



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

MATHEUS GABRIEL DANTAS TEODOSIO

**COMPARAÇÕES E IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS EM MODELOS DE CÉU  
CLARO PARA CARACTERIZAR FENÔMENOS DE *CLOUD ENHANCEMENT*  
RELATÓRIO PARCIAL  
(PIBIC/INPE/CNPq)**

INPE  
Santos, SP  
2021



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**COMPARAÇÕES E IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS EM MODELOS DE CÉU  
CLARO PARA CARACTERIZAR FENÔMENOS DE *CLOUD ENHANCEMENT***

Relatório de Iniciação Científica do programa PIBIC,  
orientado pelo Dr. Enio Bueno Pereira; Dr. Francisco José  
Lopes de Lima (Coorientador) e Dr. Fernando Ramos  
Martins (Professor Adjunto).

Pesquisador Responsável: Matheus Gabriel Dantas Teodosio

INPE  
Santos, SP  
2021

## RESUMO

Devido às necessidades impostas pelos padrões da sociedade atual, como a percepção de problemas relacionados à emissão de gases do efeito estufa e a questões acerca do aquecimento global, discussões sobre o aproveitamento do potencial do recurso solar incidente na superfície terrestre são fundamentais tanto sob o ponto de vista da produtividade energética quanto como uma solução mitigadora. Contudo, ao passo que estudamos sua efetividade e aplicações nos deparamos com os fenômenos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre. Desse modo, ao adentrar na atmosfera, os raios solares interagem com cada componente presente, como moléculas de gás, partículas suspensas e as nuvens, em diferentes proporções dependendo dos processos de reflexão e absorção. Assim, as nuvens são capazes de produzirem um espalhamento responsável por atenuar a irradiância solar, podendo causar uma diminuição substancial na capacidade de geração fotovoltaica ou até mesmo intensificar a irradiação solar global, durante certo período de tempo, acima das condições de céu claro. Este projeto de pesquisa possui como objetivo geral o estudo e a melhoria dos modelos de céu claro para o tratamento e qualificação dos dados meteorológicos e espaciais da Rede SONDA, que são utilizados na quantificação dos recursos solar e eólico em âmbito nacional. A metodologia engloba a revisão dos algoritmos de modelos de céu claro, comparando e implementando melhorias nos principais modelos descritos na literatura, como Solis, Ineichen e Perez, de modo a aumentar a confiabilidade das análises e subsidiar a validação de modelos computacionais utilizados no levantamento destes recursos, bem como caracterizar os fenômenos de Cloud Enhancement (CEs), quando um padrão de nuvem aumenta a irradiância horizontal global no solo acima de níveis mais altos do que o esperado para o céu claro com condições sem nuvens. Para realização do estudo serão escolhidas as quatro principais regiões da base de dados, sendo elas Petrolina, Brasília, São Martinho da Serra e Cachoeira Paulista. A primeira etapa no desenvolvimento do projeto envolve o estudo e revisão da literatura técnico-científica sobre modelos de estimativa de irradiação solar com base na parametrização dos processos de transferência radiativa que ocorrem na atmosfera. A segunda etapa será a implementação do código dos modelos de céu claro para analisar e avaliar as características de CE usando dados reais.

Palavras-chave: Energia Solar; Rede SONDA; Cloud Enhancement.

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1** - Tabela para Sistematização de Material Bibliográfico

**11**

**Tabela 2** - Cronograma para elaboração da Pesquisa

**14**

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>CE's</b>	Cloud Enhancement
<b>INPE</b>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	7
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	9
<b>2.1 Objetivo Geral</b> .....	9
<b>2.2 Objetivos Específicos</b> .....	9
<b>3. MÉTODO</b> .....	10
<b>3.1 Instrumentos</b> .....	10
<b>3.2 Procedimento</b> .....	10
<b>4. REALIZAÇÕES DO PERÍODO</b> .....	11
<b>5 DESCRIÇÃO E AVALIAÇÃO DO APOIO INSTITUCIONAL RECEBIDO NO PERÍODO</b> .....	12
<b>6 PLANO DE ATIVIDADES PARA O PRÓXIMO PERÍODO</b> .....	13
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	14

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de energias renováveis, que são capazes de perdurarem por grandes prazos e que apresentam recursos ativos, é considerado a principal solução para amenizar impactos ambientais decorrentes do aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera e, em muitos casos, pode ser capaz de reduzir o impacto socioambiental, responsável pelas atividades humanas que levam a mudanças nas condições e/ou elementos constituintes do ambiente decorrentes da implantação de sistemas tradicionais, como grandes projetos para geração de energia hidrelétrica.

Quando abordamos sobre a energia solar é fundamental conhecer alguns conceitos básicos para compreender sua importância e enxergá-la como uma das opções energéticas mais favoráveis para aproveitamento e implementação em uma matriz energética vigente. O primeiro ponto, refere-se a ampla faixa do espectro eletromagnético, coberta pela energia irradiada pelo Sol, que contempla por volta de 81% da energia que atinge a atmosfera terrestre e abrange a luz visível de raios infravermelhos e de raios ultravioleta (PEREIRA et al., 2017).

A energia total incidente é caracterizada por apresentar uma variabilidade que se dá devido à fatores geográficos e astronômicos como a latitude local e a estação do ano, além da ocorrência de processos físicos e químicos na atmosfera. Os fatores astronômicos estão relacionados à inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano do movimento de translação ao redor do Sol, em órbita elíptica (ANEEL, 2002). Ademais, ainda existe o fato de considerarmos a distância relativa entre o Sol e a Terra, e quais suas implicações na chegada da radiação solar até a superfície terrestre.

Contudo, ao passo que estudamos sua efetividade e aplicações nos deparamos com os fenômenos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre. Desse modo, ao adentrar na atmosfera, os raios solares interagem com cada componente presente, como moléculas de gás, partículas suspensas e as nuvens, em diferentes proporções dependendo dos processos de reflexão e absorção. Assim, as nuvens são capazes de produzirem um espalhamento responsável por atenuar a irradiância solar, podendo causar uma diminuição substancial na capacidade de geração fotovoltaica ou até mesmo intensificar a irradiação solar global, durante certo período de tempo, acima das condições de céu claro (Inman et al., 2013).

Em circunstâncias especiais, a presença de nuvens pode levar a um aumento local na radiação solar difusa devido à dispersão direcional das nuvens. Tais condições resultam em níveis de radiação que excedem temporariamente os valores localizados de céu claro. Esses fenômenos são chamados de Eventos de Cloud Enhancement (CEs).

Uma componente fundamental para estudarmos os recursos solares é irradiação do céu claro. Em particular, a irradiação do céu claro é usada como função de normalização em modelos que convertem imagens de satélite ou câmeras allsky em irradiação, ou em modelos que decompõem a irradiação global em fração difusa e direta e é usado no algoritmo de validação da rede SONDA. É, portanto, importante avaliar e validar modelos de céu claro.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste plano de trabalho é o estudo e a melhoria dos modelos de céu claro para o tratamento e qualificação dos dados meteorológicos e espaciais da Rede SONDA. Isto será realizado revisando os algoritmos de modelos de céu claro, comparando e implementando melhorias nos principais modelos descritos na literatura, utilizando a linguagem de programação Python, de modo a aumentar a confiabilidade das análises e subsidiar a validação de modelos computacionais utilizados no levantamento destes recursos, bem como caracterizar fenômenos de Cloud Enhancement (CEs).

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Revisar na literatura os principais modelos de céu claro;
- Revisar na literatura ocorrências e características de eventos de Cloud Enhancement;
- Revisar o tratamento e qualificação de dados meteorológicos;
- Implementação, melhorias e avaliação dos melhores modelos de céu claro descritos na literatura;
- Definição dos critérios de identificação de eventos de Cloud Enhancement nas estações da rede SONDA;
- Avaliação e análise estatística de Cloud Enhancement.

### **3. MÉTODO**

#### **3.1 Instrumentos**

Uso de materiais já elaborados como: artigos científicos, livros, dissertações, relatórios técnicos, periódicos, documentos eletrônicos e enciclopédias. Uso do banco de dados meteorológicos e espaciais da Rede SONDA. Além do uso de plataformas e bibliotecas disponíveis para realização do estudo para implementação dos Modelos de céu Claro.

#### **3.2 Procedimento**

Uma componente fundamental para estudamos os recursos solares é irradiação do céu claro. Em particular, a irradiação do céu claro é usada como função de normalização em modelos que convertem imagens de satélite em irradiação, ou em modelos que decompõem a irradiação global em fração difusa e direta e é usado no algoritmo de validação da rede SONDA. Este projeto está avaliando desempenho de modelos de céu claro aplicados ao território brasileiro com validação das estimativas por comparação com dados observados na rede SONDA. Os modelos de céu claro serão selecionados com base em seu desempenho publicado, sua simplicidade de uso e/ou sua velocidade computacional. Uma vez definido o melhor modelo será necessário um aprimoramento e/ou melhorias em seus dados de entrada. Neste plano de trabalho, os dados da rede SONDA, tiradas por câmeras localizadas nas estações SONDA são usadas em conjunto com modelos otimizados de céu claro associadas a ambos os mecanismos fundamentais do CE. Os futuros resultados permitiram a estimativa da probabilidade e magnitude desses CEs.

#### 4. REALIZAÇÕES DO PERÍODO

Levando em conta a data de confirmação da bolsa, que ocorreu no fim do mês de abril, para os meses de abril e maio foi estabelecido como meta a preparação dos instrumentos para coleta de dados, sendo estabelecido por alguns meios e sempre com a utilização da internet, uma vez que está sendo realizado o levantamento bibliográfico como base para o preparo do projeto. Em seguida, foi realizada a sistematização dos dados obtidos para cada pesquisa bibliográfica com a intenção de construir um guia resumido de aspectos importantes para condução do projeto, sem que houvesse perda de foco ou extradição de dados importantes durante o levantamento, também oferecendo um melhor direcionamento do material, otimização de tempo e organização do conhecimento mais amplo para o mais específico. A seguir apresento um exemplo prático de utilização para o início do projeto:

<b>SISTEMATIZAÇÃO MATERIAL BIBLIOGRÁFICO</b>	
Bibliografia Metodológica	
Bibliografia Fundamental	
Bibliografia Básica	
Bibliografia Específica	

Tabela 1. Tabela para Sistematização de Material Bibliográfico.

Subsequente a isso, os seguintes resultados foram esperados: Diante do atual cenário de crescimento do uso de fontes renováveis de energia, dados ambientais para o uso em estudos de potencial são cada vez mais importantes, bem como a identificação de eventos de Cloud Enhancement (CEs) que tem um impacto importante na geração de energia solar. Desse modo, sendo fundamental desenvolver os conceitos para validação de modelos de céu claro ou mesmo de estudos específicos no tema dependem deste tipo de variável, o que reforça a necessidade de rotinas de qualificação cada vez mais complexas e que considerem parâmetros relevantes. Portanto, demandam uma constante evolução para o correto desenvolvimento da pesquisa.

Desse modo, a metodologia adotada visa auxiliar no esclarecimento de alguns cenários propostos ao longo do trabalho, orientando sobre a importância de estudos a respeito da energia solar para que se torne claro o papel que tal fonte pode apresentar e como ocorrem os processos até a chegada da radiação à superfície. Assim como, entender os principais modelos de céu claro, além das ocorrências e características de eventos de Cloud Enhancement.

Os conhecimentos básicos referentes ao recurso solar foram alcançados, existiram algumas dificuldades em questões técnicas de sua aplicação que foram sendo sanadas ao longo da consulta ao material levantado, além da interação com o orientador e outros discentes. Quanto a implementação dos códigos para os principais modelos de céu claro vigente ainda existe a necessidade de verificar outras fontes e aprofundar mais os estudos para desenvolver e se habituar com os dados e a interface das ferramentas e bibliotecas do código.

Posteriormente, foram efetuadas algumas alterações na escrita do projeto, em consequência do aprimoramento do conhecimento, correções no texto e possíveis melhorias para fornecer ao leitor maior clareza e entendimento a respeito de todo o conteúdo abordado. Informações a respeito da definição dos critérios de identificação de eventos de Cloud Enhancement ainda não foram definidas. O resumo foi estabelecido levando em conta as diretrizes da pesquisa, mas pode sofrer alterações levando em conta da fase inicial do projeto, assim como outras mudanças podem ocorrer no decorrer do trabalho.

## **5. DESCRIÇÃO E AVALIAÇÃO DO APOIO INSTITUCIONAL RECEBIDO NO PERÍODO**

Diante do momento atual em que vivemos, devido ao novo Corona Vírus (COVID-19) que recebeu a denominação SARS-CoV-2 e, posteriormente, a sua rápida evolução e expansão, sendo decretada pandemia pela Organização Mundial de Saúde (OMS) e todas as restrições impostas para conter o vírus, a principal sistemática passou a ser reuniões on-line via Google Meet, visando discutir sobre o desenvolvimento do projeto, tirar dúvidas e esclarecer alguns conceitos encontrados na literatura vigente, além de poder compartilhar o aprendizado, ficar exposto para eventuais atividades propostas e participar de outros encontros fora do domínio de nosso laboratório de pesquisa. Os encontros sempre ocorrem semanalmente e também acontecem discussões com relação a outras temáticas que possuem extrema importância para o aprendizado do discente e que agregam valores durante a construção do projeto.

Vale ainda ressaltar que, possuíamos um grupo no Whatsapp, onde todos os discentes podem interagir sobre seus respectivos projetos, havendo trocas de conhecimento, auxílio mediante a certas dificuldades encontradas e o compartilhamento de eventos, novas fontes de pesquisa, livros, artigos científicos, aulas on-line, webnários e cursos. Destaco ainda que, todas as reuniões propostas são marcadas via um sistema de agendamento on-line com o objetivo de adequar o melhor dia e horário para todos os participantes. Somado a isso, também existe a

troca de e-mails para tirar eventuais indecisões, análise e correção do projeto, além do envio de material para estudo.

## 6. PLANO DE ATIVIDADES PARA O PRÓXIMO PERÍODO

Para o andamento do trabalho estão previstas as atividades:

<b>Atividades</b>	<b>out</b>	<b>nov</b>	<b>dez</b>	<b>jan</b>	<b>fev</b>	<b>mar</b>
Pesquisa bibliográficas sobre metodologias dos principais modelos de céu claro e análise de consistência de observações.	x	x	x			
Pesquisa bibliográficas sobre metodologias de identificação e análise dos eventos de <i>Cloud Enhancement</i> (CEs). Revisão e melhoramento dos critérios CE.	x	x	x			
Implementação dos modelos de Céu Claro para a qualificação dos dados de radiação solar.	x	x	x	x		
Avaliação e performance dos melhores modelos de Céu Claro para o Brasil.	x	x	x	x		
Análise de resultados iniciais.				x	x	
Implementação de novos critérios de identificação de CE para todas as estações da Rede SONDA.				x	x	x
Otimização e Melhorias do código em Python do melhor modelo de céu claro encontrado.		x	x	x	x	x
Implementação e avaliação de rotinas de identificação e análise dos eventos de CE.					x	x
Elaboração de relatórios e participação em Congressos de Iniciação científica.					x	x

Tabela 2. Cronograma para elaboração da Pesquisa.

## REFERÊNCIAS

Andrade, Ricardo Cesar & Tiba, Chiguera, 2016. "Extreme global solar irradiance due to cloud enhancement in northeastern Brazil," *Renewable Energy*, Elsevier, vol. 86(C), pages 1433-1441.

Atlas brasileiro de energia solar / Enio Bueno Pereira; Fernando Ramos Martins; André Rodrigues Gonçalves; Rodrigo Santos Costa; Francisco J. Lopes de Lima; Ricardo Rüther; Samuel Luna de Abreu; Gerson Máximo Tiepolo; Silvia Vitorino Pereira; Jefferson Gonçalves de Souza -- 2.ed. -- São José dos Campos: INPE, 2017. 88p.: il. (E-BOOK)

Castillejo-Cuberos A.; Escobar R. *Solar Energy* 209 (2020). Detection and characterization of cloud enhancement events for solar irradiance using a model-independent, statistically-driven approach.

INPE. Formato para os Relatórios Científicos anuais e final - Programa de Iniciação Científica (PIBIC) e do Programa de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI). Julho 22, 2019. Disponível em:< <http://www.inpe.br/bolsas/relatorio.php>>. Acesso em: 06 de ago. de 2020.

Jamie M. Bright, Xinyu Bai, Yue Zhang, Xixi Sun, Brendan Acord, Peng Wang. *irradpy*: Python package for MERRA-2 download, extraction and usage for clear-sky irradiance modelling, *Solar Energy*, Volume 199, 2020, Pages 685-693.

Pierre Ineichen. A broadband simplified version of the Solis clear sky model, *Solar Energy*, Volume 82, Issue 8, 2008, Pages 758-762.

Rich H. Inman, Yinghao Chu, Carlos F.M. Coimbra. Cloud enhancement of global horizontal irradiance in California and Hawaii, *Solar Energy*, Volume 130, 2016, Pages 128-138.

KUMAR, V.; SHRIVASTAVA, R. L.; UNTAWALE, S.P. *Solar Energy: Review of Potential Green & Clean Energy for Coastal and Offshore Applications*. *Aquatic Procedia*. v. 4, p. 473–480, 2015.