



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
2022



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.

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

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CE's	Cloud Enhancement
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MW	Megawatt
SONDA	Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS	8
2.1 Objetivo Geral	8
2.2 Objetivos Específicos	8
3. FUNDAMENTAÇÃO	9
4. REDE SONDA	13
5. MODELOS DE CÉU CLARO	14
5.1 Modelo de Ineichen	14
5.2 Modelo de Solis	14
5.3 Modelo de Perez	15
6. CONCLUSÃO	16
REFERÊNCIAS	17

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).

O fenômeno de CEs ocorre devido ao efeito de espalhamento ocasionado pelas bordas das nuvens em condições de nebulosidade parcial. (Andrade, 2016). E os eventos de CEs podem ser classificados em três grupos:

i) Aumento da irradiância por nuvens próximas ao disco solar;

ii) Sob uma cobertura de nuvens uniforme, a irradiância horizontal difusa pode aumentar antes e depois de um evento CE, de modo que a borda da nuvem não contribui para o aumento da irradiância;

iii) O Sol é parcialmente obscurecido por uma fina camada de nuvens, de modo que um valor alto pode ser obtido para irradiância difusa horizontal e um valor relativamente baixo para irradiância direta.

Dessa forma, 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;
- Definição dos critérios de identificação de eventos de Cloud Enhancement nas estações da rede SONDA;

3. FUNDAMENTAÇÃO

Visando um melhor aprofundamento acerca dos fenômenos de Cloud Enhancement (CEs), foram analisados artigos que tratam diferentes estudos e implicações geradas pelos eventos de CEs, para compreender as ocorrências dos eventos de sobreirradiância solar incidente na superfície, assim como frequência de ocorrência e sazonalidades e seus possíveis eventos extremos.

Jarvela et al (2020) aborda sobre os fenômenos de *Cloud Enhancement* (CEs) e das características das usinas fotovoltaicas. Em primeiro lugar, os autores descrevem brevemente o que é e as características do fenômeno de *Cloud Enhancement*, comentando que embora esse fenômeno seja bem conhecido, seu impacto em sistemas fotovoltaicos é pouco estudado. O objetivo do estudo foi entender como esse fenômeno afeta os módulos fotovoltaicos.

Os eventos de CEs são diretamente relacionados à presença de nuvens, e as áreas terrestres que sofrem influência apresentam limites em tamanho. Geralmente, as medições de irradiância são feitas usando apenas um sensor, de modo que os resultados não podem ser aplicados diretamente em grandes geradores fotovoltaicos distribuídos em grandes áreas terrestres. Se a frequência de amostragem for pequena, os eventos de aprimoramento de nuvem de curta duração podem não ser detectados por um curto período de tempo.

Os dados obtidos são provenientes de medições de irradiância obtidas por piranômetros constituídos por fotodiodo e presentes na planta de pesquisa de energia solar fotovoltaica instalada nos telhados da Universidade de Tampere na Finlândia, norte da Europa. 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.

Foi identificado, devido ao ambiente não ser ideal por completo, algumas anomalias durante as medições dos piranômetros nos valores de irradiância, pois essas diferenças são provenientes da geração de sombras e reflexos formados pelas árvores e estruturas próximas a região, diferenças na orientação dos piranômetros, albedo de neve durante dias de primavera, e além disso também existem, eventualmente, formação de sombreamento causado por pássaros. Vale ainda ressaltar que, o ângulo de inclinação de 45° para os piranômetros deixam os mesmos suscetíveis a interferências ao albedo de neve.

Os eventos de CEs foram caracterizados do ponto de vista da geração de energia fotovoltaica e são estudados através da análise de medições de irradiância de uma série de piranômetros distribuídos em uma área terrestre correspondente a um gerador fotovoltaico de 0,1 MW. Os dados de irradiância são usados para calcular a velocidade e a direção do

movimento das sombras das nuvens. Subsequentemente, a velocidade da zona de realce da nuvem é subtraída da velocidade da sombra da nuvem. Assim, foi desenvolvido uma maneira simples e direta para que fosse possível estimar as irradiâncias médias em áreas de terra que correspondem aos tamanhos típicos encontrados para os geradores fotovoltaicos.

O método foi então 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. 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.

Para as análises, utilizaram-se 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.

A observação de valores extremos deve ser considerada, por exemplo, em estudos sobre efeitos da radiação solar, índice UV e efeitos biológicos relacionados a materiais expostos a condições externas. Além disso, um conhecimento detalhado desse interessante efeito pode ajudar muito a elucidar os aspectos físicos da interação da radiação solar global com o ecossistema e o clima.

Lappalainen et al (2020) apontam que a frequência de geradores solares e a radiação solar podem exceder significativamente a irradiância esperada de céu claro devido ao efeito de *cloud enhancement* (CE). Quando ocorre CE, a potência máxima do gerador fotovoltaico pode exceder a potência nominal do inversor que conecta o gerador à rede. Com base na irradiância medida e nas velocidades de borda da nuvem, os autores investigam as características do evento CE e o seu efeito na eficiência elétrica de geradores solares fotovoltaicos.

Durante um período de 11 meses em San Diego, Califórnia, o pico de irradiância mais alto medido foi de $1\ 66\ \text{W}/\text{m}^2$. Além disso, as maiores radiações médias simuladas para geradores de até 1 MW foram superiores a $1\ 00\ \text{W}/\text{m}^2$. E houveram eventos de CE acima de $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ estendeu-se por vários quilômetros. Esses resultados mostram que mesmo grandes usinas de energia solar podem ser severamente afetadas por eventos de CE. Além disso, a operação de três usinas de energia solar foi simulada durante o evento por volta de 2400 ocorrências, que foi medida usando um modelo espaço-temporal detalhado.

Foi concluído que, embora eventos de CE afetam a operação das usinas fotovoltaicas, seus efeitos em termos de energia total foram pequenos porque os eventos CE, que afetam mais fortemente a operação do sistema, são extremamente raros.

Piacentini et al (2010) apresentam uma análise detalhada das medições terrestres da radiação solar global baseada em nuvens no nordeste do Brasil nas cidades de Água Branca, Santana do Ipanema, Palmeira dos Índios, Laje, Pão de Açúcar, Arapiraca, Coruripe e Maceió de janeiro a dezembro de 2008. As medições foram feitas a cada 1 minuto com piranômetros. E os autores descobriram que:

- i) O fenômeno não é raro e ocorre pelo menos em um terço dos dias de um determinado mês;
- ii) A duração cumulativa (número de eventos consecutivos de 1 minuto) não deve exceder 34 minutos;
- iii) Há um claro efeito sazonal com dois picos mensais de probabilidade de ocorrência, um em abril e outro em outubro;
- iv) A radiação solar máxima em Água Branca foi de 1650 W / m^2 , cerca de 350 W / m^2 superior da irradiação solar extraterrestre ;
- v) Há forte assimetria no perfil de ocorrência entre manhã e tarde.

Por fim, é apontado que a observação de valores extremos deve ser levada em consideração, por exemplo, ao estudar os efeitos da radiação solar e os efeitos biológicos relacionados ao índice UV. Radiação extrema que excede a radiação extraterrestre e dura até 30 minutos pode significar índices de UV (UVI) muito altos e potencialmente perigosos.

Outro estudo fundamental foi o realizado por Ineichen (2006) que por meio da seleção de oito modelos de radiação solar de céu claro, a saber, o modelo Solis, Bird e Hulstrom, Molineaux, Esra, Ineichen, CPC2, REST2 e Kasten. Os modelos tiveram um desempenho excelente em 16 bancos de dados observados independentes, cobrindo um período de 20 anos. Os parâmetros utilizados foram altitude, que variou do nível do mar a 1.600 metros, e variabilidade climática. Bases de dados de 16 estações terrestres de alta qualidade das latitudes 28°N a 45°N .

Parâmetros de aerossol e vapor d'água são obtidos a partir de medições no solo para comparação e podem ser considerados como aproximações da realidade. Os resultados obtidos por meio dessa comparação, validação dinâmica, podem ser considerados como a acurácia inerente dos modelos.

As conclusões apresentadas mostram que o mais relevante para uma boa estimativa é a entrada correta dos dados de turbidez locais, ou seja, a precisão dos parâmetros de entrada, é essencial para validar os componentes de radiação resultantes, e a escolha de um modelo é secundária. Os critérios de seleção do modelo devem ser baseados na facilidade de

implementação, na disponibilidade de um parâmetro de entrada (por exemplo, profundidade óptica do aerossol) ou na capacidade do modelo de produzir radiâncias espectrais.

As nuvens atenuam significativamente a irradiação solar ao nível do solo, causando uma redução substancial na capacidade de produção de energia fotovoltaica. No entanto, céus parcialmente nublados podem levar a um aumento temporário da Irradiância Horizontal Global (GHI) local acima do teto de céu claro e, às vezes, da irradiância extraterrestre

Inman et al. (2016) apresentam um trabalho onde são estudados os eventos de cloud enhancement e avaliam quantitativamente a ocorrência de Ramp Rates (RRs) coerentes resultantes. É analisado um ano inteiro de dados de irradiância do solo registrados na Universidade da Califórnia, Merced, bem como quase cinco meses de dados de irradiância registrados na Universidade da Califórnia, San Diego, e Ewa Beach, Havaí. Mostrando que aproximadamente 4% de todos os pontos de dados se qualificam como potenciais CEs, o que corresponde a quase 3,5 dias inteiros de tais eventos por ano, se considerados sequencialmente.

A radiação incidente é atenuada à medida que percorre seu caminho até o nível do solo através de uma série complexa de múltiplas reflexões, absorções e reemissões devido a interações com os constituintes atmosféricos (Goody e Yung, 1995). Isso resulta na divisão da incidente radiação de feixe extraterrestre em dois componentes distintos; Irradiância Normal Direta (DNI) e Irradiância Horizontal Difusa (DHI), cuja soma geométrica é a Irradiância Horizontal Global (GHI).

Além da divisão da radiação, a formação de nuvens atmosféricas geralmente está associada a uma diminuição na intensidade da irradiação solar. Na verdade, a atenuação da entrada de energia solar por nuvens é tipicamente maior do que qualquer outro componente atmosférico. No entanto, parcialmente nublado os céus podem levar ao inverso; ou seja, vários espalhamentos e reflexões de radiação de ondas curtas por campos de nuvens pode levar ao aumento da irradiância de uma parte do céu acima do valor sem nuvens correspondente.

O trabalho foi responsável por investigar as taxas de rampa coerentes (RRs) associados aos CEs e seu impacto potencial sobre a qualidade da geração de energia fotovoltaica. RR coerente é definido como uma série de observações de GHI monotonamente crescentes ou decrescentes cujo valor máximo excede o valor de céu claro esperado por um determinado limite. Esses CEs e seus RRs associados são de interesse por várias razões:

- i) Esses eventos geralmente precedem ou seguem períodos de irradiância abaixo do normal associados à presença de nuvens opacas passageiras levando a ocorrência de grandes RRs;

- ii) Grandes RRs podem causar oscilação de tensão que, por sua vez, acionam carregadores de derivação em alimentadores de distribuição, assim aumentando o custo operacional;
- iii) Previsão bem-sucedida pode levar a um controle eficaz e reduzir custos associados a altos níveis de variabilidade na geração de energia fotovoltaica.

4. REDE SONDA

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

A coleta de dados na rede SONDA ocorre a cada segundo e as médias de um minuto de observações são armazenadas em arquivos disponíveis publicamente. Antes de serem publicados, os dados coletados passarão por controle de qualidade, conforme descrito em <http://sonda.ccst.inpe.br>, para identificar eventuais problemas suspeitos ocorridos durante o período de aquisição dos dados.

Não obstante, as estações, por sua vez, medem outros parâmetros climáticos, como irradiância solar direta normal, irradiância solar global e irradiância solar difusa. As medições globais de radiação solar têm sido usadas para entender melhor o fenômeno do cloud enhancement (CE).

Vale ainda salientar que, os dados com suspeita de erros são sinalizados, mas não descartados, para evitar a perda de dados válidos, como observações de eventos de CE. Em geral, os dados coletados durante eventos de CE são marcados como dados fisicamente improváveis ou extremamente raros. No entanto, estudos mostram que os dados devem ser classificados como corretos, pois resultam do fenômeno físico da interação da radiação solar e nuvens.

5. MODELOS DE CÉU CLARO

Vários modelos de radiação propostos ao longo dos anos são descritos na literatura. Recentemente, o estudo de modelos de céu claro ganhou espaço no meio acadêmico, principalmente devido a melhorias nos modelos matemáticos, tornando as estimativas mais próximas da realidade. O conhecimento da irradiância do céu claro que atinge o solo é um parâmetro chave na modelagem e avaliação da radiação solar (Ineichen, 2008).

5.1 Modelo de Ineichen

O modelo de céu claro de Ineichen relaciona a irradiância horizontal global (GHI), irradiância normal direta (DNI) e um componente horizontal difuso de céu claro (DHI), que também é calculado como a diferença entre GHI e $DNI \cdot \cos(\text{zênite solar})$. É um modelo funcional onde ele liga matematicamente os parâmetros atmosféricos como massa de ar e uma nova fórmula do fator de turbidez Linke proposta por Ineichen e Perez (2002) usando um método de transformação que é simples, mas eficaz, com base na cobertura de nuvens em pixels, onde o brilho do pixel do sensor de satélite é usado para calcular as componentes da irradiância de superfície em condições de céu claro.

5.2 Modelo de Solis

O modelo Solis (Mueller et al., 200) é utilizado como função de normalização no processo de avaliação da irradiância. O Solis Clear Sky Model é um novo modelo baseado em cálculos de transferência radiativa e na relação Lambert-Beer. Quando usado para converter imagens de satélite meteorológico em dados de irradiância em grandes escalas geográficas, os cálculos de transferência radiativa consomem muito tempo no computador.

Também é baseado em cálculos LibRadTran em espaço de 10 dimensões que incluem profundidade óptica do aerossol em dois comprimentos de onda, profundidade óptica parcial do aerossol para determinar o tipo de aerossol, coluna de vapor d'água e abundância de ozônio. 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).

5.3 Modelo de Perez

O modelo de Perez (Perez et al., 1990) é um modelo que estima a quantidade de radiação em superfícies arbitrariamente inclinadas, cuja entrada é um valor calculado ou medido de irradiância no plano horizontal.

Basicamente, o modelo divide a radiação global em três: direta, difusa e radiação albedo, que são, respectivamente, a radiação direta que provém do disco solar, a radiação que corresponde ao restante do céu e a radiação refletida pela superfície horizontal.

6. CONCLUSÃO

Diante dos tópicos levantados neste trabalho, foi possível apresentar a base de informações a respeito da energia solar e o estudo do fenômeno de cloud enhancement, de acordo com o conhecimento científico vigente para o aproveitamento da radiação solar aplicada em diferentes projetos. A energia solar tem vantagens ambientais evidentes sobre outras fontes de energia e não vai esgotar como um recurso natural, sendo uma fonte mais limpa e renovável quando comparada às fontes convencionais e seus processos de conversão energética. Segundo Souza (2016), sua utilização é uma das melhores opções para resolução de problemáticas relacionada aos efeitos do aquecimento global, redução da dependência de uso dos combustíveis fósseis e a redução do impacto econômico no aumento dos custos do petróleo.

Estudos e análises acerca dos eventos de cloud enhancement são de extrema importância porque pode ser aplicada em diversos campos, por exemplo na produção de eletricidade com painéis solares e também no meio acadêmico, pois auxilia na caracterização da radiação solar em um determinado local. Não obstante, também é importante obter espaço para o desenvolvimento de políticas públicas baseadas na utilização de sistemas solares, visando ao desenvolvimento econômico e social o uso da incidência solar abundante no território nacional, o que incentiva mais pesquisas solarimétricas.

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 Rütther; 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.

Goody, Richard M., and Yuk Ling Yung. *Atmospheric radiation: theoretical basis*. Oxford university press, 1995.

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>.

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).

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. irrady: Python package for MERRA-2 download, extraction and usage for clear-sky irradiance modelling, *Solar Energy*, Volume 199, 2020, Pages 685-693.

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.

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>

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>.

PEREZ, R., INEICHEN, P., SEALS, R. Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance. *Solar Energy*. Vol. 44. n 5. pp. 271 – 289. 1990

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

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>.

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.

SOUZA, Ronilson di. Os sistemas de energia solar fotovoltaica. 2016. Disponível em:
<<http://programaintegradoronline.com.br/wp-content/uploads/2016/03/Livro-Digital-de-Introdu%C3%A7%C3%A3o-aos-Sistemas-Solares-novo.pdf>>.