estruturação e organização dos dados para posterior análise.

Figura 2: Fluxograma do algoritmo.



Fonte: Autoria própria

4.3.1 CONSULTA AOS DADOS

O código realiza a extração de dados de irradiância global de uma tabela MySQL, criando uma conexão com o banco via SQLAlchemy e executando uma consulta SQL. O usuário precisa especificar de forma precisa o período dos dados que deseja extrair, bem como o nome completo da tabela da estação dentre as 75 disponíveis para acesso, garantindo que a consulta retorne exatamente o conjunto de informações desejado. Os resultados são carregados em um DataFramedo pandas, permitindo manipulação e análise posterior. O bloco try-except assegura o tratamento de erros durante a conexão ou a execução da consulta, evitando interrupções e tornando o processo de coleta de dados mais seguro e automatizado.

Com a conexão estabelecida, o usuário pode **personalizar a consulta SQL**, filtrando os dados por ano e mês. A consulta, em qualquer caso, retorna as colunas de data, hora e irradiância global.

4.3.2 PRÉ-PROCESSAMENTO

Após a extração dos dados, foi realizado um pré-processamento para organizar os dados necessários para iniciar o desenvolvimento. Primeiramente, foram selecionadas as colunas “**irradiância_global**”, “**ano**”, “**mês**”, “**dia**”, “**hora**”, “**minuto**” e “**registro**”, como mostrado na tabela 1 que são as variáveis essenciais para a identificação do efeito borda de nuvem, sendo armazenadas em um novo DataFrame.

Em seguida, foram definidas as coordenadas geográficas da estação de medição, com os valores de **latitude**, **longitude** e **longitude de referência (padrão)**. Essas informações são utilizadas em cálculos astronômicos ou ajustes temporais, caso necessário.

Tabela 1: Dados iniciais.

irradiância_global	ano	mes	dia	hora	minuto	registro
-0.949	2022	1	1	0	0	01/01/2022 00:00
-0.976	2022	1	1	0	1	01/01/2022 00:01
-1.017	2022	1	1	0	2	01/01/2022 00:02
-1.054	2022	1	1	0	3	01/01/2022 00:03
-1.094	2022	1	1	0	4	01/01/2022 00:04
-1.042	2022	1	1	0	5	01/01/2022 00:05
-1.011	2022	1	1	0	6	01/01/2022 00:06
-0.949	2022	1	1	0	7	01/01/2022 00:07

Fonte: Autoria própria

4.3.3 TRANSFORMAÇÕES TEMPORAIS

Para organizar os dados de forma sequencial ao longo do tempo e facilitar a análise cronológica, as datas foram convertidas para o formato de Dia Juliano — um número inteiro que representa a posição do dia no ano. Essa conversão é realizada somando-se os dias completos dos meses anteriores ao mês da data e adicionando o dia atual. Essa transformação é útil para cálculos sazonais, identificação de padrões temporais e manipulação de séries temporais.

4.3.4 PARAMETROS SOLARES

Os parâmetros solares correspondem aos elementos fundamentais da geometria solar e são essenciais para a compreensão do comportamento da irradiância ao longo do dia. Nessa etapa, são realizados os cálculos necessários para determinar a irradiância extraterrestre, a declinação solar, o tempo solar verdadeiro, o ângulo horário e o ângulo zenital. A partir desses resultados, é obtido o índice de claridade (KT), parâmetro que serve como base para a identificação do efeito borda de nuvem.

4.3.4.1 CÁLCULO DA IRRADIANCIA EXTRATERRESTRE (I_0)

Com base no valor do Dia Juliano, a irradiância extraterrestre ($I_{0\text{eff}}$) foi calculada — ou seja, a radiação solar teórica recebida no topo da atmosfera em um determinado dia do ano, desconsiderando os efeitos atmosféricos. Esse valor serve como referência para avaliar a variabilidade da irradiância medida no solo, e é essencial para identificar anomalias como o efeito borda de nuvem.

A equação utilizada segue o modelo recomendado pelo World Radiation Data Center (WRDC, 2020) e pela formulação clássica apresentada por Rabl (1985), considerando a variação da distância Terra–Sol ao longo do ano, conforme mostra a Equação 2:

$$I_{0\text{eff}} = 1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360^\circ \cdot n}{365,25} I_0 \quad (2)$$

Onde:

- I_0 é a irradiância extraterrestre em W/m^2 ;
- n é o dia juliano
- $1366,1 W/m^2$ é a constante solar média.

Esse valor é armazenado na nova coluna ioeff (irradiância extraterrestre), como pode ser visualizado na tabela 2, ficando disponível para as etapas seguintes de comparação com a irradiância real medida em superfície.

Tabela 2: Coluna com a irradiância extraterrestre adicionada

irradiancia_global	ano	mês	dia	hora	minuto	registro	dias_ julianos	ioeff
-0.949	2022	1	1	0	0	01/01/2022 00:00	1	1411,175
-0.976	2022	1	1	0	1	01/01/2022 00:01	1	1411,175
-1.017	2022	1	1	0	2	01/01/2022 00:02	1	1411,175
-1.054	2022	1	1	0	3	01/01/2022 00:03	1	1411,175
-1.094	2022	1	1	0	4	01/01/2022 00:04	1	1411,175

Fonte: Autoria própria

4.3.4.2 CÁLCULO DA DECLINAÇÃO SOLAR

A **declinação solar** ($\text{sen}^{-1}\delta$) representa a inclinação da Terra em relação ao Sol em determinado dia do ano. Esse ângulo influencia diretamente o caminho aparente do Sol no céu e, consequentemente, a quantidade de radiação recebida por uma superfície terrestre.

A declinação varia ao longo do ano de aproximadamente $-23,45^\circ$ a $+23,45^\circ$, sendo negativa durante o inverno e positiva no verão (no hemisfério sul). O cálculo é feito com base no dia juliano, utilizando a equação 3:

$$\arccos\delta = -\sin 23,45^\circ \cdot \cos \frac{360^\circ \cdot (n+10)}{365,25} \quad (3)$$

O resultado é adicionado à coluna declinação da tabela de dados, servindo como base para cálculos posteriores da geometria solar para a caracterização do efeito borda de nuvem.

4.3.4.3 CONVERSÃO PARA TEMPO SOLAR E CÁLCULO DO ÂNGULO HORARIO

Hora Decimal e Equação do Tempo

Primeiramente, a hora é convertida para valores decimais, e, em seguida, é aplicada a Equação do Tempo, representada pela equação 5, que corrige a diferença entre o tempo civil e o tempo solar ao longo do ano, causada pela excentricidade da órbita terrestre e inclinação do eixo da Terra:

$$Et = 9,87 \cdot \sin(2B) - 7,53 \cdot \cos(B) - 1,5 \sin(B) \quad (4)$$

$$\text{Onde: } B = 360^\circ \cdot \frac{(n-81)}{364} \quad (5)$$

Horário Solar e Ângulo Horário

Cálculo Ângulo Horário solar (ω), que é determinado pelo arco de 15 graus que o Sol percorre por hora, sendo dado pelas equações 6 e 7.

$$\omega = (H_s - 12) \cdot 15 \quad (6)$$

Onde o horário solar é dado por:

$$H_s = \text{horário}_{\text{oficial}} + 4(L_s - L_i) + Et \quad (7)$$

Onde L_s é a longitude padrão, 45° para Pernambuco e L_i é a latitude do local, que foram definidas na etapa inicial de organização de dados.

4.3.4.4 CÁLCULO DO ÂNGULO ZENITAL

O ângulo zenital é definido como o ângulo entre o deslocamento dos raios solares e a vertical do local onde a estação se encontra, sendo calculado pela Equação 8. Esse parâmetro possibilita a determinação do horário do nascer e pôr do Sol, especialmente quando atinge o valor de 90° , conforme expresso na Equação 9.

$$\theta_z = \arccos[\cos\lambda \cdot \cos\delta(\cos\omega - \cos\omega_s)] \quad (8)$$

Onde:

$$\cos\omega_s = -\tan\lambda \cdot \tan\delta \quad (9)$$

ω = ângulo horário em graus;

λ = Latitude em graus;

δ = Declinação em graus.

4.3.4.5 CÁLCULO DO ÍNDICE DE CLARIDADE

O **índice de claridade** (KT) é definido como a razão entre a irradiância solar medida na superfície terrestre e a irradiância extraterrestre horizontal teórica ajustada ao ângulo zenital:

$$KT = \frac{GHI}{I_{0eff} \cdot \cos\theta_z} \quad (10)$$

Onde:

- GHI é a irradiância global medida,
- I_{0eff} é a irradiância extraterrestre diária,
- θ_z é o ângulo zenital.

O índice é calculado para cada instante da série temporal, considerando apenas os casos em que o ângulo zenital é inferior a 80° . Valores acima desse limite correspondem a períodos próximos ao nascer ou ao pôr do sol, quando o sol ainda está acima do horizonte, mas a radiação solar atravessa uma camada atmosférica muito mais espessa, sofrendo elevada dispersão e absorção. Nesses momentos, os

Instituto Federal de Pernambuco. Campus Pesqueira. Curso de Bacharelado em engenharia elétrica.
15 de dezembro de 2025

dados tornam-se instáveis e poderia comprometer a precisão dos cálculos do índice, justificando a adoção do limite de 80° em metodologias como a de Gueymard.

Os valores obtidos de KT são então incorporados à tabela principal, servindo como base para a identificação do efeito borda de nuvem, fenômeno observado quando a irradiância global ultrapassa o valor teórico devido à refração e à concentração da luz solar nas bordas das nuvens.

4.3.5 IDENTIFICAÇÃO DO EFEITO BORDA DE NUVEM

Para identificar a ocorrência do efeito borda de nuvem, o algoritmo utiliza uma abordagem baseada no valor do índice de claridade KT, conforme Gueymard (2017). Em condições atmosféricas normais, os valores de KT raramente ultrapassam 1. No entanto, durante o efeito borda de nuvem, é comum observar valores superiores a 1, devido à sobreirradiância causada pela concentração dos raios solares nas bordas das nuvens.

Com base nisso, o algoritmo avalia o valor de KT para cada registro. Quando KT ultrapassa um determinado limiar (por exemplo, 1,1), considera-se que houve uma ocorrência do fenômeno.

A detecção é implementada através de uma variável binária chamada `ocorrencia2`, que recebe:

- 1 para momentos com provável ocorrência do efeito borda de nuvem,
- 0 caso contrário.

Essa abordagem torna possível a criação de uma nova coluna na tabela, identificando automaticamente os registros onde o efeito ocorre. como exemplo a figura 3 mostra a nova coluna “ocorrência”, adicionada a tabela.

Figura 3: coluna ocorrência adicionada à tabela.

registro	dias_julianos	ioeff	declinacao	kt	ocorrencia
2022-01-01 00:00:00	1	1411.17463	-0.40155	0.0	0
2022-01-01 00:01:00	1	1411.17463	-0.40155	0.0	0
2022-01-01 00:02:00	1	1411.17463	-0.40155	0.0	0
2022-01-01 00:03:00	1	1411.17463	-0.40155	0.0	0

Fonte: Autoria própria

4.3.6 DURAÇÃO DAS OCORRÊNCIAS

Nesta etapa, os resultados são organizados de forma temporal e estrutural, agrupando as ocorrências conforme sua sequência no tempo. São identificados os eventos contínuos e, ao final, os dados tratados podem ser exportados em formato CSV, facilitando análises posteriores e integração com outras ferramentas.

4.3.6.1 ORGANIZAÇÃO TEMPORAL

Essa etapa do tratamento de dados tem como objetivo preparar a base temporal para as análises do efeito borda de nuvem, garantindo que as informações de tempo estejam devidamente estruturadas e possam ser utilizadas em diferentes níveis de agrupamento (ano, mês, dia, hora e minuto).

Primeiramente, a coluna contendo o registro original dos dados é convertida para o formato datetime, o que permite ao Python reconhecer e manipular as informações de tempo de forma precisa. A partir dessa conversão, são criadas novas colunas derivadas: uma que representa apenas o horário (hora, minuto e segundo) e outra que armazena somente a data (ano, mês e dia), chamadas, respectivamente, de “registrohora” e “registrodia”, conforme visto na figura 4.

Além disso, é extraída separadamente a informação de minuto, possibilitando análises em intervalos menores de tempo, essenciais para detectar eventos rápidos como o efeito borda de nuvem.

Essa organização da estrutura temporal é fundamental para os cálculos posteriores, como o agrupamento de ocorrências consecutivas, a identificação de eventos de curta duração e a consolidação de tabelas que relacionam frequência e duração das ocorrências.

Figura 4: Adição das colunas registrohora e registrodia.

dias_julianos	ioeff	declinacao	kt	ocorrencia	registrohora	registrodia
1	1411.17463	-0.40155	0.0	0	00:00:00	2022-01-01
1	1411.17463	-0.40155	0.0	0	00:01:00	2022-01-01

Fonte: Autoria própria

4.3.6.2 AGRUPAMENTO DAS OCORRÊNCIAS

Após a etapa de organização e filtragem inicial da base de dados, foi desenvolvido um procedimento em Python para identificar e agrupar automaticamente as ocorrências consecutivas do efeito borda de nuvem. O objetivo desse processo é contabilizar a duração de cada evento e a frequência com que ocorrem diferentes intervalos de tempo em minutos.

Foi implementada uma lógica de agrupamento baseada na sequência de valores da variável “ocorrência”. Sempre que o valor é igual a 0, entende-se que o evento foi interrompido, e um novo grupo é iniciado. Assim, cada sequência contínua de valores iguais a 1 representa um único evento de borda de nuvem. Em seguida, o código filtra apenas os registros de ocorrência igual a 1, para eliminar períodos de inatividade e considerar apenas os instantes em que o fenômeno foi realmente detectado.

Para cada grupo identificado, são calculadas a duração da ocorrência (quantidade de minutos consecutivos com valor igual a 1) e as informações correspondentes ao momento de início do evento — incluindo o ano, o mês, o dia e a hora. A duração é então ajustada para garantir a contagem correta do tempo total de cada evento.

Após essa etapa, as ocorrências são agrupadas por ano, mês, dia, hora e duração, o que permite gerar tabelas de frequência detalhada, nas quais é possível visualizar quantas vezes ocorreram eventos de cada duração em períodos específicos. Por fim, o script organiza e soma os resultados, produzindo também uma tabela consolidada com o total de ocorrências por duração, considerando todos os anos disponíveis na base de dados.

4.3.6.3 OCORRÊNCIAS POR ORDEM TEMPORAL

Após o cálculo da duração e da frequência das ocorrências do efeito borda de nuvem, foi implementada uma etapa adicional de tratamento, responsável por consolidar os resultados de acordo com diferentes níveis temporais. Essa fase tem como finalidade permitir uma análise flexível e detalhada do comportamento das ocorrências ao longo do tempo, podendo-se visualizar tanto tendências anuais quanto variações mensais, diárias e horárias.

Primeiramente, é realizada uma verificação e correção da coluna de duração, garantindo que todos os valores estejam no formato numérico adequado (tipo float), o que evita inconsistências durante os cálculos de soma e agrupamento. Em seguida, foi desenvolvida uma função modular, capaz de agregar os dados de forma automática conforme o nível de detalhamento desejado.

Essa função recebe como parâmetros a tabela de frequência detalhada e a lista de colunas que definem o agrupamento temporal — por exemplo, apenas o ano, ou o conjunto formado por ano e mês, ou ainda combinações mais específicas como ano, mês, dia e hora. A partir desses critérios, o algoritmo soma as quantidades de ocorrências para cada duração, produzindo novas tabelas de síntese.

Dessa forma, o procedimento possibilita gerar quatro tipos principais de resultados:

1. **Agregação anual:** soma todas as ocorrências de cada duração dentro de um mesmo ano.
2. **Agregação mensal:** detalha as ocorrências por ano e mês, permitindo comparar a distribuição temporal ao longo dos meses de cada ano.

3. **Agregação diária:** apresenta as quantidades por ano, mês e dia, permitindo identificar dias com maior incidência do fenômeno.
4. **Agregação horária:** inclui também a hora, permitindo observar a variação intradiária e identificar horários com maior frequência de eventos.

Essas tabelas resultantes permitem avaliar tanto o comportamento global das ocorrências quanto suas variações sazonais e diárias, oferecendo uma visão abrangente e precisa sobre a distribuição temporal do efeito borda de nuvem.

4.3.6.4 IDENTIFICAÇÃO DE EVENTOS CONTÍNUOS

Com o objetivo de determinar a duração das ocorrências consecutivas do efeito borda de nuvem, foi elaborado um procedimento automatizado que organiza os dados, identifica os eventos contínuos e calcula o tempo total de cada ocorrência. Esse processo é essencial para transformar os dados de registro minuto a minuto em informações consolidadas sobre a duração e a frequência dos fenômenos observados.

Primeiramente, o campo de data foi convertido para o formato `datetime`, garantindo que o Python reconhecesse corretamente as informações temporais. Essa etapa é indispensável para permitir cálculos e operações cronológicas, evitando inconsistências de formato.

Em seguida, a base de dados foi ordenada por dia e hora, o que assegura que os registros sigam a sequência temporal correta — condição necessária para o cálculo coerente da duração dos eventos.

A partir dessa ordenação, o código criou um novo campo denominado `registrohora`, que representa uma linha de tempo contínua, onde cada linha do `dataframe` equivale a um minuto. Essa coluna foi construída de forma cumulativa dentro de cada dia, de modo que o tempo progride minuto a minuto, permitindo que os cálculos de duração sejam precisos mesmo quando há milhares de registros diários.

Na etapa seguinte, o algoritmo identifica automaticamente grupos de ocorrências consecutivas. Sempre que o valor da variável de ocorrência muda (de 1

para 0 ou de 0 para 1), é criado um grupo, o que permite separar claramente os períodos de presença e ausência do fenômeno. Assim, cada grupo de valores “1” representa uma ocorrência contínua do efeito borda de nuvem.

Posteriormente, o horário inicial e final da sequência são extraídos para cada grupo, resultando em um resumo com os intervalos de início e término de cada evento. Com base nesses dois horários, é calculada a duração total em minutos, incluindo o minuto final para que eventos isolados sejam contabilizados corretamente. Por fim, aplica-se uma correção que garante uma duração mínima de 1 minuto, evitando que registros isolados sejam desconsiderados.

O resultado é visto na figura 5, uma tabela consolidada contendo, para cada evento contínuo, o horário inicial, o horário final e a duração total em minutos.

Figura 5: identificação do horário inicial e final.

	Hora Inicial	Hora Final	Duração (minutos)
0	2022-01-01 11:52:00	2022-01-01 11:52:00	1.0
1	2022-01-01 12:02:00	2022-01-01 12:02:00	1.0
2	2022-01-01 12:24:00	2022-01-01 12:24:00	1.0
3	2022-01-02 13:22:00	2022-01-02 13:26:00	5.0
4	2022-01-04 10:18:00	2022-01-04 10:19:00	2.0

Fonte: Autoria Própria

4.3.6.5 EXPORTAÇÃO EM CSV

Após o processamento e tratamento dos dados no ambiente Python, os resultados obtidos foram organizados e podem ser exportados em formato CSV (Comma-SeparatedValues). Essa escolha se deve à ampla compatibilidade do formato, que permite o armazenamento estruturado das tabelas e facilita sua posterior análise em outros softwares ou linguagens de programação. Cada tabela gerada, contendo as informações filtradas por ano, mês, dia, hora e duração das ocorrências, pode ser salva em arquivos CSV distintos, garantindo a rastreabilidade e a integridade dos dados produzidos durante o experimento.

4.3.6.6 RESULTADOS

Ao final, diversas tabelas são geradas cada uma correspondente a uma variável específica. Cada tabela apresenta os dados de forma organizada, facilitando a visualização e interpretação das informações.

Além disso, são aplicados comandos para padronizar a estética das tabelas, garantindo que fiquem adequadas para apresentação e relatórios. Essa padronização inclui alinhamento, formatação de números e títulos claros, tornando os resultados mais profissionais e consistentes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a coleta de dados da rede solarimétrica de Pernambuco, foram elaboradas tabelas detalhadas que registram a frequência e a duração do efeito borda de nuvem. Essas tabelas são altamente flexíveis, permitindo filtragem por anos, meses, dias e horas para análises precisas e contextualizadas.

Além das análises realizadas, este trabalho resultou no desenvolvimento de um método inédito para a identificação automática do efeito borda de nuvem em séries temporais de irradiância solar. A proposta foi formalizada por meio de um pedido de patente depositado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), sob o número de processo 512025005364-9, evidenciando o caráter inovador e a aplicabilidade prática da pesquisa. O algoritmo descrito na patente utiliza parâmetros solares e critérios de limiar para detecção do fenômeno, podendo ser integrado a sistemas de monitoramento e previsão solarimétrica.

Foram feitas comparações entre o método utilizado no trabalho de Pedrosa Filho e Silva (2023) que utilizou planilhas de Excel e o script em Python.

5.1 COMPARAÇÃO ENTRE PLANILHAS EXCEL E DATAFRAME PYTHON

Nos estudos de Pedrosa Filho e Silva (2023), o tratamento dos dados foi conduzido em escala anual e realizado utilizando o Microsoft Excel. Entretanto,

observou-se que esse método apresentava limitações significativas à medida que o volume de dados aumentava.

O software, embora bastante acessível e visual, mostrou dificuldades em lidar com grandes quantidades de registros, principalmente ao executar somas e fórmulas em colunas extensas. Em alguns momentos, o computador chegou a travar ou apresentar lentidão excessiva. Por outro lado, ao utilizar um script em Python, com medição do tempo de execução por meio do método *datetime.now()*, o processamento automático dos dados “foi concluído em apenas 1 minuto e 15 segundos”. Já no Excel, o tempo total não está associado apenas ao cálculo em si, mas a todo o processo manual: decidir como tratar os dados, aplicar fórmulas, corrigir erros, preencher colunas e reorganizar a planilha. Esse trabalho manual pode demandar horas ou até dias, especialmente quando envolve grandes conjuntos de dados ou necessidade de repetição do procedimento.

Outro ponto limitante foi o manuseio dos filtros. No Excel, o processo de filtragem ocorre diretamente na planilha principal, o que torna o ambiente de trabalho confuso e sobrecarregado. Além disso, o ajuste manual das fórmulas em cada coluna aumenta o risco de erro e dificulta a replicação do mesmo tratamento em outros conjuntos de dados.

Em contrapartida, a análise desenvolvida em Python demonstrou-se muito mais eficiente e precisa. Por meio do uso de bibliotecas como *pandas* e *numpy*, foi possível automatizar completamente o processo de filtragem e cálculo das ocorrências. O script não apenas executa as mesmas operações realizadas no Excel, como também amplia a capacidade analítica, permitindo que os dados sejam segmentados automaticamente por ano, mês, dia e hora, sem necessidade de intervenção manual.

Enquanto no Excel foram geradas duas tabelas principais — uma com o valor bruto das ocorrências de 1 minuto e outra com a quantidade total de ocorrências agrupadas por duração, o Python produz além dessas outras três tabelas adicionais, correspondentes à filtragem automática dos resultados por:

- Mês de cada ano analisado;
- Dia de cada mês;
- Hora dentro de cada dia.

Dessa forma, o tratamento em Python oferece uma análise mais detalhada, dinâmica e escalável, permitindo verificar, por exemplo, em quais horários ou períodos do ano o efeito borda de nuvem ocorre com maior frequência.

5.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A fim de validar os resultados, foi realizada uma comparação direta entre as tabelas obtidas em Excel e Python, conforme apresentado nas Tabelas 3 e 4. Para o teste, utilizou-se o conjunto de dados provenientes da estação solarimétrica de Cedro, correspondente ao ano de 2022, selecionado por representar um período completo de medições contínuas.

Tabela 3 – Comparação entre os resultados obtidos em Excel e Python para a estação de Cedro (2022).

N° de ocorrências de 2022	
Excel	Python
388	388

Fonte: Autoria própria

Tabela 4 – Comparação entre os resultados obtidos em Excel e Python para a estação de Cedro (2022).

Comparação de ocorrências por duração		
Duração da ocorrência (minutos)	Quantidade de ocorrências – Excel	Quantidade de ocorrências – Python
1	388	388
2	123	123
3	39	39
4	9	9
5	11	11
6	3	3
7	2	2
8	1	1

Fonte: Autoria própria

Os valores brutos e as somas de ocorrências por duração apresentaram-se idênticos entre as duas abordagens, evidenciando a confiabilidade e a consistência

Instituto Federal de Pernambuco. Campus Pesqueira. Curso de Bacharelado em engenharia elétrica.
15 de dezembro de 2025

dos scripts desenvolvidos em Python em relação ao tratamento manual realizado no Excel.

Após essa validação inicial, foi possível expandir a análise utilizando os recursos do Python para gerar novas tabelas derivadas, filtrando automaticamente as ocorrências por ano, mês, dia e hora. Essa automatização permitiu uma visualização mais detalhada do comportamento temporal do fenômeno e eliminou limitações observadas no Excel, como o tempo de processamento elevado, a necessidade de fórmulas repetitivas e a dificuldade de manipular grandes volumes de dados de forma eficiente.

Observa-se que não há discrepância entre os valores obtidos nas planilhas Excel e os calculados pelos scripts em Python, confirmando que a metodologia automatizada reproduz com precisão os resultados do processamento manual. Isso valida a aplicação do código como ferramenta confiável para análises em larga escala.

5.3 GERAÇÃO DE TABELAS

Após a etapa de coleta e pré-processamento dos dados, o algoritmo desenvolvido possibilita a geração de tabelas analíticas referentes ao efeito borda de nuvem, com aplicação de múltiplos critérios de filtragem. A estrutura dos dados permite extrair tanto a contagem absoluta de ocorrências, segmentada por ano, mês, dia, hora e minuto, quanto a distribuição estatística das durações consecutivas em que o fenômeno foi detectado. Essa abordagem facilita a identificação de padrões temporais e a análise da frequência e persistência dos eventos, fornecendo subsídios quantitativos para avaliações mais aprofundadas.

5.3.1 QUANTIDADE DE OCORRÊNCIAS

Os filtros que são possíveis utilizar para registrar a quantidade bruta de ocorrência por ano, mês, dia e hora, podem ser vistos nas figuras 6, 7, 8 e 9.

Figura 6: Ocorrências por ano.

	Ano	Quantidade de Ocorrências
0	2022	882
1	2023	874

Fonte: Autoria Própria

A tabela “ocorrências por ano” apresenta a quantidade total de ocorrências registradas por ano. Permite identificar os períodos anuais com maior número de eventos e analisar a variação entre diferentes anos.

Figura 7: Ocorrências por mês.

	Ano	Mês	Quantidade de Ocorrências
0	2022	1	31
1	2022	2	14
2	2022	3	96
3	2022	4	82
4	2022	5	81
5	2022	6	133
6	2022	7	163
7	2022	8	117
8	2022	9	59
9	2022	10	13
10	2022	11	55
11	2022	12	38

Fonte: Autoria Própria

A tabela “ocorrências por mês” apresenta a distribuição das ocorrências por ano e mês. Facilita a observação de padrões mensais e possíveis tendências sazonais ao longo do tempo.

Figura 8: Ocorrências por dia.

	Ano	Mês	Dia	Quantidade de Ocorrências
0	2022	1	1	3
1	2022	1	2	5
2	2022	1	4	2
3	2022	1	7	2
4	2022	1	8	1
5	2022	1	12	2
6	2022	1	14	6
7	2022	1	16	1
8	2022	1	17	4
9	2022	1	22	1
10	2022	1	27	1
11	2022	1	29	3

Fonte: Autoria Própria

A tabela “ocorrências por dia” apresenta as ocorrências diárias dentro de cada mês e ano. Possibilita uma análise mais detalhada dos dias com maior frequência de eventos.

Figura 9: Ocorrências por hora.

	Ano	Mês	Dia	Hora	Quantidade de Ocorrências
0	2022	1	1	11	1
1	2022	1	1	12	2
2	2022	1	2	13	5
3	2022	1	4	10	2
4	2022	1	7	12	2
5	2022	1	8	12	1
6	2022	1	12	9	2
7	2022	1	14	9	5
8	2022	1	14	12	1
9	2022	1	16	14	1
10	2022	1	17	8	1
11	2022	1	17	9	3

Fonte: Autoria Própria

A tabela “ocorrências por hora” apresenta as ocorrências organizadas por hora dentro de cada dia. Permite identificar os horários de maior incidência dos eventos e possíveis repetições no padrão horário.

5.3.2 FREQUÊNCIA E DURAÇÃO DO EFEITO BORDA DE NUVEM

As figuras 10, 11, 12 e 13 mostram os possíveis filtros para registrar a frequência e duração do efeito borda de nuvem. Com adição da figura 14, que compila as frequências e durações de todo período dos dados.

Figura 10: Frequência e duração por ano.

	Ano	Duração	Quantidade
0	2022	1.0	388
1	2022	2.0	123
2	2022	3.0	39
3	2022	4.0	9
4	2022	5.0	11
5	2022	6.0	3
6	2022	7.0	2
7	2022	8.0	1

Fonte: Autoria Própria

A tabela “Frequência e Duração por Ano” apresenta o total de ocorrências agregadas por ano, considerando a soma das durações registradas. Ela permite analisar a variação anual das ocorrências e identificar os anos com maior incidência do fenômeno.

Figura 11: Frequência e duração por mês.

	Ano	Mês	Duração	Quantidade
0	2022	1	1.0	14
1	2022	1	2.0	4
2	2022	1	4.0	1
3	2022	1	5.0	1
4	2022	2	1.0	7
5	2022	2	2.0	2
6	2022	2	3.0	1

Fonte: Autoria Própria

A tabela “Frequência e Duração por Ano e Mês” apresenta o total de ocorrências distribuídas por mês dentro de cada ano. Essa tabela possibilita observar padrões sazonais e períodos do ano com maior frequência de eventos.

Figura 12: Frequência e duração por dia.

	Ano	Mês	Dia	Duração	Quantidade
0	2022	1	1	1.0	3
1	2022	1	2	5.0	1
2	2022	1	4	2.0	1
3	2022	1	7	1.0	2
4	2022	1	8	1.0	1
5	2022	1	12	2.0	1
6	2022	1	14	1.0	2

Fonte: Autoria Própria

A tabela “Frequência e Duração por Ano, Mês e Dia” apresenta o total de ocorrências agrupadas por dia, oferecendo uma visão mais detalhada da distribuição diária. Ela facilita a identificação de dias com comportamento atípico ou picos de ocorrência.

Figura 13: Frequência e duração por hora.

	Ano	Mês	Dia	Hora	Duração	Quantidade
0	2022	1	1	11	1.0	1
1	2022	1	1	12	1.0	2
2	2022	1	2	13	5.0	1
3	2022	1	4	10	2.0	1
4	2022	1	7	12	1.0	2
5	2022	1	8	12	1.0	1
6	2022	1	12	9	2.0	1

Fonte: Autoria Própria

A tabela “Frequência e Duração por Ano, Mês, Dia e Hora” apresenta as ocorrências organizadas até o nível horário, permitindo uma análise minuciosa da variação dos eventos ao longo do dia. Essa tabela auxilia na identificação de horários com maior concentração ou repetição do fenômeno.

Figura 14: Frequência e duração total dos dados.

Duração (min)		Quantidade de Ocorrências
0	1.0	733
1	2.0	251
2	3.0	78
3	4.0	30
4	5.0	13
5	6.0	4
6	7.0	3
7	8.0	3
8	9.0	1
9	10.0	1
10	14.0	1

Fonte: Autoria Própria

Na figura 14, foram utilizados os dados dos anos de 2022 e 2023 para operação, e como pode-se notar a quantidade de ocorrências e a quantidade de ocorrências e durações batem com os dados da tabela figura 1,

5.4 FLEXIBILIDADE NA ANÁLISE: EXPORTAÇÃO EM .CSV

O sistema desenvolvido não apenas identifica e contabiliza eventos relacionados ao efeito borda de nuvem, como também fornece ao usuário a opção de exportar os arquivos em CSV. O que permite ao usuário ter acesso aos dados em

diferentes programas de planilhas eletrônicas e ferramentas de análise, como Microsoft Excel, Google Planilhas, LibreOffice Calc ou linguagens como Python e R.

Essa abordagem foi adotada para garantir flexibilidade no uso dos dados exportados, facilitando a criação de gráficos personalizados, aplicação de filtros, ou integração com outros sistemas. Com isso, o usuário pode explorar os resultados de maneira mais detalhada e conforme suas preferências ou necessidades específicas.

Além disso, a disponibilização em diferentes formatos amplia a compatibilidade com diversos sistemas operacionais e versões de software, tornando a ferramenta mais acessível, versátil e prática para pesquisadores, engenheiros ou qualquer profissional interessado na análise de dados fotovoltaicos.

5.5 RESUMO DAS OCORRÊNCIAS DE EVENTOS

Para analisar a duração dos eventos de interesse, foi construída uma tabela resumo a partir dos dados horários coletados. Cada linha da base representava um registro de ocorrência de 1 minuto, com a data armazenada na coluna registro dia. Para garantir a integridade temporal, as datas foram convertidas para o formato datetime, e cada registro recebeu um timestamp contínuo (registro hora) baseado na data e em uma contagem cumulativa de minutos dentro de cada dia.

Em seguida, os blocos consecutivos de ocorrência (valores iguais a 1) foram identificados através da criação de grupos, permitindo separar eventos contínuos de ocorrências isoladas. Para cada grupo, foram calculados:

- **Horário inicial (horainicial):** o primeiro registro do bloco.
- **Horário final (horafinal):** o último registro do bloco.
- **Duração em minutos (duracao_min):** diferença entre horafinal e horainicial, acrescida de 1 minuto para incluir o registro final e garantir que eventos isolados tenham duração mínima de 1 minuto.

O resultado é mostrado na figura 15, em que cada linha representa um evento contínuo, com início, fim e duração. Essa abordagem permite uma análise precisa da distribuição temporal dos eventos e serve como base para estatísticas adicionais, como frequências por duração ou por períodos discretos (ano, mês, dia, hora).

Figura 15: Duração registrada

	Hora Inicial	Hora Final	Duração (minutos)
0	2022-01-01 11:52:00	2022-01-01 11:52:00	1.0
1	2022-01-01 12:02:00	2022-01-01 12:02:00	1.0
2	2022-01-01 12:24:00	2022-01-01 12:24:00	1.0
3	2022-01-02 13:22:00	2022-01-02 13:26:00	5.0
4	2022-01-04 10:18:00	2022-01-04 10:19:00	2.0
...
1113	2023-12-22 10:24:00	2023-12-22 10:24:00	1.0
1114	2023-12-22 10:40:00	2023-12-22 10:40:00	1.0
1115	2023-12-24 06:55:00	2023-12-24 07:02:00	8.0
1116	2023-12-24 07:26:00	2023-12-24 07:29:00	4.0
1117	2023-12-24 08:54:00	2023-12-24 08:55:00	2.0

1118 rows × 3 columns

Fonte: Autoria própria

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O script desenvolvido automatiza o processamento inicial dos dados, reduzindo significativamente o esforço manual e otimizando o tempo dedicado à análise. Essa automatização elimina a necessidade de conhecimentos acadêmicos avançados para a realização dos cálculos, tornando a ferramenta acessível a um público mais amplo.

Além disso, a possibilidade de exportar os resultados no formato CSV — oferece flexibilidade ao analista, permitindo a utilização da plataforma de sua preferência para visualização e interpretação dos dados.

Dessa forma, este trabalho se consolida como uma ferramenta estratégica para pesquisas que envolvam o efeito borda de nuvem, ao facilitar e acelerar o tratamento dos dados brutos, permitindo que o foco do profissional seja direcionado à análise crítica e à tomada de decisões fundamentadas.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, R. C.; TIBA, C.; SILVA, T. C. Suncloud-e: Software para a localização do efeito lente produzido por nuvens na irradiação solar global. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 6, n. 2, p. 95-101, 2015.

GUEYMARD, C. 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.

IFPE; APAC; INMET; INPE. Rede Solarimétrica de Pernambuco, 2025. Disponível em: <https://redesolpe.com.br/>. Acesso em: 27 set. 2025.

KLEISSL, J. *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*. Amsterdam: Academic Press, 2013.

MOL, W.; VAN HEERWAARDEN, C. Mechanisms of surface solar irradiance variability under broken clouds. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 25, p. 4419-4441, 2025. Disponível em: <https://acp.copernicus.org/articles/25/4419/2025/>. Acesso em: 29 set. 2025.

NOURI, B. et al. The impact of thin clouds on surface solar irradiance variability. *EGUsphere*, 2022. Disponível em: <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2022/egusphere-2022-xyz/>. Acesso em: 29 set. 2025.

PEDROSA FILHO, M. H. de O.; SILVA, A. B de S Análise da ocorrência do efeito lente da radiação solar no Estado de Pernambuco. [S. l.: s. n.], ano não informado. Artigo em posse do autor.

RABL, A. *Active Solar Collectors and Their Applications*. New York: Oxford University Press, 1985.

SANTOS, M, F, F.; PEDROSA FILHO, M. H. de O. Cloud enhancement occurrences analysis in Afogados da Ingazeira city in Brazilian northeast. In: *ISES Solar World Congress 2019 / SHC 2019 Conference Proceedings*, 2019.

SCHADE, N. et al. Assessing the impact of cloud edge dynamics on short-term solar irradiance variability. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021. Disponível em: <https://amt.copernicus.org/>. Acesso em: 25 out. 2025.


SOUZA, M. B. de; TONOLO, É. A.; YANG, R. L.; TIEPOLO, G. M.; URBANETZ JUNIOR, J. Determinação da irradiação difusa a partir da irradiação global horizontal: estudo para a cidade de Curitiba. *Smart Energy*, 2018. Disponível em: <https://utfpr-ct-static-content.s3.amazonaws.com/labens.ct.utfpr.edu.br/wp-content/uploads/2018/11/Souza-et-al.-Smart-Energy-2018-Determinação-Radiação-Difusa-Artigo-Completo.pdf>. Acesso em: 29 set. 2025.

TEIXEIRA, V. A.; PEDROSA FILHO, M. H. de O. Análise da influência do efeito borda de nuvem sobre os parâmetros elétricos da rede CA em sistemas FV conectados à rede. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 24, p. 130-138, 2020. Disponível em: <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/download/1969/1904/4699>. Acesso em: 24 out. 2025.

WRDC – World Radiation Data Center. *Guidelines for the Calculation of Extraterrestrial Solar Radiation*. Davos: World Radiation Center, 2020.

ANEXOS



23/10/2025 870250097255
20:21

29409192345859685

Pedido de Registro de Programa de Computador - RPC

Número do Processo: 512025005364-9

Dados do Titular

Titular 1 de 2

Nome ou Razão Social: THIAGO NATAN SOUZA GENUINO

Tipo de Pessoa: Pessoa Física

CPF/CNPJ: 10864249489

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Engenheiro, arquiteto e afins

Endereço: Rua Artu Alexandrino Lins, 16, 1º andar, Centenário

Cidade: Pesqueira

Estado: PE

CEP: 55200000

País: Brasil

Telefone:

Fax:

Email: thiagonatan93@gmail.com