



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA DE EVENTOS EXTREMOS DE IRRADIÂNCIA
SOLAR INCIDENTE NA SUPERFÍCIE DEVIDO AO EFEITO DE “CLOUD
ENHANCEMENT”.**

Gyovana Ernani da Silva

Relatório de Iniciação Científica do programa PIBIC,
Orientada pelo Dr. Rodrigo Santos Costa e
Coorientada pelo Dr. Fernando Ramos Martins

Santos, SP

2022



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA DE EVENTOS EXTREMOS DE IRRADIÂNCIA
SOLAR INCIDENTE NA SUPERFÍCIE DEVIDO AO EFEITO DE “CLOUD
ENHANCEMENT”.**

Gyovana Ernani da Silva

Relatório de Iniciação Científica do
Programa PIBIC, orientado pelo Dr.
Rodrigo Santos Costa e Dr. Fernando
Ramos Martins.

Santos, SP

2022

RESUMO

Os fenômenos de interação da radiação solar com as nuvens podem acarretar a incidência de radiação solar acima das condições normais de céu claro. Em geral, o fenômeno da sobreirradiância ocorre em dias de céu parcialmente nublado, com duração muito curta temporalmente variando entre segundos a poucos minutos. Em geral, os sistemas de geração fotovoltaica são dimensionados para atuar com irradiação máxima correspondente a céu claro de forma que a sobreirradiância pode causar impactos importantes numa planta de geração fotovoltaica devido a danos tanto em células fotovoltaicas (superaquecimento) e inversores (sobretensão); e na qualidade da energia entregue à rede de distribuição em razão das variações bruscas da incidência de radiação solar. Esta pesquisa de iniciação científica tem como objetivo compreender as ocorrências dos eventos de sobreirradiância solar incidente na superfície. O estudo visa entender se há um padrão de ocorrência do fenômeno em regiões com a climatologia local distintas, abrangendo as estações em Brasília, Petrolina, Cachoeira Paulista e São Martinho da Serra. A base de dados utilizada está disponível no Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais, rede SONDA. As estações de coleta de dados estão distribuídas espacialmente no território brasileiro com o intuito de prover uma base de dados observados representativa dos diversos regimes climáticos presentes no território brasileiro, portanto compatível com os objetivos deste trabalho.

Neste estudo, foram utilizados modelos de céu claro definidos através da revisão bibliográfica e os dados das estações radiométricas da rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais). O estudo envolveu levantamento bibliográfico sobre o estado da arte na temática do projeto e a capacitação em uso da linguagem Python para a produção de scripts para análise estatística dos dados observados e comparação com valores estimados para a irradiação solar incidente na superfície em condições de céu claro.

Palavras-chave: Energia Solar; Sensoriamento Remoto; Nebulosidade, Sobreirradiância.

SUMÁRIO

- 1 INTRODUÇÃO**
 - 1.1 OBJETIVO GERAL**
 - 1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO**
- 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**
- 3 METODOLOGIA**
 - 3.1 BASE DE DADOS**
 - 3.2 MODELO DE CÉU CLARO EMPREGADO**
 - 3.2.1 MODELO DE INEICHEN**
 - 3.2.2 MODELO DE SOLIS**
 - 3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA**
 - 3.3.1 CAPACITAÇÃO EM PYTHON**
- 4 RESULTADO E DISCUSSÃO**
- 5 CONCLUSÃO**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. INTRODUÇÃO

O planejamento energético é importante para assegurar o abastecimento de energia ao menor custo, com o menor risco de desabastecimento de energia e com o menor risco socioeconômico e ambiental.

De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar a energia solar é temporalmente intermitente e apresenta uma variabilidade espacial elevada em razão de sua forte relação com condições meteorológicas locais, como por exemplo cobertura de nuvens, concentração de gases atmosféricos, sistemas sinóticos e fatores astronômicos associados aos movimentos orbital e de rotação da Terra. O conhecimento da distribuição espacial do recurso solar em grandes extensões territoriais pode ser alcançado com a aquisição de dados em superfície e/ou uso de modelos de transferência radiativa validados com dados observacionais.

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da radiação solar em eletricidade, conhecido como Efeito Fotovoltaico, sendo a célula fotovoltaica um dispositivo que apresenta em sua composição um material semicondutor. A potência de saída de um gerador fotovoltaico depende principalmente da irradiância para os painéis fotovoltaicos. As características operacionais das células fotovoltaicas estão também diretamente relacionadas às condições ambientais – a corrente de curto-circuito é quase diretamente proporcional à irradiância e a tensão de circuito aberto é inversamente proporcional à temperatura da célula. A temperatura ambiente e a velocidade do vento são fatores que estão intrinsecamente relacionados com a temperatura da célula fotovoltaica durante sua operação (Järvelä,2020).

As características elétricas nominais dos módulos fotovoltaicos são definidos sob as condições de teste padrão, ou seja, a uma irradiância de 1000 W/m^2 e uma temperatura de 25° C . No entanto, essa condição é difícil de ocorrer na prática identificar. Valores próximos de 1000 W/m^2 são observados, em geral, em condições de céu sem nebulosidade (céu claro). Em dias parcialmente nublados, a irradiância pode exceder consideravelmente a irradiação do céu claro esperado devido a um fenômeno chamado de *cloud enhancement (CE)* ou também conhecido como sobreirradiância.

O fenômeno de *cloud enhancement* ocorre devido ao forte espalhamento de Mie causado pelas bordas das nuvens em condições de nebulosidade parcial.(Andrade,2016) Os

eventos de CE são mais intensos quando uma lacuna estreita é cercada por nuvens finas. O fenômeno pode ser categorizado em três grupos:

- i) aumento da irradiância por nuvens próximas ao disco solar;
- ii) sob a nuvem homogênea onde a irradiância horizontal difusa possa ser elevada antes e depois do evento de CE, de modo que as bordas das nuvens não contribuam para o aumento da irradiância.
- iii) o Sol é parcialmente obscurecido por uma fina camada de nuvem de forma que a irradiância horizontal difusa possa obter valores elevados enquanto que a irradiância direta tem valores relativamente baixos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa de iniciação científica teve como objetivo compreender as ocorrências dos eventos de sobreirradiância solar incidente na superfície. O estudo visa entender se há padrões de ocorrência do fenômeno (frequência de ocorrência e sazonalidades) em regiões com a climatologia local distintas e a compreensão da ocorrência de eventos extremos de irradiância solar incidente na superfície associados com o espalhamento de radiação solar em bordas de nuvens baixas ou por efeito lente em nuvens altas.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Foram objetivos específicos deste estudo:

- a) organizar dados solarimétricos coletados no território brasileiro em estações da rede SONDA;
- b) averiguar e identificar regime de ocorrência do fenômeno CE associado com a climatologia local;
- c) identificar a existência de sazonalidade dos eventos com base em dados históricos observados em estações da rede SONDA.

Além dos objetivos relacionados à temática do projeto, há metas de formação e capacitação da pesquisadora bolsista no uso da linguagem Python de programação e

bibliotecas disponibilizadas pela comunidade para uso em modelagem aplicada à meteorologia e energia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ineichen (2006) investigou uma seleção de oito modelos de irradiância solar em céu claro sendo eles, o Modelo de Solis, Bird e Hulstrom, Molineaux, Esra , Ineichen, CPCR2, REST2 e Kasten. Os modelos apresentam um alto desempenho em uma avaliação comparativa com um conjunto de 16 bancos de dados observados independentes cobrindo um intervalo de tempo de 20 anos. Os parâmetros utilizados foram altitude - que variou desde o nível do mar até 1600m - e a variabilidade de climas. As bases de dados de 16 estações terrestres de alta qualidade latitudes de 28° N a 45° N.

Para a realizar a comparação, os parâmetros do aerossol e do vapor d'água são recuperados das medições do solo e podem ser considerados como uma aproximação da realidade. As discrepâncias de medidas do modelo serão então representativas da capacidade dos modelos e reproduzir a forma dinâmica da evolução diurna da radiação terrestre. Os resultados obtidos através dessa comparação, a validação dinâmica, podem ser considerados como a precisão intrínseca dos modelos.

As conclusões apresentadas pelo autor indicam que a precisão dos parâmetros de entrada como a turbidez é fundamental na validação dos componentes de radiação obtidos e que a escolha de um modelo específico é secundária. Os critérios de seleção do modelo devem se basear na simplicidade de implementação, disponibilidade do parâmetro de entrada, como turbidez link ou profundidade óptica do aerossol ou na capacidade do modelo produzir a radiação espectral.

O artigo de Jarvela et al (2020) trata sobre as características do fenômeno de *cloud enhancement (CE)* e usinas fotovoltaicas. Inicialmente o autor faz uma breve introdução sobre o que é e quais são as características do fenômeno de *cloud enhancement (CE)*, e comenta que embora o fenômeno de CE seja bastante conhecido, o seu efeito nos sistemas fotovoltaicos são poucos estudados. O objetivo do estudo foi entender como o fenômeno de CE afeta os módulos fotovoltaicos.

O fenômeno está relacionado às nuvens, as áreas terrestres afetadas são limitadas em tamanho. Normalmente, as medições de irradiância foram feitas usando apenas um sensor e

com isso os resultados não podem ser aplicados diretamente a grandes geradores fotovoltaicos que estão espalhados em áreas terrestres com grandes dimensões. Se a frequência de amostragem for pequena os eventos de CE com curta duração podem não ser detectados em um curto espaço de tempo. Os dados de medição consistem em medições de irradiância de 21 piranômetros baseados em fotodiodo na planta de pesquisa de energia solar fotovoltaica localizada no telhado da Universidade de Tampere na Finlândia, no norte da Europa. Os piranômetros têm tempo de resposta rápido (<500 ns a 95%) e podem medir irradiância de até 2.000 W / m^2 . A análise é baseada em 23 meses de verão entre os anos de 2014 e 2018. A frequência de amostragem das medições foi de 10 Hz.

Devido ao ambiente de medição não ser o ideal, ocasionalmente alguns dos piranômetros mediram valores de irradiância anormais. Essas anormalidades são causadas por pequenas diferenças na orientação dos piranômetros, sombras e reflexos das árvores e estruturas de edifícios próximos, albedo de neve em alguns dias de primavera e, ocasionalmente, alguns eventos de sombreamento rápido são causados por pássaros. Por causa do ângulo de inclinação de 45° , os piranômetros são suscetíveis ao albedo de neve e, portanto, a inclusão dos dias afetados por isso distorceria indevidamente os resultados.

As características dos eventos CE foram estudadas do ponto de vista da geração de energia fotovoltaica e por meio da análise de dados de medição de irradiância de uma série de piranômetros espalhados em uma área de terra correspondente a um gerador fotovoltaico de 0,1 MW. Os dados de irradiância foram usados para calcular as velocidades e direções de movimento das sombras das nuvens. Posteriormente, as velocidades da área CE foram deduzidas das velocidades da sombra da nuvem. Os autores desenvolveram um método simples para estimar as irradiâncias médias em áreas de terra correspondentes aos tamanhos típicos de geradores fotovoltaicos. O método foi validado comparando as irradiâncias médias estimadas de eventos de CE com as irradiâncias médias reais medidas em uma área de terra de um gerador fotovoltaico de 0,1 MW. Os resultados obtidos por nosso método corresponderam bem às medições reais.

As irradiâncias médias em áreas terrestres de até 0,1 MW de tamanho de gerador fotovoltaico podem ocasionalmente ser 1,5 vezes a irradiância de céu claro. Até esta faixa de potência, o tamanho do gerador fotovoltaico realmente não afeta os valores médios de irradiância máximos esperados.

Os autores utilizaram dados do nível do mar da costa atlântica intertropical, na cidade de Recife, Brasil, no período de fevereiro de 2008 a janeiro de 2009. Valores extremos de irradiância solar total maiores que CSC foram medidos durante 3,4% dos dias do período total registrado. Esta porcentagem aumenta para 7,4% para a irradiância solar global dentro de 95,1–100% do CSC e para 15,3% dentro de 90,1–95% do CSC. O maior valor extremo de irradiância solar total, $1477 \pm 30 \text{ W / m}^2$, foi registrado no dia 28 de março de 2008 às 11:34 hora local (UTC -3h). Superou em 7,9% o valor de CSC para este dia ($1369,4 \text{ W / m}^2$) e em 42,3% o valor estimado do modelo de radiação Iqbal C de céu claro ($1037,7 \text{ W / m}^2$). A observação de valores extremos deve ser levada em consideração no estudo dos efeitos da radiação solar relacionados a materiais expostos ao exterior, índice de UV e efeitos biológicos, entre outros. Além disso, o conhecimento detalhado deste interessante efeito pode contribuir significativamente para esclarecer aspectos físicos sobre a interação da radiação solar global com o ecossistema e as mudanças climáticas.

Piacentini et al (2010) realizam uma análise detalhada de medições terrestres de irradiação solar global intensificada por nuvens no Nordeste do Brasil nas cidades de Água Branca, Santana do Ipanema, Palmeira dos Índios, Laje, Pão de Açúcar, Arapiraca, Coruripe e Maceió a partir de janeiro a dezembro de 2008. As medições foram realizadas em intervalos de tempo de 1 minuto usando piranômetros. Os autores constataram que:

- i) O fenômeno não é incomum e ocorre em pelo menos um terço dos dias de um determinado mês;
- ii) A duração cumulativa (número de eventos consecutivos de 1 minuto) pode chegar a 34 minutos;
- iii) Há um claro efeito sazonal, e a probabilidade de ocorrência mensal mostra dois picos, um em abril e outro em outubro;
- iv) A radiação solar mais extrema foi de 1650 W / m^2 em Água Branca, que é aproximadamente 350 W / m^2 a acima da irradiação solar extraterrestre ;
- v) há forte assimetria no perfil de ocorrência entre a manhã e à tarde.

Por fim, os autores apontam que a observação de valores extremos deve ser levada em consideração no estudo dos efeitos da radiação solar relacionados ao índice de UV e efeitos

biológicos, entre outros. radiação extrema acima da irradiância extraterrestre com duração de até 30 minutos pode significar índices UV (UVI) muito altos e potencialmente perigosos, mesmo em situações com nebulosidade aparentemente adequada.

Lappalainen et al (2020) apontam que a incidência e irradiância solar em geradores fotovoltaicos pode exceder consideravelmente a irradiância de céu claro esperada devido ao fenômeno de cloud enhancement (CE). Quando CE ocorre, a potência máxima do gerador fotovoltaico pode ultrapassar a potência nominal do inversor que conecta o gerador à rede. As características do evento CE e os efeitos da CE na operação elétrica de geradores fotovoltaicos foram estudados pelos autores com base em irradiâncias medidas e velocidades de borda de nuvem.

Ao longo de onze meses em San Diego, Califórnia, o pico de irradiância medido mais alto foi 1466 W / m^2 . Além disso, as maiores irradiâncias médias simuladas para geradores de até 1 MW foram acima de 1400 W / m^2 . Houve ventos CE excedendo 1000 W / m^2 que alcançaram vários quilômetros. Esses resultados indicam que mesmo grandes usinas de energia fotovoltaica em escala de serviço público podem ser afetadas significativamente por eventos de CE. Além disso, a operação de três usinas fotovoltaicas foi simulada durante cerca de 2.400 eventos CE medidos com um modelo espaço-temporal detalhado.

Os efeitos do dimensionamento do inversor na operação das usinas também foram estudados, e os impactos negativos da CE na operação de sistemas fotovoltaicos mostraram aumento com o aumento da razão DC / AC. Durante os eventos CE, as perdas de energia devido ao corte de energia foram de 5% a 50% da produção de energia disponível. Os autores concluem que, embora eventos de CE afetem a operação das usinas fotovoltaicas, os impactos desses efeitos foram pequenos em termos de energia agregada, uma vez que os eventos CE que impactam mais fortemente a operação do sistema fotovoltaico são muito raros.

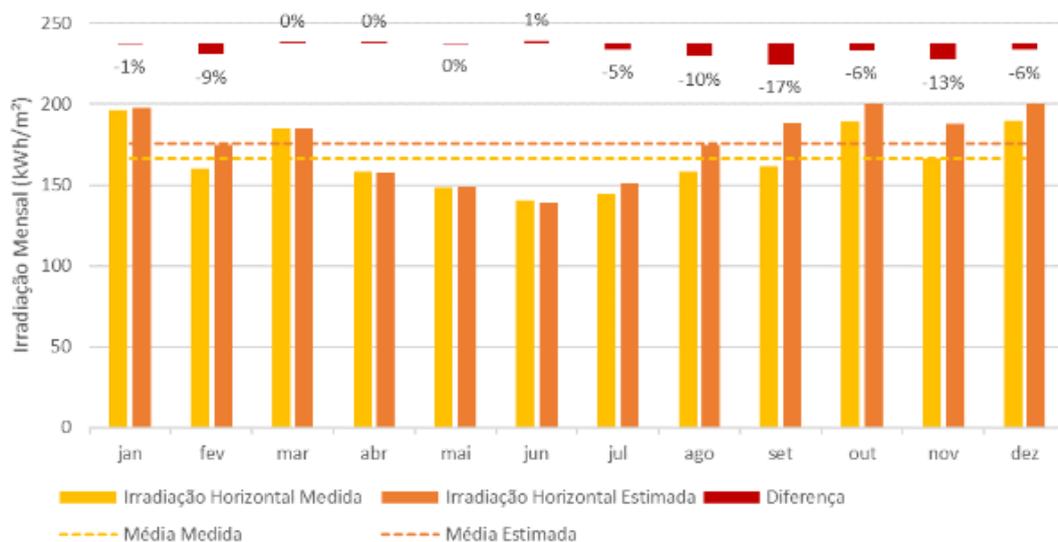
O estudo desenvolvido por Marília Braga, Rafael Antunes Campos, Lucas Rafael do Nascimento, Ricardo Rüther e Esmeraldo Macedo Santo (2018) foi realizado no âmbito do projeto de P&D SOLAR GLOBAL, executado no interior do estado da Bahia, na cidade de Irecê. O projeto apresenta como objetivo a investigação do potencial de geração de cinco diferentes tecnologias fotovoltaicas, cada uma com uma determinada potência instalada próximo a 10 kWp. O grupo de pesquisa responsável pelo acompanhamento da geração é o

grupo de pesquisa Estratégica em Energia Solar da UFSC. O estudo trata também da análise das avaliações do desempenho de sistemas fotovoltaicos e dos níveis de irradiação do local quando comparado com as bases de dados do atlas solarimétrico brasileiro.

O presente estudo feito neste artigo está localizado no município de Irecê-Ba, a medição dos dados teve início no ano de 2016. Os dados meteorológicos da usina solar de Irecê são medidos pela estação solarimétrica instalada no local que por sua vez possui uma série de sensores sendo eles, anemômetros, sensor de temperatura ambiente dentre outros instrumentos. As medidas de todos os sensores são lidas e armazenadas pelo datalogger, que por sua vez está instalado dentro da caixa do sistema de medição. Os dados coletados foram tratados de acordo com o proposto pelo *Baseline Surface Radiation Network (BSRN)*.

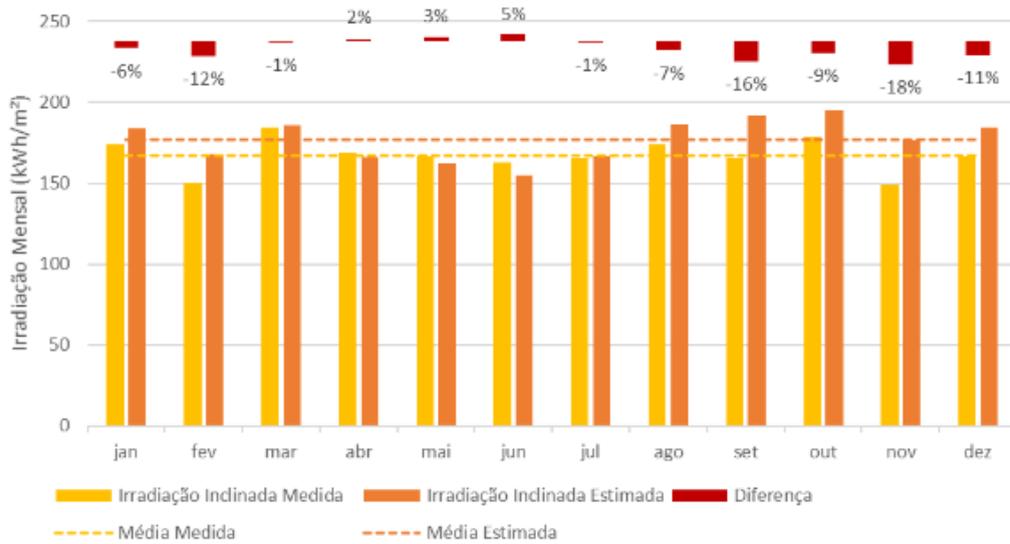
Abaixo temos as figuras retiradas do artigo, no qual a figura 1 nos mostra uma comparação entre a irradiação solar global horizontal medida dentro de um período estipulado juntamente com o valor estimado através da segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar. O mesmo foi feito para a figura 3, apenas com uma diferença, na figura 3 é analisado os valores da irradiação global incidente no plano dos módulos.

Figura 1 - Irradiação global horizontal medida vz irradiação global horizontal estimada para a localidade de Irecê- BA.



Fonte - (Braga, et al 2018)

Figura 2 - Irradiação global inclinada medida vz irradiação global inclinada estimada para a localidade de Irecê-BA.

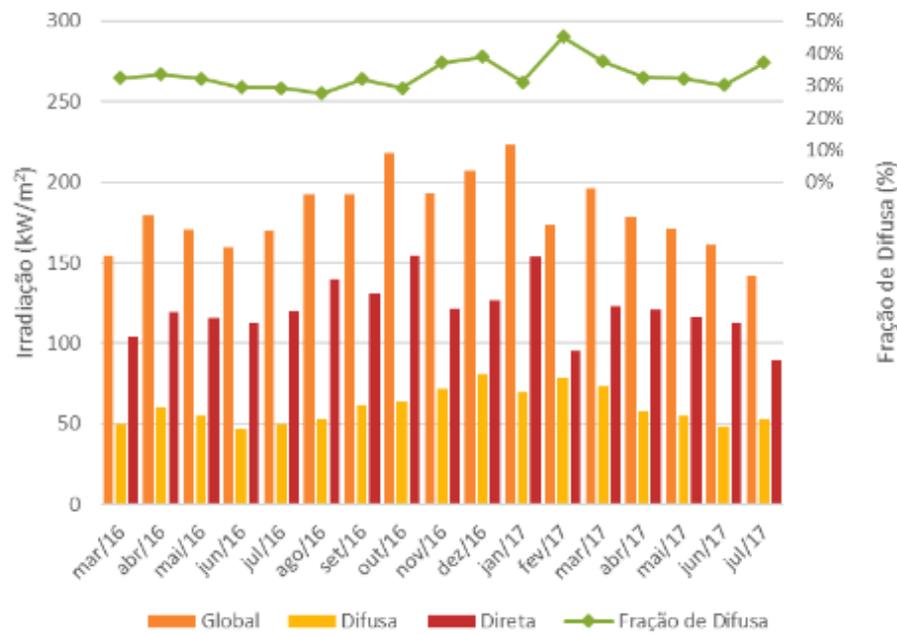


Fonte - (Braga, et al 2018)

A figura 3 mostra o resultado obtido pelos autores para um perfil mensal da irradiação global horizontal, pode ser identificado através das barras de cores laranjas, a irradiação difusa horizontal são as barras de coloração amarela e irradiação direta horizontal estão na cor vermelha. O comportamento da fração da componente de irradiação difusa em relação à componente global (linha verde) também é apresentado e pode ser considerado um indicador do percentual de nebulosidade da região.

Os autores nesta imagem procuraram fazer uma análise da distribuição de energia para faixas de irradiância fazendo-se necessária quando se deseja avaliar quais são os índices de irradiância mais frequentes na região. Isto permite uma avaliação da eficiência, assim como do carregamento ideal do inversor que poderia ser realizado para um novo empreendimento (Burger e Rüther, 2006).

Figura 3 - Irradiação horizontal global, difusa e direta medidas para a localidade de Irecê-BA



Fonte - (Braga, et al 2018)

Na média do período analisado, as irradiâncias se concentram entre 700 W/m² e 1000 W/m², correspondendo a cerca de 42% da irradiação total recebida. Cerca de 19% da irradiação encontra-se com níveis iguais ou superiores ao valor padrão de 1000 W/m² e 2% da irradiação encontra-se com níveis superiores a 1200 W/m².

Além da influência no carregamento do inversor, os níveis de irradiância elevados podem levar à queima dos fusíveis mesmo com o dimensionamento correto do dispositivo. Isso ocorre devido aos efeitos de borda de nuvem, que resultam em níveis de irradiância superiores a 1500 W/m² (máximo de 1551 W/m² na média de um minuto medida no período analisado na localidade de Irecê). Esses valores elevados de irradiância são refletidos em valores elevados na corrente dos módulos em mesma proporção, o que leva à queima de fusíveis de strings

Em todo o período analisado, a geração total dos sistemas foi de 71,65 MWh; e o Yield total do sistema foi de 1542,85 kWh/kWp. Ainda que não se possa atribuir estes resultados às tecnologias propriamente, os fusíveis utilizados atendem ao “maximum fuse rating” indicado pelos fabricantes; a utilização de fusíveis que atendam aos níveis de corrente experimentados no local levaria à perda da garantia dos módulos. Estes resultados apontam para a necessidade de que seja rediscutido o dimensionamento do fusível máximo admitido para as localidades do Brasil que experimentam eventos extremos (e longos) de

sobreirradiância e podem ser considerados como uma contribuição nova para o tema no Brasil. Eventos extremos de irradiância vêm sendo medidos em outros projetos coordenados pelo laboratório Fotovoltaica/UFSC e este tema deve ser mais discutido pela comunidade solar brasileira na medida em que usinas de grande porte começam a ser instaladas nestas regiões do país.

Os autores concluem que em todo o período analisado, a geração total dos sistemas foi de 71,65 MWh; e que o Yield total do sistema foi de 1542,85 kWh/kWp. Ainda que não se possa atribuir estes resultados às tecnologias propriamente, os fusíveis utilizados atendem ao “maximum fuse rating” indicado pelos fabricantes; a utilização de fusíveis que atendam aos níveis de corrente experimentados no local levaria à perda da garantia dos módulos. Estes resultados apontam para a necessidade de que seja rediscutido o dimensionamento do fusível máximo admitido para as localidades do Brasil que experimentam eventos extremos (e longos) de sobreirradiância e podem ser considerados como uma contribuição nova para o tema no Brasil. Eventos extremos de irradiância vêm sendo medidos em outros projetos coordenados pelo laboratório Fotovoltaica/UFSC e este tema deve ser mais discutido pela comunidade solar brasileira na medida em que usinas de grande porte começam a ser instaladas nestas regiões do país.

Ressalta-se, a importância da qualidade e da confiabilidade do sistema de aquisição e tratamento de dados, sendo que esses componentes têm importância fundamental para uma análise correta no desempenho de qualquer sistema.

3. METODOLOGIA

A metodologia está baseada na análise estatística dos dados observados e comparação com valores estimados para a irradiação solar incidente na superfície em condições de céu claro fornecidas por modelos numéricos estabelecidos na literatura científica.

Por se tratar de uma influência do padrão de nebulosidade na localidade de monitoramento da irradiação solar incidente na superfície, e considerando que a base de dados da rede SONDA já se estende por 15 anos, o estudo permite verificar se há alguma tendência de crescimento (ou decréscimo) da frequência de ocorrência do fenômeno nas diversas regiões do Brasil.

3.1 BASE DE DADOS

Os dados observados em estações da rede SONDA foram utilizados neste estudo, que estão distribuídas espacialmente com o intuito de prover uma base de dados observados representativa dos diversos regimes climáticos presentes no território brasileiro.

As estações da rede SONDA possuem sensores para as variáveis meteorológicas básicas (temperatura, umidade relativa, direção e velocidade de vento, pressão atmosférica) com frequência de registro de dados em 1 minuto. As estações também coletam dados de irradiação solar global e difusa na mesma frequência de registro. Sensores para monitoramento da irradiação direta estão em operação apenas nas estações de referência localizadas em Brasília, Petrolina, Cachoeira Paulista e São Martinho da Serra.

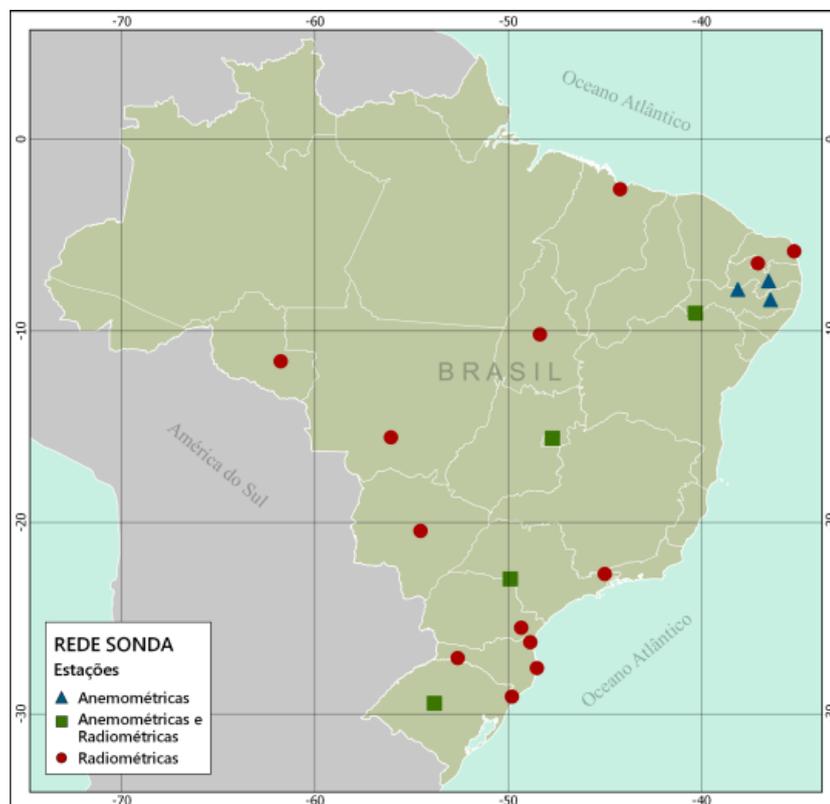
A coleta de dados na rede SONDA é realizada com frequência de um segundo e os valores médios das observações em um minuto são armazenados em arquivos disponibilizados para acesso público. Antes da disponibilização pública, os dados coletados passam por procedimento de controle de qualidade, descrito em <http://sonda.ccst.inpe.br>, para identificação de observações suspeitas de problemas durante o período de aquisição.

A estação de Petrolina está localizada no estado brasileiro de Pernambuco, na região nordeste do país. Suas coordenadas geográficas são Latitude 9.39°Sul, Longitude 40.5°Oeste, altitude de 387 metros. Os dados são provenientes da estação da rede SONDA localizada em Petrolina.

A cidade de Brasília, está localizada na região centro-oeste do Brasil, apresenta por suas vez Latitude 15.36° Sul, Longitude 47.42° Oeste e uma altitude de 1023 metros. Outra

estação utilizada no presente trabalho é a de Cachoeira Paulista, localizada no município da Região Metropolitana do Vale do Paraíba, no interior do estado de São Paulo com Latitude 22.41° Sul, Longitude 45.00° a oeste e uma altitude próxima de 574 metros . A estação de Cachoeira Paulista, de acordo com os dados da rede SONDA, pode ser classificada como uma estação solarimétrica, enquanto a estação de Brasília é considerada como solarimétrica e anemométrica. A cidade de São Martinho da Serra situa-se na região central do estado do Rio Grande do Sul. Pode ser classificada como uma estação solarimétrica e anemométrica e suas coordenadas geográficas são Latitude 29.26° Sul, Longitude 53.49° Oeste e altitude por volta de 489 metros.

Figura 4 - Localização das estações SONDA



Fonte: <http://sonda.ccst.inpe.br/index.html>

As estações por sua vez medem outras variáveis meteorológicas, como por exemplo a irradiância solar direta normal, a irradiância solar global e a irradiância solar difusa. Para melhor compreensão do fenômeno de cloud enchantment (CE) foram utilizados os valores medidos da irradiância solar global.

Os dados com suspeita de erros são sinalizados, mas não são descartados para evitar a perda de dados válidos como as observações que ocorrem em eventos de CE. Em geral, dados coletados em momentos de CE estão sinalizados como dados fisicamente improváveis ou extremamente raros de acontecer. No entanto, estudos mostram que os dados devem ser qualificados como corretos uma vez que são decorrentes de fenômeno físico de interação da radiação solar com as nuvens. Dessa forma, o estudo utiliza os dados brutos observados nas estações sem basear nas sinalizações do controle de qualidade.

Esta pesquisa utilizou dados observados no período de 2018 a 2019 nas estações de Cachoeira Paulista, São Martinho da Serra, Brasília e Petrolina. Como os dados coletados pela rede SONDA nos fornecem diversos parâmetros (como, por exemplo, temperatura, umidade, pluviosidade, irradiância direta, difusa e global, etc), a série histórica foi organizada de modo a manter um único parâmetro para estudo do fenômeno de CE - irradiância solar global incidente no plano horizontal.

3.2 MODELO DE CÉU CLARO EMPREGADO

De acordo com Ineichen (2018), o conhecimento da irradiância do céu claro que atinge o solo é um parâmetro chave no campo da modelagem e avaliação da radiação solar. A identificação dos eventos de *cloud enhancement* foi realizada comparando a irradiância solar global observada na superfície com os valores de irradiância solar global horizontal fornecidos pelo modelo céu claro descrito no tópico anterior.

3.2.1 Modelo de Ineichen

O modelo de céu claro de Ineichen e Perez está relacionado com irradiância horizontal global (GHI), irradiância normal direta (DNI) e também é calculado a componente horizontal difuso de céu claro (DHI) como a diferença entre GHI e $DNI \cdot \cos(\text{zênite solar})$ conforme apresentado. Um relatório sobre modelos de céu claro descobriu que o modelo Ineichen/Perez tem excelente desempenho com um conjunto mínimo de dados de entrada.

3.2.2 Modelo de Solis

O modelo Solis (Mueller et al., 2004) é usado como função de normalização no processo de avaliação da irradiância. O modelo Solis clear sky é um novo esquema baseado

em cálculos de transferência radiativa e na relação Lambert-Beer. Quando usado em grande escala geográfica para converter imagens de satélite meteorológicos em dados de radiação, os cálculos de transferência radiativa consomem muito tempo do computador. Também é baseado em cálculos LibRadTran em um espaço de 10 dimensões incluindo profundidades ópticas de aerossóis em dois comprimentos de onda, profundidades ópticas parciais de aerossóis para a determinação do tipo de aerossol, a coluna de vapor de água e a quantidade de ozônio. (Ineichen,2016)

Para aumentar a velocidade computacional, uma versão simplificada de banda larga do Solis foi derivada por Ineichen, 2008a , Ineichen, 2008b. As tabelas de consulta foram calculadas com LibRadTran para possíveis intervalos dos parâmetros de entrada e as regressões de mínimos quadrados foram então aplicadas aos dados das tabelas de consulta. A segunda versão (2008b) do modelo inclui os tipos de aerossóis rurais, urbanos, marítimos e troposféricos (Shettle, 1989). O modelo requer profundidade óptica de aerossol pancromático (a 700 nm) e coluna de vapor de água como entradas. O modelo é preciso e computacionalmente rápido (Ineichen,2016).

3.3 CAPACITAÇÃO EM PYTHON

Para o desenvolvimento das atividades previstas no plano de trabalho do projeto de Iniciação Científica foi necessário a capacitação no uso de linguagem Python para a programação de scripts computacionais para execução dos procedimentos numéricos da metodologia de cálculo do ano meteorológico típico. Foi utilizado para a elaboração dos dados da biblioteca.

A linguagem Python é uma das mais empregadas em todo o mundo e vem sendo difundida em diversos cursos de computação e engenharia. Para analisar os dados é necessário conhecimento e prática com essa ferramenta, e isso pode ser obtido na internet através do curso “Introdução à Ciência da Computação com Python Parte 1” disponível em <https://www.coursera.org/learn/ciencia-computacao-python-conceitos>. O curso foi realizado em paralelo com as atividades curriculares de Engenharia de Petróleo. O tempo dedicado ao curso foi de 15h/semanais e foram necessários 11 meses para a conclusão.

Com o avanço da capacitação em python, o próximo passo dado foi a utilização da biblioteca do PVLIB para compreender como plotar e identificar os fenômenos CE. Essa biblioteca nos permitiu determinar os valores de irradiância solar incidente na superfície em momentos de céu claro (sem nuvens). Esses valores são fundamentais para identificar

os fenômenos de CE nas regiões escolhidas no trabalho. A determinação da irradiância de céu claro utilizou modelos de Ineichen e Solis já implementados na PVLIB.

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a identificação da ocorrência do CE foi utilizado o modelo de Ineichen e de Solis. O primeiro passo para a análise dos dados foi o estudo e compreensão do comportamento da irradiação solar global na superfície por meio de gráficos de série temporal ao longo dos meses nas determinadas localidades. Em seguida com uso da biblioteca do PVLIB, obteve-se a irradiância de céu claro com os modelos de Ineichen e Solis. Tendo a biblioteca em uso, foram feitos alguns gráficos com a irradiância global fornecida pelos modelos e entender como elas se comportam ao longo dos meses.

Conforme mostrado na Figura 5, o próximo passo foi a criação de funções que tem por objetivo concatenar e sincronizar as estimativas para irradiância de céu claro com os dados coletados em superfície. O modelo SOLIS foi aplicado para todas a localidade de estudo em razão do fato de ter produzido estimativas mais próximas dos valores observados em superfície em momentos em que a estação não se encontra sombreada por nuvens.

Figura 5 : Implementação de funções para o cálculo de ocorrência e identificação do fenômeno de CE.

```
# estamos usando o modelo SOLIS para o céu claro + 5%
df_brasilia['ghi_cs']=cs_solis['ghi']
df_brasilia['difcs']=df_brasilia['glo_avg']-df_brasilia['ghi_cs']*1.05
#df_brasilia['eventos'] = ["Senior" if s >=400 else "Junior" for s in df['Salary']]
df_brasilia['difcs'] = np.where(df_brasilia['ghi_cs'] > 250, df_brasilia['difcs'], 0)
df_brasilia['difcs'] = np.where(df_brasilia['difcs'] > 0, df_brasilia['difcs'], np.NaN)
df_brasilia['eventos'] = np.where(df_brasilia['difcs'] > 0, 1, 0)

dim = df_brasilia.shape[0] # armazenando o núm. de linhas do dataframe completo

# objetivo do for é identificar eventos com duração maior de um minuto
df_brasilia['evto_unico'] = 0
for i in range(1,dim):
    if (df_brasilia['eventos'][i] == 0):
        df_brasilia['evto_unico'][i] = 0
    else:
        df_brasilia['evto_unico'][i] = df_brasilia['eventos'][i]+df_brasilia['evto_unico'][i-1]

#df_brasilia['difcs']=ghi-gihcs
#difcs.loc[(difcs) > 0].count()
df_brasilia
```

Autor: Gyovana Ermani

O próximo passo está relacionado com a identificação somente do fenômeno CE onde foi criada uma variável que tem como potencial filtrar a base de dados onde ocorre o fenômeno de CE, isto é, o cálculo da diferença entre a irradiância global medida na estação em superfície e a irradiância global estimada por Solis é maior que zero.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Este trabalho apresentou os resultados do desempenho de dois modelos distintos de céu claro que por sua vez têm um ponto em comum que é compreender a ocorrência do fenômeno de CE em diferentes localidades do território brasileiro, entre os meses de janeiro a dezembro de 2018-2019. Os dados foram avaliados comparando-se dados medidos da rede SONDA, conhecidos também como dados de superfície e dos modelos Ineichen e Solis, utilizando como parâmetro a irradiância global.

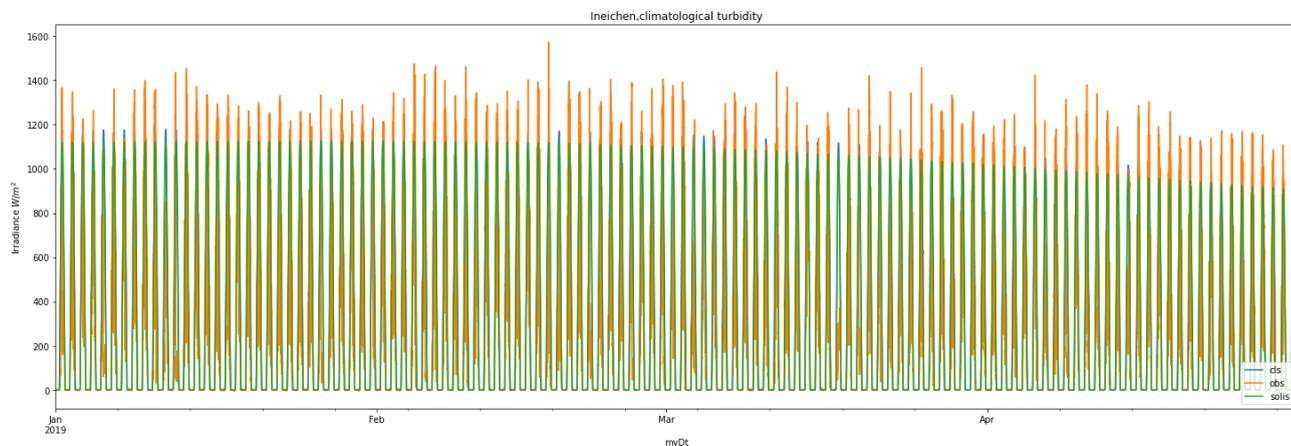
Para compreender a ocorrência do fenômeno de CE foi utilizado o modelo SOLIS e INEICHEN para calcular a irradiância na superfície em condição de céu sem nebulosidade. Ambos os modelos forneceram estimativas bastantes distintas quando comparados entre si modelo SOLIS mostrou valores mais próximos dos dados observados em superfície e por isso foi adotado como critério para identificar os eventos CE.

4.1 ESTAÇÃO DE BRASÍLIA

A base de dados fornecidos pela SONDA possui uma vasta quantidade de informações a serem estudadas. Na Fig. 6 pode-se observar ao longo do ano de 2019 como foi a distribuição do CE e seus horários de maior incidência, na figura 6 está relacionado com a estação de Brasília, mas a mesma análise foi feita para as demais estações com objetivo de compreender como esse fenômeno se distribui ao longo do intervalo de tempo trabalhado.

Na Figura 6 indica que os eventos de CE aconteceram ao longo de todo o ano de 2019 conforme demonstrado pela ocorrência da linha laranja ultrapassando a linha verde que corresponde aos valores estimados pelo modelo SOLIS para a condição de céu sem nuvens. A tabela 1 aponta que o número de minutos com ocorrência de CE é muito superior do que os demais meses - cerca de 40-50% superior.

Figura 6 - : Modelo de Solis - Comparação de Quantidade de Fenômeno de CE (2019)



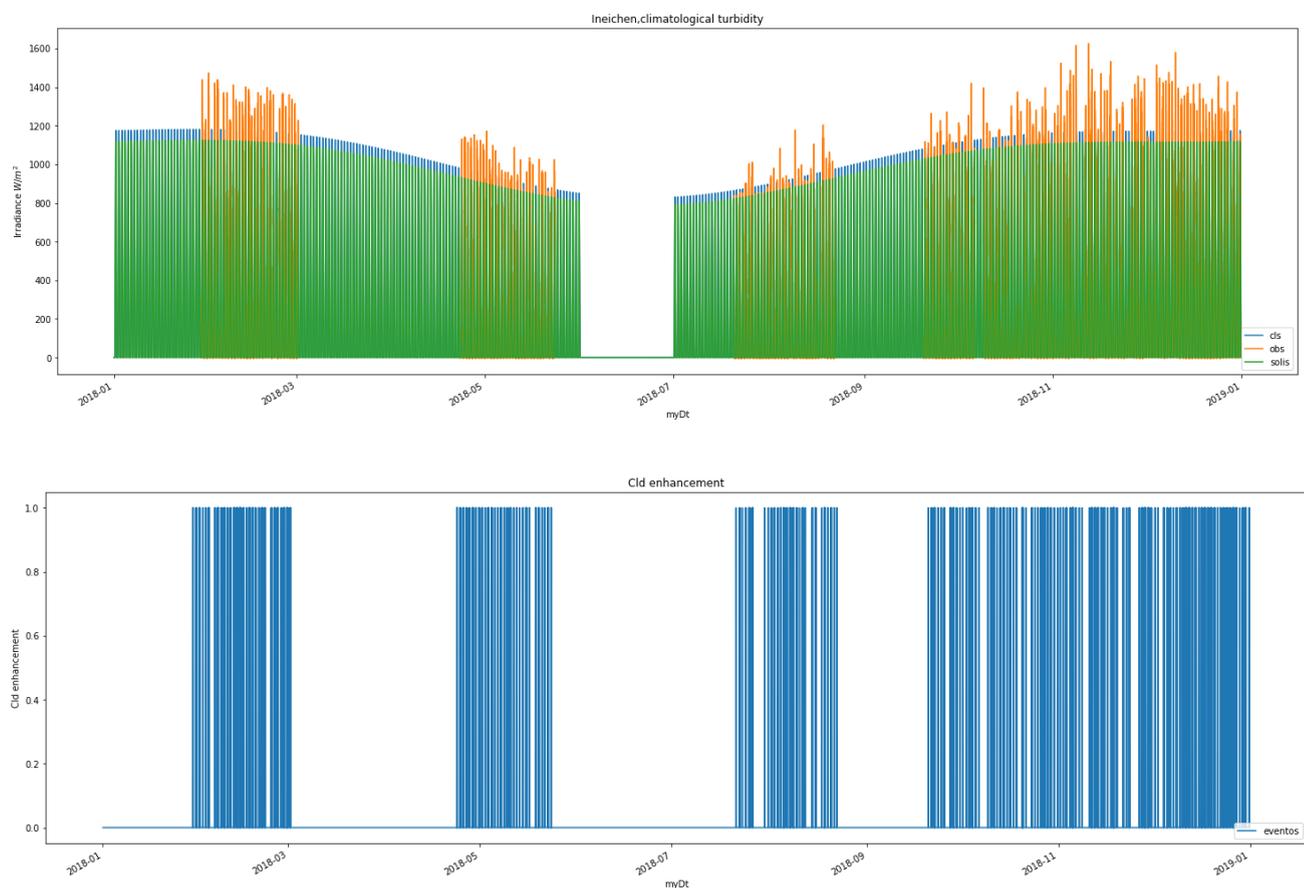
Autor- Gyovana Ernani

Tabela 1 - Identificação do Fenômeno em Cada Mês (2019) através do Modelo de Solis.

2019	Nº de CE
Janeiro	14186
Fevereiro	7717
Março	8344
Abril	9784

Autor- Gyovana Ernani

Figura 7 : Modelo de Solis - Comparação de Quantidade de Fenômeno de CE (2018)



Autor- Gyovana Ernani

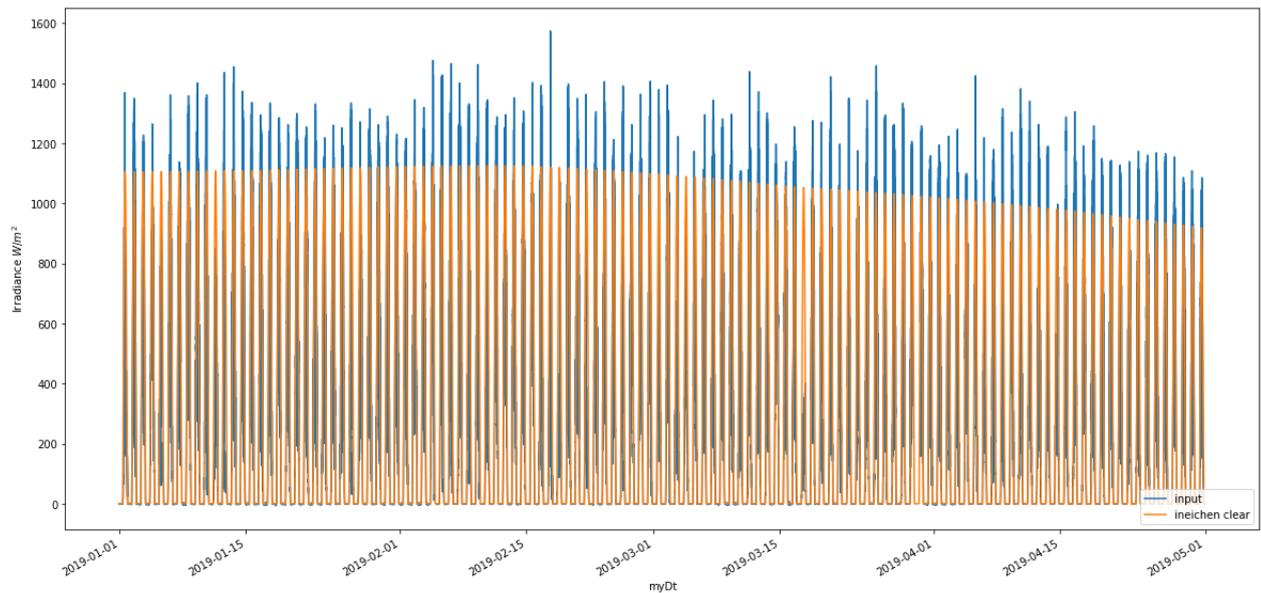
Tabela 2 - Identificação do Fenômeno (CE) em cada mês - Modelo de Solis

2018	Nº de CE
Janeiro	274
Fevereiro	3094
Março	66

Abril	1026
Maio	2674
Junho	NaN
Julho	599
Agosto	1294
Setembro	564
Outubro	1344
Novembro	2468
Dezembro	4154

Autor- Gyovana Ernani

Figura 8 - Modelo de Ineichen(2019)



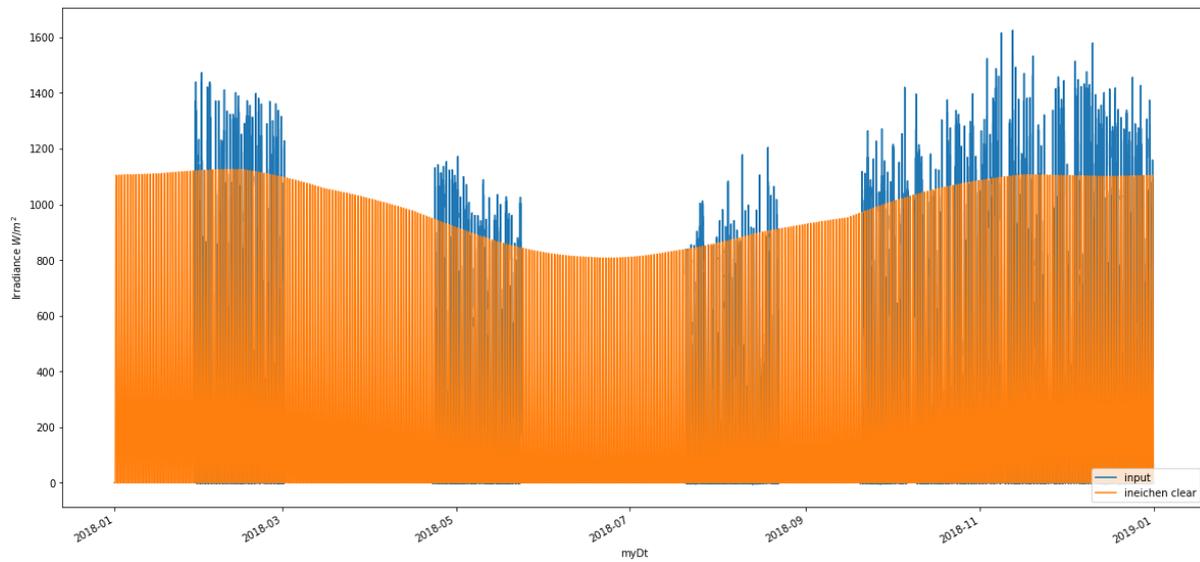
Autor- Gyovana Ernani

Tabela 3 - Identificação do Fenômeno em Cada Mês (2019) através do Modelo de Ineichen.

2019	N° CE
Janeiro	4123
Fevereiro	2674
Março	3019
Abril	3717

Autor- Gyovana Ernani

Figura 9 - Modelo de Ineichen (2018)



Autor- Gyovana Ernani

Tabela 4 - Identificação do Fenômeno (CE) em cada mês - Modelo de Ineichen

2018	Nº de CE
Janeiro	428
Fevereiro	5273
Março	157
Abril	1861
Maio	6466
Junho	-
Julho	4230
Agosto	6018
Setembro	4598
Outubro	4129
Novembro	4133
Dezembro	7794

Autor- Gyovana Ernani

4.2 ESTAÇÃO DE PETROLINA

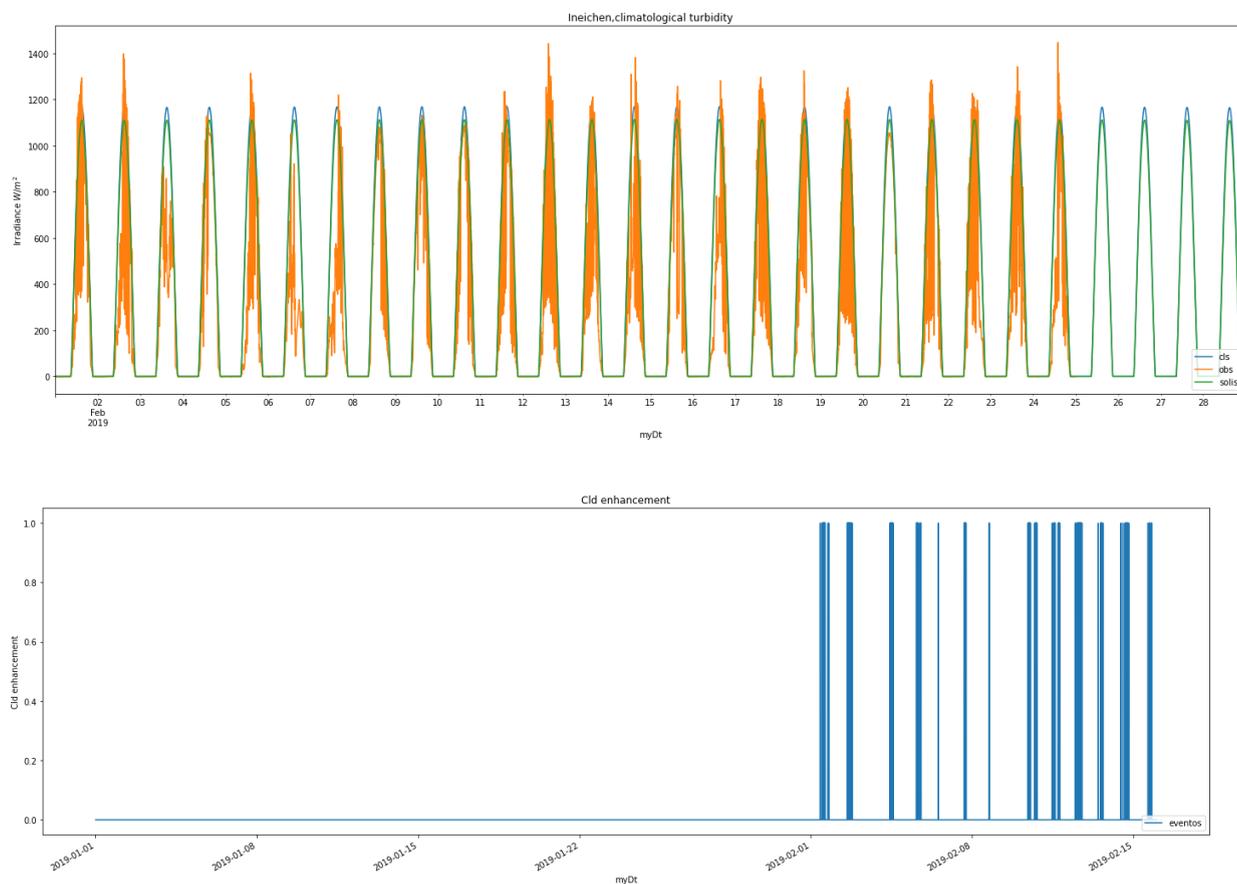
Na Fig. 10 pode-se observar ao longo dos mês de fevereiro de 2019 como ocorre a distribuição do CE e seus horários de maior incidência. Neste ano de 2019 para essa determinada localidade os dados fornecidos pela rede SONDA são dos meses de janeiro e fevereiro. Ao plotar um gráfico do mês de janeiro para compreender como a irradiância global estava distribuída, foi possível notar que não havia dados suficientes, por isso foi analisado o mês de fevereiro.

Ainda comentando sobre a figura 10 é demonstrado pela ocorrência da linha laranja ultrapassando a linha verde que corresponde aos valores estimados pelo modelo SOLIS para a condição de céu sem nuvens. Na imagem que apresenta linhas de coloração azul é possível observar a frequência dos fenômenos de CE.

Uma breve comparação entre as figuras 10 e 11 dos anos de 2018 e 2019 com relação a frequência de ocorrência do fenômeno CE, é possível notar que houve uma maior ocorrência de eventos no início do ano. No ano de 2019, no mês de fevereiro e no ano de 2018 entre os meses de janeiro a março, isso pode estar relacionado com a estação do ano e também onde está localizada a estação de Petrolina. O município de Petrolina localiza-se no semi-árido do nordeste brasileiro. Caracteriza-se pela escassez e irregularidade pluviométrica, com chuvas e forte evaporação em consequência das altas temperaturas no verão

As tabelas mencionadas abaixo dos gráficos têm como objetivo mostrar a frequência de CE ao longo do período do mês utilizando o modelo de Ineichen e o Modelo de Solis. No ano de 2019 só temos dois meses de coleta e dado a falta de dados no mês de janeiro não é possível fazer uma análise sobre a quantidade de vezes que ocorreu o CE. Os dados de 2018, estão relacionados com os quatro primeiros meses do ano obtidos através da rede SONDA e em cima disso é possível observar que no mês de fevereiro foi quando houve a maior incidência de CE semelhante ao que ocorreu em 2019.

Figura 10 : Modelo de Solis - Comparação de Quantidade de Fenômeno de CE (2019)



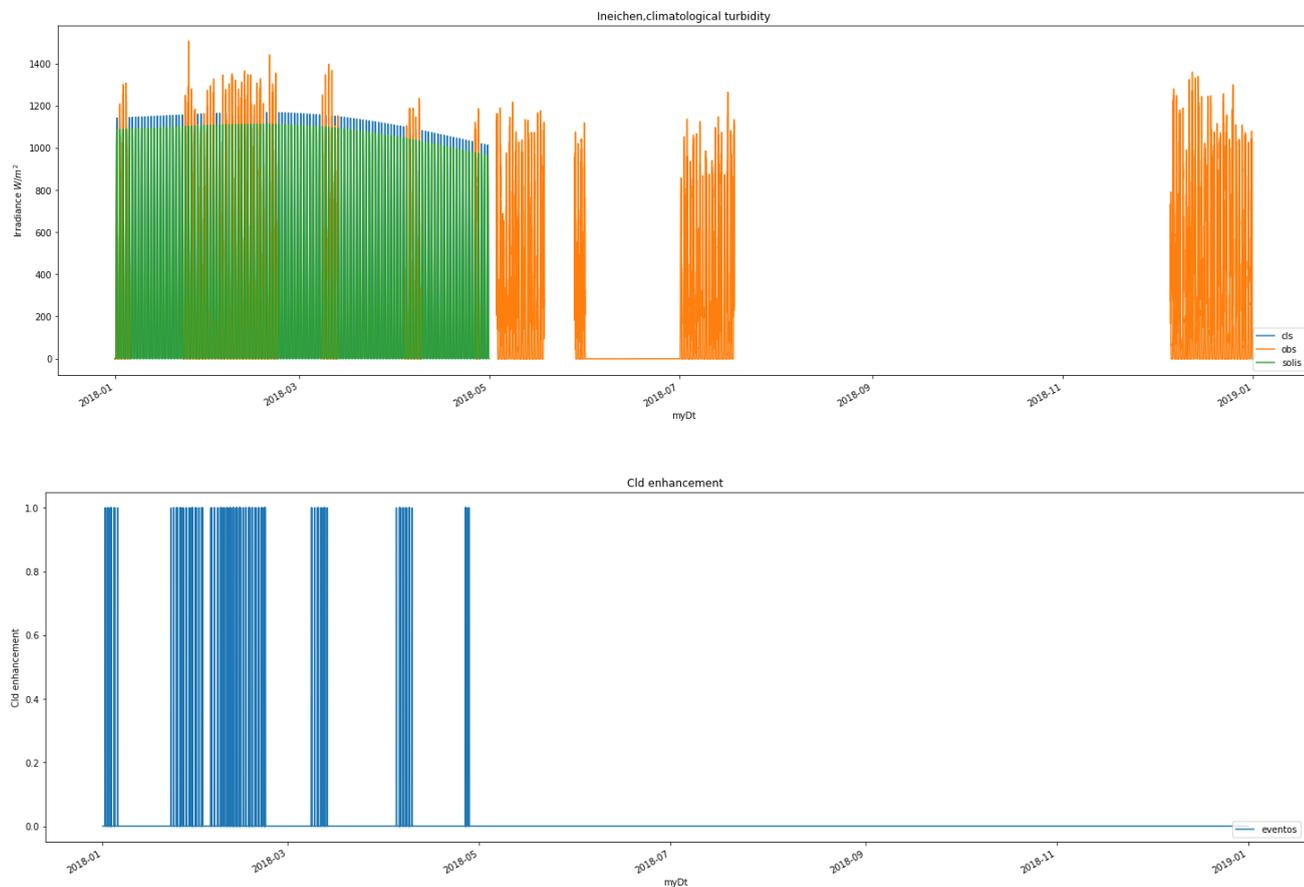
Autor- Gyovana Ernani

Tabela 5 - Identificação do Fenômeno em Cada Mês (2019) através do Modelo de Solis.

2019	Nº de CE
Janeiro	NaN
Fevereiro	1194

Autor- Gyovana Ernani

Figura 11 : Modelo de Solis - Comparação de Quantidade de Fenômeno de CE (2018)



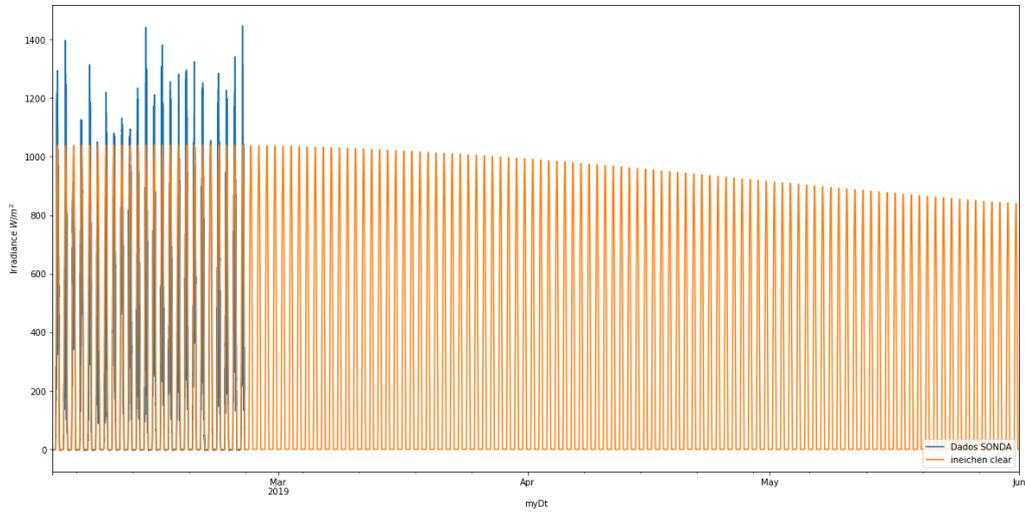
Autor- Gyovana Ernani

Tabela 6 - Identificação do Fenômeno em Cada Mês (2018) através do Modelo de Solis.

2018	N° de CE
Janeiro	945
Fevereiro	1663
Março	294
Abril	475

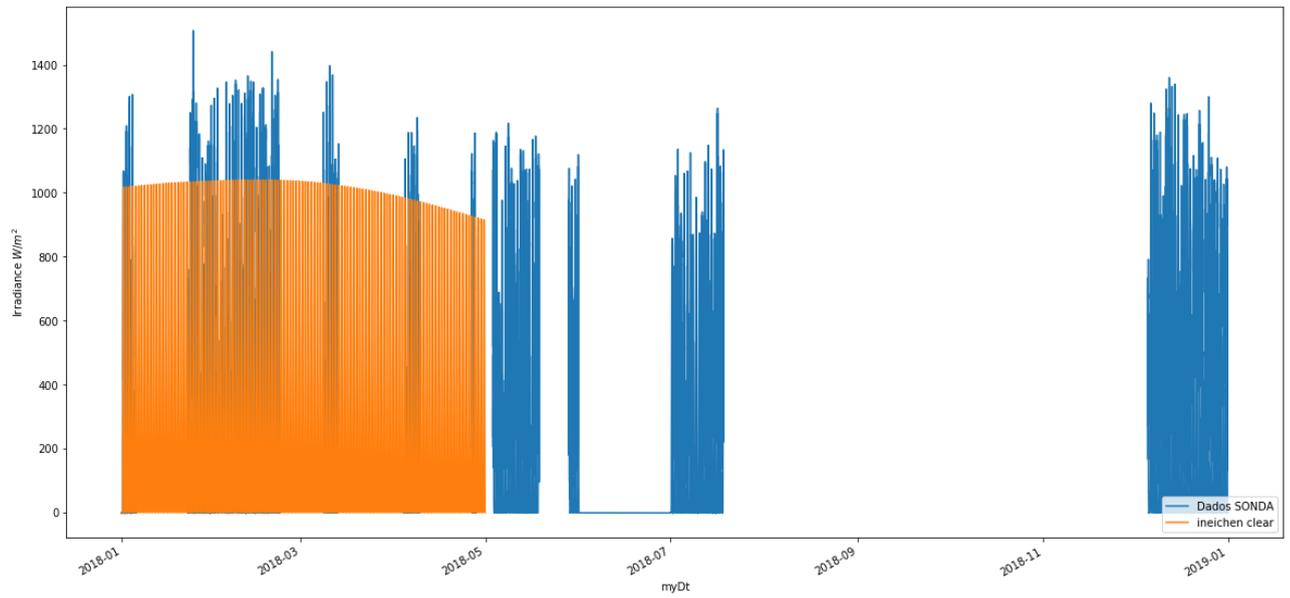
Autor- Gyovana Ernani

Figura 12 - Região de Petrolina (2019) - Modelo de Ineichen



Autor- Gyovana Ernani

Figura 13 - Modelo de Ineichen(2018)



Autor- Gyovana Ernani

Tabela 7 - Identificação do Fenômeno em Cada Mês (2018) através do Modelo de Ineichen.

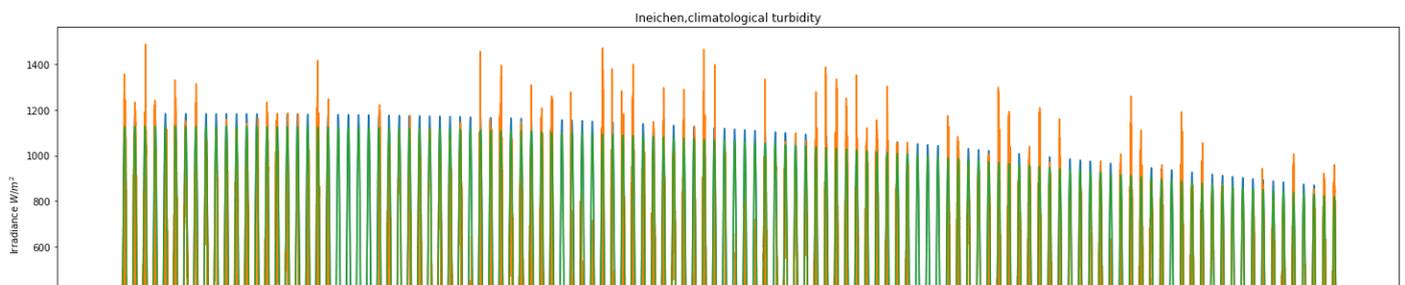
2018	Nº de CE
Janeiro	4400
Fevereiro	5660
Março	1251
Abril	1771

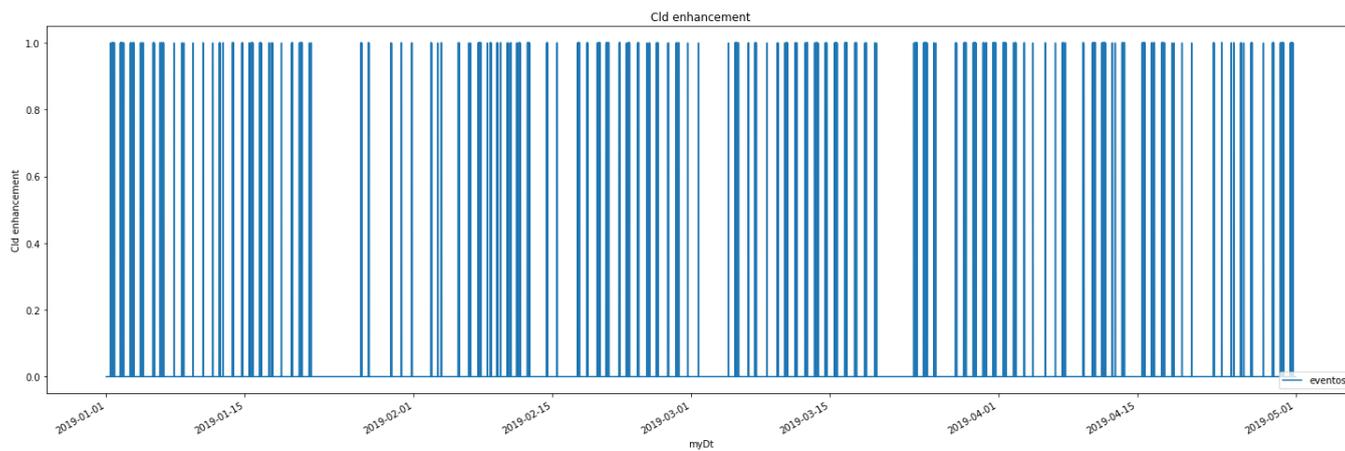
Autor- Gyovana Ernani

4.3 ESTAÇÃO DE CACHOEIRA PAULISTA

É demonstrado na figura 14 a ocorrência da linha laranja ultrapassando a linha verde que corresponde aos valores estimados pelo modelo SOLIS para a condição de céu sem nuvens. Na imagem que apresenta linhas de coloração azul é possível observar a frequência dos fenômenos de CE durante o período de 12 meses e a distribuição do evento é homogênea. As tabelas numeradas de 8, 9 , 10 e 11 mostram o número de vezes que ocorreu o CE e comparando os modelos utilizados. Na tabela 8 onde é analisado o modelo de Solis em 2019, o mês que apresentou maior número de ocorrências foi o de Abril, com um valor de 1609. No mesmo ano, só que agora analisando para o modelo de Ineichen, o mês que maior apresentou ocorrências foi Janeiro, aproximadamente 9520. É É notável uma diferença de valores, dado que modelo de Ineichen considera fenômeno de CE para cada vez que ele ultrapassa o valor de céu claro estimado (linha laranja) enquanto o modelo de Solis ele considera por quantidade de duração do evento de CE.(linha verde)

Figura 14 : Modelo de Solis - Comparação de Quantidade de Fenômeno de CE(2019)





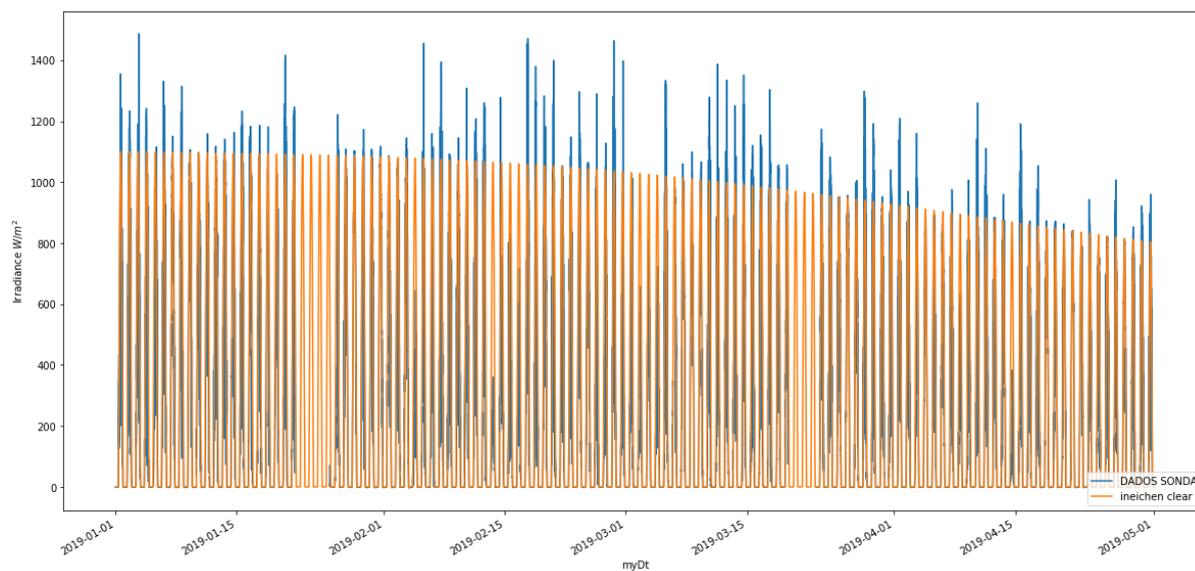
Autor- Gyovana Ernani

Tabela 8 - Identificação do Fenômeno em Cada Mês através do Modelo de Solis.

2019	Nº de CE
Janeiro	1315
Fevereiro	1208
Março	1269
Abril	1609

Autor- Gyovana Ernani

Figura 15 - Modelo de Ineichen (2019)



Autor- Gyovana Ernani

Tabela 9 - Identificação do Fenômeno em Cada Mês (2019) através do Modelo de Ineichen.

2019	Nº de CE
Janeiro	9520
Fevereiro	6360
Março	7258
Abril	9329

Autor- Gyovana Ernani

Figura 16 : Modelo de Solis - Comparação de Quantidade de Fenômeno de CE (2018)



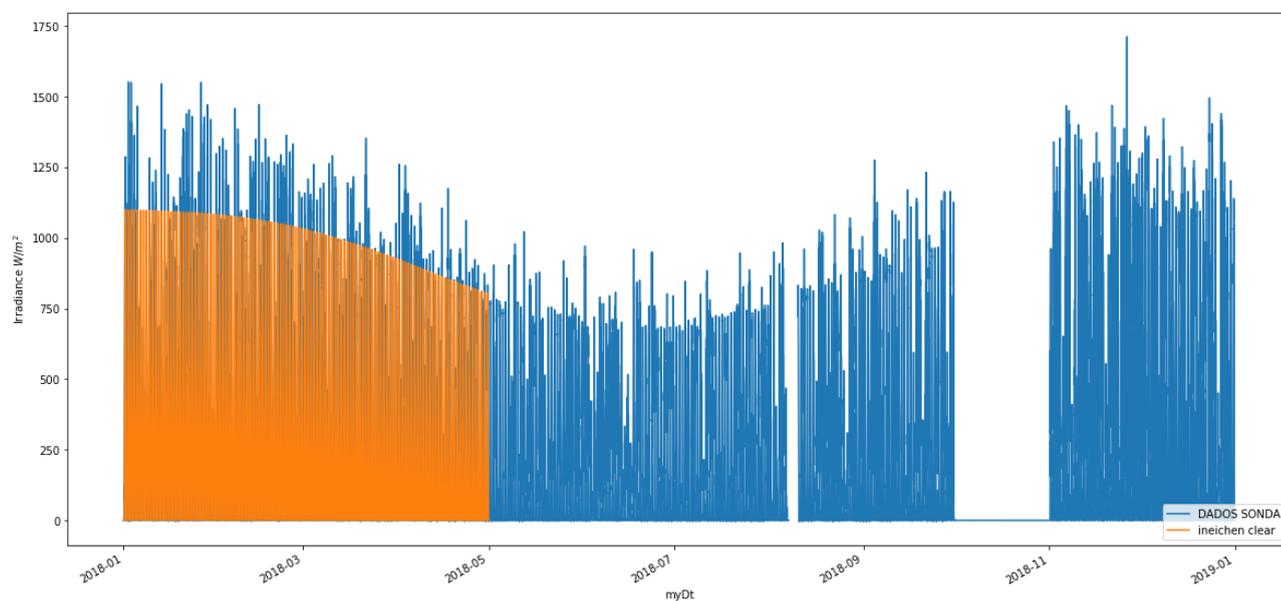
Autor- Gyovana Ernani

Tabela 10 - Identificação do Fenômeno (CE) em cada mês - Modelo de Solis (2018)

2018	Nº de CE
Janeiro	1804
Fevereiro	1508
Março	1459
Abril	1497

Autor- Gyovana Ernani

Figura 17 - Modelo de Ineichen (2018)



Autor- Gyovana Ernani

Tabela 11 - Identificação do Fenômeno (CE) em cada mês - Modelo de Ineichen (2018)

2018	Nº de CE
Janeiro	6243
Fevereiro	6075
Março	8850
Abril	8913

Autor- Gyovana Ernani

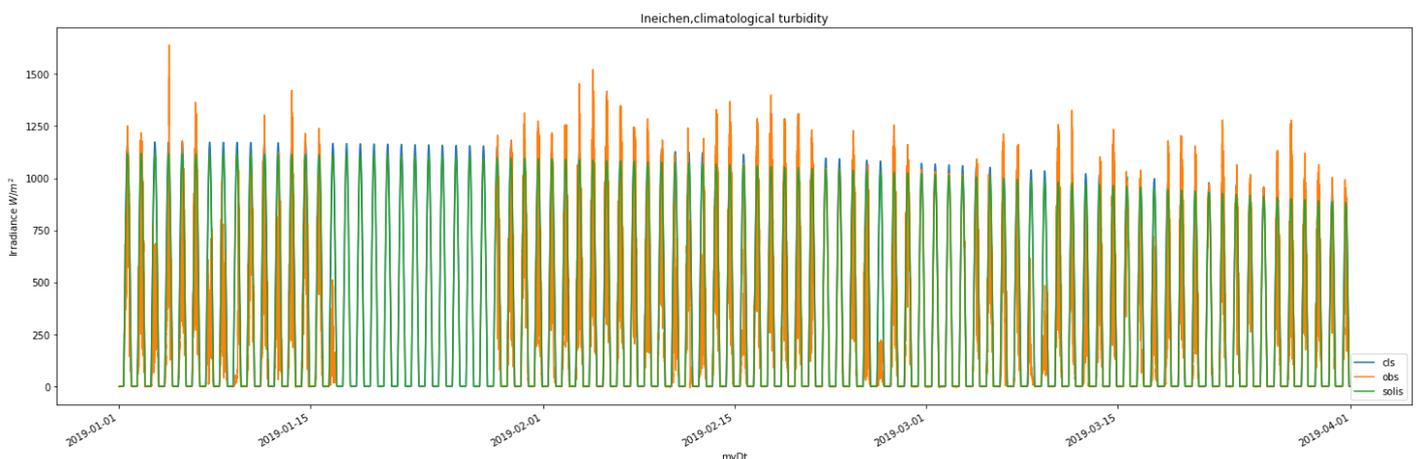
4.4 ESTAÇÃO SÃO MARTINHO DA SERRA

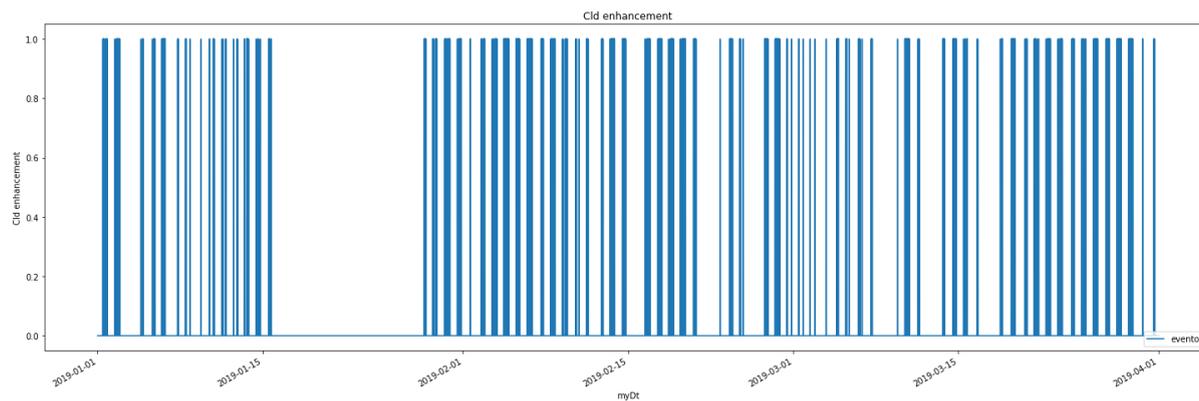
A estação de São Martinho da Serra, foi a que menos dados coletou. No ano de 2019 os dados fornecidos foram até o mês de abril, enquanto no ano de 2018 foi obtido dado no mês de dezembro. Com isso fica inclusivo compreender os fenômenos de CE nesta localidade devido a falta de dados.

Como mostrado na figura 18, demonstrado pela ocorrência da linha laranja ultrapassando a linha verde que corresponde aos valores estimados pelo modelo SOLIS para a condição de céu sem nuvens. Na imagem abaixo, que por sua vez apresenta linhas de coloração azul é possível observar a frequência dos fenômenos de CE.

As tabelas 12 e 13 mostram o número de vezes que ocorreu o CE e também é comparado os modelos utilizados. No ano de 2019, o mês com maior ocorrência foi o de março, que apresentou um valor próximo a 3197 utilizando o modelo de Solis, enquanto utilizando o modelo de Ineichen foi observado um valor de 13071. É notável uma diferença de valores, dado que modelo de Ineichen considera fenômeno de CE para cada vez que ele ultrapassa o valor de céu claro estimado (linha laranja) enquanto o modelo de Solis ele considera por quantidade de duração do evento de CE.(linha verde)

Figura 18 : Modelo de Solis - Comparação de Quantidade de Fenômeno de CE (2019)





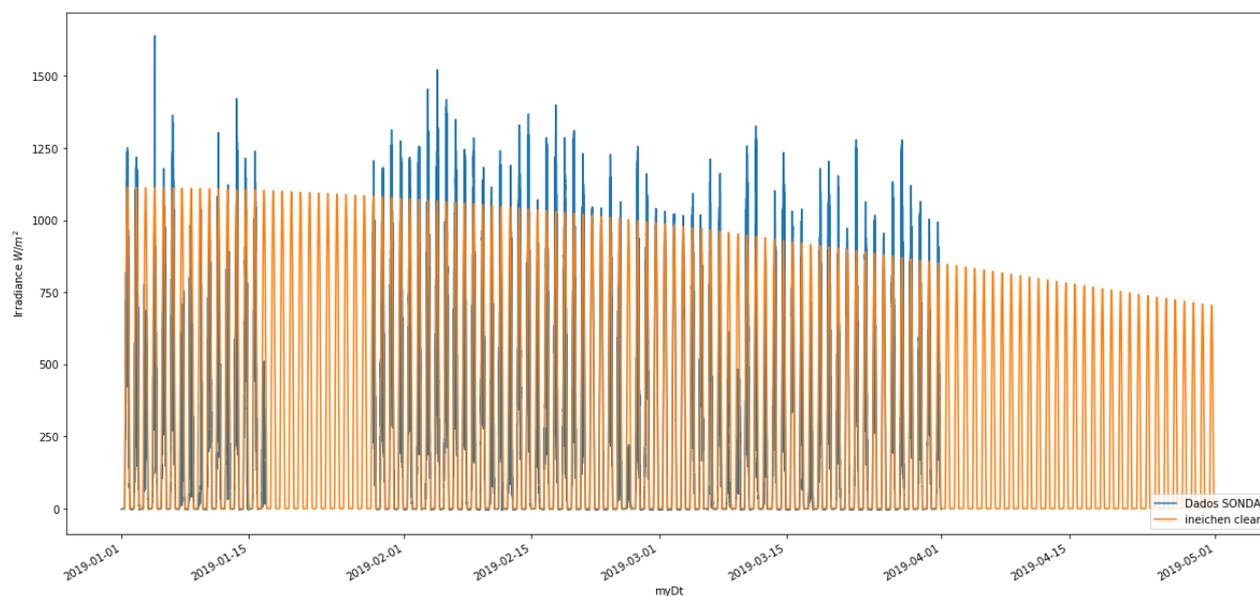
Autor- Gyovana Ernani

Tabela 12 - Identificação do Fenômeno (CE) em cada mês - Modelo de Solis

2019	Nº de CE
Janeiro	1029
Fevereiro	3077
Março	3197
Abril	NaN

Autor- Gyovana Ernani

Figura 19 - Modelo de Ineichen (2019)



Autor- Gyovana Ernani

Tabela 13 - Identificação do Fenômeno (CE) em cada mês - Modelo de Ineichen

2019	Nº de CE
Janeiro	3513
Fevereiro	12250
Março	13071
Abril	NaN

Autor- Gyovana Ernan

5. CONCLUSÃO

O aproveitamento do recurso de energia solar se apresenta como uma opção para a complementação de fontes convencionais de energias já consolidadas no mercado. O aquecimento solar, a geração de eletricidade, a climatização de ambientes exemplificam os processos e tecnologias produzidos pelo desenvolvimento científico e tecnológico. Um avanço significativo foi conseguido nas últimas décadas tanto no aproveitamento térmico para atendimento de demandas residenciais ou processos industriais, quanto para conversão em eletricidade. O aproveitamento fotovoltaico, conhecido como geração fotovoltaica de eletricidade, também apresentou um intenso desenvolvimento que está resultando em um crescimento significativo da participação da energia solar na matriz energética mundial. (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017)

O estudo sobre o CE é de suma importância pois pode ser aplicado em inúmeras áreas, como por exemplo na geração de energia elétrica utilizando painéis fotovoltaicos e também no âmbito acadêmico propicia um auxílio na caracterização da radiação solar em uma determinada localidade promovendo um estudo solarimétrico mais aprofundado. A análise dos dias que tiveram a presença do CE foi feita através dos modelos de Solis e Ineichen em razão da análise das irradiâncias globais medidas na superfície e das fornecidas por cada modelo.

Feito a análise em estações meteorológicas distintas é possível concluir que o efeito de CE não ocorre da mesma forma nas estações escolhidas, uma vez que pode depender da sazonalidade da região. Outro aspecto a ser observado foi a indisponibilidade de dados para o período de estudo em algumas estações, o que deixou alguns resultados inconclusivos. Com relação aos resultados obtidos é notável que o evento ocorre com mais frequência entre os meses de Janeiro a Abril e depois em Dezembro, meses associados com maior ocorrência de precipitação em todas as localidades de estudo.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Ricardo Cesar. Estudo do efeito lente produzido por nuvens na irradiação solar global medido no Nordeste do Brasil. Dissertação de Mestrado. Recife. Junho, 2016.

Armando Castillejo-Cuberos, Rodrigo Escobar. Detection and characterization of cloud enhancement events for solar irradiance using a model-independent, statistically-driven approach. *Solar Energy*. Volume 209. 2020. Pages 547-567. ISSN 0038-092X. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.046>.

Bird, R. E., & Hulstrom, R. L. Simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. United States. <https://doi.org/10.2172/6510849>

DAI, Qiumin, FANG, Xiande. A simple model to predict solar radiation under clear sky conditions. *Advances in Space Research*, Volume 53, Issue 8, 2014. Pages 1239-1245. ISSN 0273-1177. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.01.025>.

GALDINO, Janis Joplim Bezerra et al. ESTUDO DA RADIAÇÃO SOLAR DA CIDADE DE PETROLINA ATRAVÉS DE UM MODELO EMPÍRICO DE CÉU CLARO. *Revista Brasileira de Energia Solar* Ano 7 Volume VII Número 2 Dezembro de 2016 p.98-105

INEICHEN, Pierre, PEREZ, Richard. A new air mass independent formulation for the Linke turbidity coefficient. *Solar Energy*, Volume 73, Issue 3, 2002, Pages 151-157. ISSN 0038-092X. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(02\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00045-2).

INEICHEN, Pierre. A broadband simplified version of the Solis clear sky model. *Solar Energy*. Volume 82. Issue 8, 2008, Pages 758-762, ISSN 0038-092X. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.009>.

INEICHEN, Pierre. Validation of models that estimate the clear sky global and beam solar irradiance. *Solar Energy*. Volume 132. 2016. Pages 332-344. ISSN 0038-092X. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.017>.

IQBAL, M. An Introduction in Solar Radiation. Ontario: ACADEMIC PRESS CANADA, 1983.

Lappalainen, K., & Kleissl, J. (2020). Analysis of the cloud enhancement phenomenon and its effects on photovoltaic generators based on cloud speed sensor measurements. *JOURNAL OF RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY*, 12(4), 043502-043502. Report #: ARTN 043502. <http://dx.doi.org/10.1063/5.0007550> Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/2x93f1fs>

PEREIRA, E. B.; BANDA, F. Z.; MARTINS, F. R., ABREU L. S.; NETTO, S. L. M. Short Training Course in SOLAR Radiation Assessment for **SWERA**. Recife – Brazil, 25 de maio de 2002.

PEREIRA, E. B et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2a. Ed. São José dos Campos, SP: INPE, 2017.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPTEL, 2014.

POLO J., Martín-Pomares, L. Sanfilippo, A. Solar Resources Mapping Fundamentals and Applications. Switzerland: Springer Nature, 2019/

R.W. Mueller, K.F. Dagestad, P. Ineichen, M. Schroedter-Homscheidt, S. Cros, D. Dumortier, R. Kuhlemann, J.A. Olseth, G. Piernavieja, C. Reise, L. Wald, D. Heinemann, Rethinking satellite-based solar irradiance modelling: The SOLIS clear-sky module. *Remote Sensing of Environment*. Volume 91, Issue 2, 2004, Pages 160-174. ISSN 0034-4257. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.009>.

Markku Järvelä, Kari Lappalainen, Seppo Valkealahti. Characteristics of the cloud enhancement phenomenon and PV power plants. *Solar Energy*. Volume 196. 2020. Pages 137-145. ISSN 0038-092X. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.090>.