



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 Dr. Fernando
Ramos Martins.

Santos, SP

2021



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”.**

Giovana Ernani da Silva

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

Santos, SP

2021

RESUMO

Os fenômenos de interação da radiação solar com as nuvens podem acarretar incidência de radiação solar acima das condições normais de céu claro. Em geral, o fenômeno da sobreirradiância – em inglês, *cloud enhancement* – ocorre em dias de céu parcialmente nublados com duração muito curta temporalmente, variando entre segundos a poucos minutos. 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 à 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. A base de dados utilizadas estão disponíveis no Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais, rede SONDA, com as estações de coleta de dados distribuídas espacialmente no território brasileiro com o intuito de prover uma base de dados observados representativa dos diversos regimes climáticos observados no país. O estudo abrange as estações em Brasília, Petrolina, Cachoeira Paulista e São Martinho da Serra e até o presente momento envolveu o 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, além da comparação com valores estimados para a irradiação solar incidente na superfície em condições de céu claro. Estes valores são fornecidos por modelos numéricos estabelecidos na literatura científica, como os modelos de Iqbal e Dumortier. Neste momento, a implementação dos modelos de céu claro está em desenvolvimento. A próxima etapa é identificar a ocorrência do fenômeno nas séries temporais de dados observados e identificar padrões de frequência e intensidade de ocorrência.

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

SUMÁRIO

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Objetivo Geral..... | 2 |
| 1.2 Objetivo Específico | 2 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 3 |
| 3 METODOLOGIA | 7 |
| 4 ATIVIDADES REALIZADAS | 8 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 10 |
| 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 modo recente estudos têm sido feito a respeito da energia proveniente do Sol, também conhecido como 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 deve ser alcançado com uso de modelos de transferência radiativa validados com dados observacionais.

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade, conhecido como Efeito Fotovoltaico, sendo a célula fotovoltaica um dispositivo que apresenta em sua composição um material semicondutor. O semicondutor é uma unidade fundamental no processo de conversão. A potência de saída de um gerador fotovoltaico depende principalmente da irradiância para os painéis fotovoltaicos.

A operação dos geradores fotovoltaicos depende da incidência de irradiação nas células fotovoltaicas. As características operacionais das células fotovoltaicas estão 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 radiação solar é variável, as características elétricas nominais dos módulos fotovoltaicos são definidas sob as condições de teste padrão, ou seja, a uma irradiação de 1000 W/m^2 e uma temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. No entanto, na prática identificar essa condição não é uma tarefa simples. Em dias parcialmente nublados, a irradiação pode exceder consideravelmente a irradiação do céu claro esperado devido a um fenômeno chamado de *cloud enhancement* (CE) ou também conhecido como sobrerirradiância.

O fenômeno de *cloud enhancement* ocorre devido ao espalhamento Mie diante da nuvem. Os eventos de CE são mais intensos quando uma lacuna estreita é cercada por

nuvens finas. O fenômeno pode ocorrer diante de três situações distintas, como i) aumento da irradiância por nuvens próximas ao disco solar; ii) sob a nuvem homogênea onde a irradiância horizontal difusa possa ser grande antes e depois do evento de CE, de modo que as bordas das nuvens não contribuam para o aumento da irradiância e 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.

Como os eventos de CE estão relacionados às nuvens, as velocidades e direções de movimento das áreas CE podem ser estimadas analisando as velocidades das sombras das nuvens e as direções do movimento. Quando as direções de movimento e velocidades das sombras das nuvens são consistentes o suficiente, as áreas de CE estão se movimentando na mesma direção e com a mesma velocidade e com formas relativamente estáveis. Porém não é sempre que é possível utilizar as velocidades e direções das sombras das nuvens para estimar estas características. Diante das informações apresentadas anteriormente, se pode presumir que as áreas de CE apresentem formas, velocidades e direções de movimento consistente o tempo todo.

A pesquisa foi iniciada pela aluna Jacqueline dos Reis Silva, posteriormente substituída em novembro de 2020. O trabalho de pesquisa teve início no mês seguinte e se pautou na execução do cronograma proposto.

1.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa 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.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estes fenômenos de interação da radiação solar com as nuvens podem acarretar incidência de radiação solar acima dos valores típicos em condição de céu claro (sem nebulosidade) ou superiores a irradiância solar incidente no topo da atmosfera. A ocorrência destes fenômenos extremos tem impacto na geração fotovoltaica uma vez que

os sistemas em geral são dimensionados para atuar com irradiação máxima na ordem do valor correspondente à condição de céu claro.

O superaquecimento dos módulos fotovoltaicos e danos nos inversores podem acontecer em consequência da exposição frequente à eventos de *cloud enhancement* e, portanto, é importante avaliar a ocorrência destes eventos através de análises estatísticas que indiquem não somente a sua incidência, mas também analisar se há alguma tendência de intensificação dos mesmos. O estudo pretende averiguar se há algum padrão de ocorrência do fenômeno associado com a climatologia local e estabelecer os diferentes padrões de ocorrência para o território brasileiro.

Diante dos diferentes regimes climáticos observados no território brasileiro, também se pretende padrões de sazonalidade dos eventos com base em dados históricos da rede SONDA. Assim, é necessário considerar aspectos sazonais e regionais, o que traz a relevância de serem consideradas estações da rede SONDA pelo país, com longas séries de dados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A primeira das atividades realizadas no escopo desta atividade de Iniciação Científica tratou da revisão de literatura científica relativa a temas relacionados aos fenômenos de *cloud enhancement* para o embasamento das análises futuras.

I. **Comparison of eight clear sky broadband models Against 16 independent data banks.**

No estudo feito por Ineichen (2006), é mostrada uma seleção de oito modelos de irradiância solar em céu claro sendo eles, o Modelo de Solis, Bird e Hulstrom, Molineaux, Esra, Ineichen, CPC2, REST2 e Kasten. Os modelos apresentam um alto desempenho e é feita uma avaliação em relação a um conjunto de 16 bancos de dados independentes cobrindo um intervalo de tempo de 20 anos. Os parâmetros utilizados foi a altitude que variou desde o nível do mar até 1600m e a variabilidade de climas.

As medidas de solo foram realizadas através de dados de 16 estações terrestres de alta qualidade e foram coletadas para validar os modelos. As estações cobrem latitudes de 28° N a 45° N. Há uma exceção para uma estação, a de Lisboa, no qual a irradiância do feixe é recuperada de medições difusas, a irradiância do feixe normal está disponível para todas as outras estações.

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 do modelo de 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.

No artigo é abordado como é feita a recuperação de parâmetros de entrada, que no caso são levados em conta o ozônio, vapor d'água, turbidez. O conteúdo de ozônio da atmosfera pode ser recuperado por sensoriamento remoto através de satélites, medições de fotômetro terrestres ou bando de dados climatológicos. Com relação ao vapor d'água pode ser recuperado a partir de medições de solo, da temperatura ambiente e da umidade relativa. Por fim temos a turbidez, que por sua vez tem uma maior influência na

transmitância atmosférica, mas é o fator mais complicado de ser recuperado. Interessante ressaltar que a turbidez apresenta parâmetros de entrada para os modelos que no caso são a turbidez Linke e a profundidade óptica do aerossol.

As conclusões apresentadas no presente estudo foi 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 de modelo produzir a radiação espectral. A comparação com as medidas foi realizada em uma base dinâmica para avaliar sua capacidade de acompanhar a forma diurna da radiação incidente e em bancos de dados anuais para cobrir todas as estações.

II. Characteristics of the cloud enhancement phenomenon and PV power plants.

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 o fenômeno de *cloud enhancement (CE)*. Embora o fenômeno de CE seja bastante conhecido, o seu efeito nos sistemas fotovoltaicos são poucos estudados. O objetivo do estudo é entender como o fenômeno de CE afeta nos painéis 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 / m². 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 próximas, 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 conclusões apresentam as características dos eventos CE 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. Também criamos 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 esperado.

III. Extreme total solar irradiance due to cloud enhancement at sea level of the NE Atlantic coast of Brazil.

Neste trabalho, Piacentini et al (2011) apresentam as medidas no plano horizontal muito altas e extremas da irradiância solar global, que em alguns dias ultrapassou a Constante Solar corrigida pela distância real Sol-Terra. A irradiância solar total extraterrestre, normalmente chamada de Constante Solar, é atenuada pela atmosfera em diferentes proporções, dependendo principalmente do ângulo do zênite solar e da altitude do ponto de medição.

Foram obtidos ao 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 (UT - 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.

IV. Extreme global solar irradiance due to cloud enhancement in northeastern Brazil.

O artigo trata de uma análise detalhada de medições terrestres de irradiância 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.

Constatou-se 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 acima da irradiância solar extraterrestre;
- v) foi detectada forte assimetria no perfil de ocorrência entre a manhã e à tarde.

Por fim, 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. A 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.

V. Analysis of the cloud enhancement phenomenon and its effects on photovoltaic generators based on cloud speed sensor measurements.

O incidente de irradiância em geradores fotovoltaicos pode exceder consideravelmente a irradiância de céu claro esperada. Devido a este fenômeno, chamado de fenômeno de cloud enhancement (CE), 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 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 $1466 \text{ W} / \text{m}^2$. Além disso, as maiores irradiâncias médias simuladas para geradores de até 1 MW foram acima de $1400 \text{ W} / \text{m}^2$. Os maiores comprimentos para eventos CE excedendo $1000 \text{ W} / \text{m}^2$ foram 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 aumentar 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. Embora a CE afete a operação das usinas fotovoltaicas, esses 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 que significa que a CE não causa grandes problemas para a operação dos sistemas fotovoltaicos.

VI. Modelos de Céu Claro

Levando em conta a energia solar total, integrada em todo o espectro de frequências, o método paramétrico permite calcular a energia radiantes usando os parâmetros atmosféricos. Dentre os vários modelos paramétricos para o presente estudo cabe destacar o Modelo Iqbal e Dumortier.

O modelo Iqbal é baseado nos estudos de Bird&Hulstrom em que as equações de transmitância dos componentes atmosféricos foram desenvolvidas após uma comparação detalhada de diversos modelos de insolação direta. Os dados de entrada utilizado neste modelo são:

- a. Latitude e Longitude;
- b. Dia do Ano
- c. Horário (em minutos);
- d. Pressão atmosférica, que será utilizada para cálculo da massa óptica de ar e comprimento óptico relativo ao ozônio;
- e. Temperatura do ar;
- f. Umidade relativa do ar;
- g. Visibilidade horizontal, referente ao cálculo da transmitância do aerossol;
- h. Grandezas adimensionais como por exemplo o albedo de superfície e dispersão simples.

Com esses dados de entrada é feito o cálculo das transmitâncias devidas ao ozônio, à mistura de outros gases, ao vapor d'água e aos aerossóis. Dessa forma, a irradiância horizontal global sob céu sem nuvens é calculada como a soma de seus componentes diretos e difusos.

O modelo Dumortier está relacionado com o *Linke turbidity fator* (fator de turbidez total). O fator de turbidez total se resume a turbidez da atmosfera e, portanto, a atenuação da radiação solar direta do feixe. É definido com base no tempo e espaço somente não havendo a necessidade da presença das variáveis ambientais. Este fator é uma aproximação para modelar a absorção atmosférica e a dispersão da radiação solar de céu claro. Por sua vez, descreve a espessura óptica da atmosfera devido à absorção pelo vapor d'água e a absorção e dispersão pelas partículas do aerossol em relação a uma

atmosfera limpa e seca. O cálculo da turbidez atmosférica é feito a partir de um valor médio à superfície do mar com correções em quatro estágios sucessivos: correção por altura, umidade, aerossóis e elevação do sol.

Este modelo desenvolvido por Dumortier descreve as variações de turbidez. A componente direta depende da massa óptica relativa do ar e da profundidade óptica em uma atmosfera Rayleigh, contendo apenas moléculas de ar seco. Dumortier também descreve que o fator de turbidez total denota a transparência da atmosfera sem nuvens e quanto maior for este fator maior será a atenuação da radiação pela atmosfera de céu claro.

3 METODOLOGIA

As fases seguintes deste estudo serão realizadas com a 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 como os modelos de Iqbal e Dumortier.

Os dados observados nas estações da rede SONDA serão utilizados neste estudo. As estações da rede SONDA 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.

As estações da rede SONDA possuem sensores para todas 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 análise pretende identificar a frequência de ocorrência dos eventos em cada uma das estações de referência da rede SONDA e em estações localizadas em regiões específicas de interesse sob o ponto de vista de energia solar como Campo Grande e Palmas (centro-oeste do Brasil).

A realização destes estudos levará em consideração o ajuste de distribuição de frequência de para eventos extremos (GPD, por exemplo). A verificação de sazonalidade e o estudo de extremos serão realizados utilizando pacotes disponíveis em linguagem Python.

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, pretende verificar se há alguma tendência de crescimento (ou decréscimo) da frequência de ocorrência do fenômeno nas diversas regiões do Brasil. Pacotes para aplicação do teste de Mann-Kendall e a metodologia de Sen para investigar a tendência temporal.

4 ATIVIDADES REALIZADAS

4.1 Revisão bibliográfica

Foi necessário realizar uma adaptação ao tema proposto dado que houve uma transição de alunos. Inicialmente foi lido o material utilizado pela estudante que deu início a bolsa. Após a leitura do material base houve um novo levantamento bibliográfico agora voltado para a nova adaptação do projeto, fazendo complementos com os artigos anteriormente lidos. Semanalmente havia uma reunião com orientadores para tirar possíveis dúvidas com relação a conceitos abordados nos artigos. Além dos artigos foi utilizado como material base o Atlas Brasileiro de Energia Solar para auxiliar no entendimento de conceitos mais gerais.

4.2 Capacitação 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.

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 disponível gratuitamente pelo site: <https://www.coursera.org/learn/ciencia-computacao-python-conceitos>. O curso abordou os tópicos: Introdução ao Python, Estruturas Condicionais, Repetição – While, Funções, Repetições Encaixadas, Listas e Matrizes. Após a conclusão do curso algumas videoaulas complementaram a capacitação para realização da manipulação de dados.

Os cursos foram realizados em paralelo com as atividades curriculares do Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia do Mar. O tempo dedicado ao curso foi de 20h/semanais.

4.3 Cumprimento do Cronograma

O cronograma proposto na proposta de iniciação científica aprovada indicava as seguintes etapas:

- 1) levantamento bibliográfico sobre a temática de eventos extremos de irradiação solar na superfície;
- 2) capacitação em lógica de programação e desenvolvimento de códigos em Python;
- 3) desenvolvimento de códigos para estimativa da irradiação no topo da atmosfera e na superfície em condição de céu claro
- 4) organização da base de dados coletados na rede SONDA envolvendo a qualificação dos dados e o armazenamento da base de dados;
- 5) desenvolvimento de códigos para análise estatística de dados e identificação e caracterização dos regimes sazonais e tendência da frequência de eventos extremos de irradiação solar incidente.
- 6) produção e apresentação de relatórios e trabalhos em eventos científicos na Universidade e no INPE.

Em virtude da substituição do bolsista durante a execução do projeto, houve a necessidade de um alinhamento com o conteúdo e etapas propostas. Deste modo, foram realizadas as atividades 1 e 2, sendo iniciada e em andamento a etapa 3.

5 CONCLUSÃO

Atualmente o setor de energia avalia uma transição energética, buscando soluções com baixa emissão de carbono. Avaliar e compreender temas relacionados com o melhor aproveitamento da energia solar é de suma importância dado que o setor de energia. O fenômeno de *cloud enhancement* possui implicações bastante relevantes no desempenho da tecnologia fotovoltaica, com efeitos que ainda não são totalmente compreendidos.

O presente projeto de iniciação científica tem essa temática e está em andamento, tendo algumas das suas etapas cumpridas. Visto isso, os próximos passos desta pesquisa serão continuar o desenvolvimento de códigos para a análise estatística de dados para a identificação da frequência de eventos de CE, a avaliação regional da sazonalidade dos eventos de CE e a análise de tendência da frequência dos mesmos. Ao longo do período do bolsa ocorrerão também apresentação de relatórios e trabalhos em eventos científicos na Universidade e no INPE.

REFERÊNCIAS

- ALLAN R. STARKE et al. Resolution of the cloud enhancement problem for one-minute diffuse radiation prediction. *Renewable Energy* 125 (2018) 472e484
- D. PIACENTINI,R et al. Extreme total solar irradiance due to cloud enhancement at sea level of the NE Atlantic coast of Brasil. *Renewable Energy* 36 (2011) 409e412
- 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.
- IQBAL, M. An Introduction in Solar Radiation. Ontario: ACADEMIC PRESS CANADA, 1983.
- INECHEIN,P.Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent databanks. Center of Energy, University of Geneva, Battelle Bât. A, 7 rte de Drize, CH-1227 Carouge, GE, Switzerland.
- J.M. RODRÍGUEZ GÓMEZ, F. CARLESSO, L. E. VIEIRA¹, L. DA SILVA. A irradiância solar: conceitos básicos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 40, nº 3, e3312 (2018).
- JÄRVELÄ.M, KARI LAPPALAINEN, SEPPO VALKEALAHTI(2020). Characteristics of the cloud enhancement phenomenon and PV power plants. Tampere University, Electrical Engineering, P.O. Box 692, FI-33101 Tampere, Finland.
- LAPPALAINEN.K, KLEISSL.J. Analysis of the cloud enhancement phenomenon and its effects on photovoltaic generators based on cloud speed sensor measurements *J. Renewable Sustainable Energy* **12**, 043502 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0007550>
- 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>
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL, 2014.

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

RICARDO CESAR DE ANDRADE, CHIGUERU TIBA. Extreme global solar irradiance due to cloud enhancement in northeastern Brazil. Renewable Energy 86 (2016) 1433e1441.