

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA WEB PARA CÁLCULO DA IRRADIAÇÃO NO PLANO INCLINADO A PARTIR DOS DADOS DO ATLAS SOLARIMÉTRICO BRASILEIRO

Klinsmann Baltazar Ramos da Silva – kbrs@discente.ifpe.edu.br
Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Pesqueira

Resumo. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta web para cálculo da irradiação no plano inclinado que utiliza como dados de entrada, os valores de irradiação do 2º Atlas Brasileiro de Energia Solar que fornece valores diários médios mensais da irradiação global horizontal. Foi utilizado um cálculo de distância entre o ponto de interesse e os pontos do atlas. Para realizar a transposição foi utilizado o modelo de Perez4. Em comparação com os valores produzidos pela ferramenta RADIASOL, os erros encontrados foram menores que 1,4 %. A ferramenta web está disponibilizada no endereço www.radiacaosolar.com.br e é de uso aberto e livre.

Palavras-chave: Energia solar, Radiação solar, Ferramenta web

1. INTRODUÇÃO

A diversificação da matriz energética brasileira tomou contornos direcionados para a inserção massiva de dois tipos de aproveitamento: o eólico, que vem demonstrando, a cada leilão realizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), sua viabilidade com preços do MWh cada vez mais competitivos da ordem de R\$ 98,89 / MWh; e a fonte solar fotovoltaica que, aproveitando o aquecimento do mercado mundial e as recentes regulamentações (RN 482/12, RN 687/15 e Lei 14.300/22), tem apresentado preços na faixa de R\$ 84,39 / MWh, valores estes relativos ao leilão A-6 de 2019 (ANEEL, 2022).

Conforme levantamento no Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA), a fonte solar fotovoltaica representou, em março de 2022, 2,60 % dos empreendimentos de geração em operação no País, com 4,73 GW instalados. Existem ainda 96 empreendimentos de usinas solares fotovoltaicas em construção com potência por volta de 3,72 GW. As usinas contratadas e com construção não iniciada são 777 com potência total de 31,24 GW. Some-se a estes números, os 9,274 GW instalados em 857.173 unidades consumidoras com base nas Regulamentações 482/12 e 687/15.

O processo de implantação de sistemas de geração solar fotovoltaica na modalidade de geração distribuída inicia pela elaboração do projeto da usina que em uma de suas fases, determina a quantidade de módulos fotovoltaicos que, dadas as condições da instalação (inclinação, azimute e irradiação média no local) irá gerar a quantidade de energia elétrica que irá suprir a necessidade do cliente (Zilles *et al.*, 2012).

Os desenvolvedores deste tipo de projeto têm utilizado como fonte de dados para este cálculo, os dados disponibilizados pela 2ª edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira *et al.*, 2017). Neste, foram compilados e processados 17 anos de imagens de satélite e, utilizando o modelo Brasil-SR, foi produzido um banco de dados com valores da irradiância diária média mensal horizontal de 72.272 pontos mapeados em quadrículas com 10 km de lado, abrangendo todo o território brasileiro.

O acesso a estes dados é feito a partir de uma página na internet pertencente ao CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito) coordenado pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) (CRESESB, 2021). Bastando fornecer a latitude e longitude do local, como mostra a Fig. 1.

A Fig. 1a apresenta os campos necessários para a consulta no banco de dados do CRESESB. Como resultado, a Fig. 1b apresenta um trecho da tela que mostra os valores da irradiação no local mais próximo das coordenadas da consulta, para 4 valores de inclinação do plano, sempre considerando ele direcionado para o Norte. Caso no projeto em desenvolvimento, os módulos fotovoltaicos sejam instalados em uma condição diferente das fornecidas na Fig. 1b, que é muito provável, para instalações em telhados, os valores fornecidos no cálculo no plano inclinado não são válidos, dificultando assim esta etapa do projeto.



Figura 1 - (a) campos para entrada de dados, (b) resultado da consulta no banco de dados.

Neste sentido, este trabalho tem como finalidade apresentar o desenvolvimento de uma ferramenta web que, utilizou o modelo de transposição da radiação difusa para o plano inclinado de Perez *et al.* (1987), que foi melhorado por (Utrillas e Martinez-Lozano, 1994). Este modelo foi o que alcançou melhores resultados em uma comparação realizada por (Yang, 2016). Os dados da 2ª edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar foram utilizados permitindo ao usuário obter os valores de irradiação diária média mensal para qualquer inclinação e azimute. Destaca-se que não é objeto deste trabalho testar modelos de transposição e sim, comparar resultados de ferramentas disponíveis com os dessa ferramenta.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento da ferramenta foi dividido em 3 blocos de códigos fonte que foram implementados em um único código final. A entrada de dados é realizada de uma única vez na página inicial. O usuário deve informar a latitude (φ), longitude (λ), o ângulo azimutal (Φ) e a inclinação (β) da superfície desejada, todos em graus.

Cálculo da distância entre o ponto fornecido e o ponto do atlas

Para tornar possível a utilização dos dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar, foi necessário, a partir dos valores da latitude e longitude do ponto de interesse do usuário, calcular inicialmente a distância entre este e cada ponto do banco de dados do Atlas, utilizando para isto, o método de Haversine (Eq. 1) descrito por Sinnott (1984). Após este processo, o ponto do banco de dados do Atlas com menor distância para o ponto de interesse é que foi utilizado para encontrar os valores da irradiação média diária mensal a serem utilizados nas próximas etapas

$$d = 2 \cdot r \cdot \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad (1)$$

Na Eq. 1, d representa a distância obtida em km do ponto mais próximo do Atlas em relação às coordenadas da entrada do usuário, φ_2 é a latitude em radianos dos pontos da tabela do atlas e φ_1 é a latitude em radianos fornecida pelo usuário, λ_2 é a longitude em radianos dos pontos da tabela do atlas e λ_1 é a longitude fornecida pelo usuário em radianos e r é o raio da terra em km.

No final deste processo, os 12 valores da irradiação global média diária mensal no plano horizontal (GHI) estarão disponíveis para serem utilizados na próxima etapa.

Geração de dados sintéticos horários

A partir dos 12 valores da irradiação global média diária mensal do Atlas, utilizou-se o procedimento descrito em Duffie e Beckman (1991), que consiste em considerar o valor médio diário de um determinado mês como pertencente ao dia médio de cada mês, para que seja possível calcular seus valores horários e realizar a transposição. Para cada um dos 12 valores obtidos, determinou-se inicialmente o índice de claridade mensal (K_t), que é calculado pela Eq. 2.

$$K_t = \frac{GHI}{H_0} \quad (2)$$

Em que, H_0 é a irradiação diária extraterrestre em kWh/m², calculada pela Eq. 3 (Rabl, 1985), tomando-se o dia médio de cada mês como dia de referência, conforme citado.

$$H_0 = \frac{\tau_{day}}{\pi} \cdot I_{0,eff} \cdot \cos(\lambda) \cdot \cos(\delta) \cdot \left(\sin(\omega_s) - \frac{\pi \cdot \omega_s \cdot \cos(\omega_s)}{180} \right) \quad (3)$$

Na Eq. 3, ω_s é o ângulo horário do nascer do Sol, τ_{day} é a duração do dia (24 h), $I_{0,eff}$ é a irradiância extraterrestre corrigida pela órbita elíptica da Terra, δ é a declinação solar e λ é a longitude do ponto fornecida pelo usuário em radianos.

A partir dos 12 valores diários da irradiação global horizontal (GHI), são produzidos os valores horários da irradiação (I) para cada dia, utilizando-se a Eq. 4, descrita por Collarespereira e Rabl (1979). Os coeficientes a e b podem ser calculados por expressões apresentadas pelos autores citados.

$$I = GHI \cdot \frac{\pi \cdot [a + b \cdot \cos(\omega)] \cdot [\cos(\omega) - \cos(\omega_s)]}{24 \cdot [\sin(\omega_s) - \omega_s \cdot \cos(\omega_s)]} \quad (4)$$

Na Eq. 4, ω representa o ângulo horário do Sol em radianos, ω_s é o ângulo horário do nascer do Sol em radianos, GHI é a irradiação diária em Wh/m², I é a irradiação horária em Wh/m². a e b são coeficientes que dependem de ω_s , suas expressões estão descritas em Collarespereira e Rabl (1979).

Os valores de irradiação horária (I) produzidos por este modelo possuem o perfil semelhante a um dia de céu claro, tanto para baixos quanto altos valores de irradiação diária (GHI). Para que o perfil de irradiação horária seja mais semelhante ao de um dia comum que possua a influência das nuvens, foi utilizado o processo de adequação descrito por Krenzinger (1994) (Eq. 5) que modifica os valores originais de k_t na base horária a partir de um valor randômico (Ω) que varia entre ± 1 , produzindo um novo índice de claridade (k_{tm}), o que permite modificar o perfil da irradiação horária.

$$k_{tm} = \begin{cases} kt + \Omega \cdot (0,25 - 2 \cdot [K_t - 0,4]^2) & \text{se } 0,1 \leq K_t \leq 0,75 \\ kt & \text{se } (K_t < 0,1 \text{ ou } K_t > 0,75) \end{cases} \quad (5)$$

É devido a esta adequação que os valores que a ferramenta web produz variam cada vez que é executada para uma mesma latitude e longitude. A variação observada dos valores da irradiação diária média mensal é menor que 0,1 %.

Utilizando o valor de k_{tm} da Eq. 5, a irradiação horária (I) é novamente calculada com a Eq. 6.

$$I = k_{tm} \cdot I_{0,eff} \cdot \cos(\theta_z) \quad (6)$$

A Fig. 2 mostra o resultado para um dia do processamento apenas da Eq. 4, que produz um perfil de um dia de céu claro (linha tracejada) e, das Eq. 4, 5 e 6 em conjunto (linha cheia) que reproduz um dia com variações da intensidade da irradiância por efeito das nuvens.

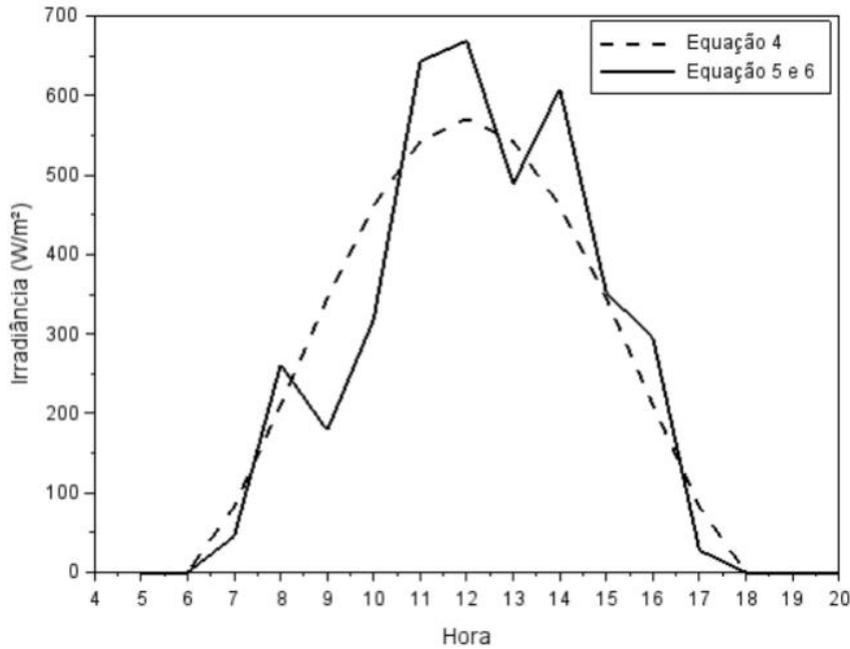


Figura 2 - Irradiância de um dia com perfil de céu claro (linha tracejada) e com perfil com variações provocadas por nuvens (linha cheia).

Decomposição dos dados horários

Nesta etapa, os valores horários da irradiação de cada um dos 12 dias são decompostos nas componentes direta (I_b) e difusa (I_d). Para tanto, foi utilizado o modelo descrito por Erbs *et al.* (1982) (Eq. 7), que pode ser utilizado para dados horários.

$$I_d = I \cdot \begin{cases} 0,9511 - 0,1604.ktm + 4,388.ktm^2 - 16,638.ktm^3 + 12,336.ktm^4 & \text{se } 0,22 \leq ktm \leq 0,8 \\ 1 - 0,09.ktm & \text{se } ktm < 0,22 \\ 0,165 & \text{se } ktm > 0,8 \end{cases} \quad (7)$$

Para obter a componente direta (I_b), foi empregado o método da diferença citado por Dal Pai (2005) conforme Eq. 8.

$$I_b = \frac{I - I_d}{\cos(\theta_z)} \quad (8)$$

Transposição para o plano inclinado

Nesta etapa, as componentes difusa e direta foram transpostas para o plano inclinado de um ângulo (β) e com azimute (Φ). Em relação à componente direta transposta (I_{bt}), utilizou-se a Eq. 9, indicada por Rabl (1985).

$$I_{bt} = \frac{I_b \cdot \cos(\theta_s)}{\cos(\theta_z)} \quad (9)$$

Para a transposição da componente difusa (I_{dt}), utilizou-se como referência o resultados de uma comparação entre 24 modelos de transposição realizado por Yang (2016) para diversas regiões do mundo. Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado o modelo que obteve a melhor classificação no citado trabalho, que foi denominado Perez4 (Utrillas e Martinez-Lozano, 1994). Por motivo de redução do tamanho deste artigo, as equações do modelo Perez4 não serão apresentadas, mas estão disponíveis tanto em Yang (2016) como em Utrillas e Martinez-Lozano (1994).

Para a transposição da componente refletida no solo (I_r), foi empregada a Eq. 10, cujo fator de transposição foi proposto por Gueymard (2009).

$$I_r = I \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \quad (10)$$

Uma vez obtidas as componentes transpostas, a sua soma resulta na irradiação global horária transposta (I_t) (Eq. 11).

$$I_t = I_{dt} + I_{bt} + I_r \quad (11)$$

Após este processo os valores horários de cada dia são integrados, produzindo a irradiação global transposta diária (GHI_t).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O algoritmo foi implementado inicialmente no SciLab como ambiente para testes dos modelos de transposição para o plano inclinado. Para tanto, foram escolhidas 10 localidades no território brasileiro, indicadas na Fig. 3. Destaca-se que foram escolhidas localidades distribuídas em todas as Regiões brasileiras.



Figura 3 - Distribuição das localidades utilizadas para teste do algoritmo.

Para os testes, foram utilizados os valores calculados com o programa RADIASOL, desenvolvido pela UFRGS e de acesso livre para âmbito acadêmico (Krenzinger e Burg, 2010). Para todos os testes, foi utilizado o erro médio quadrático como indicador estatístico, calculado a partir dos valores anuais. Os dados de entrada para o RADIASOL foram as irradiações mensais médias diárias do Atlas referentes aos pontos da Fig. 3.

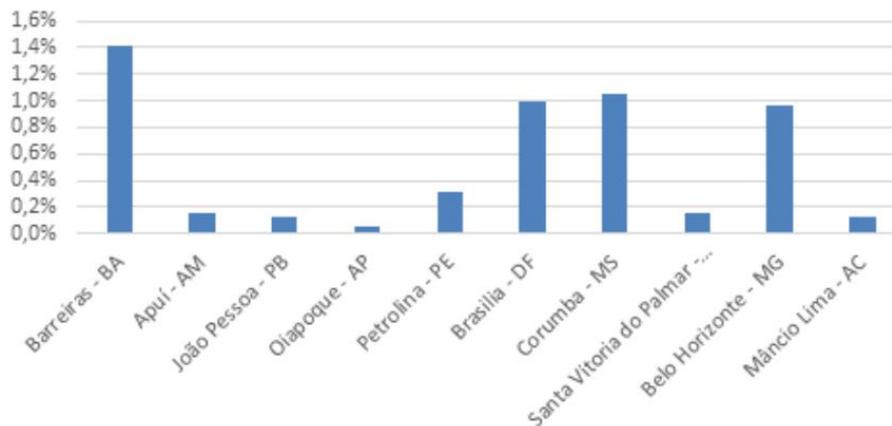


Figura 4 - Erro médio quadrático entre o algoritmo desenvolvido e o RADIASOL.

A Fig. 4 apresenta os valores do erro médio quadrático da irradiação diária média anual calculada com este procedimento e com a ferramenta RADIASOL. Observa-se que os erros estão abaixo de 1,4 %.

Como fase final do desenvolvimento da ferramenta, o algoritmo desenvolvido para a linguagem M do SciLab foi traduzido para o PHP, cujo código foi implementado em um servidor da internet e está disponível no endereço (www.radiacaosolar.com.br). A tela de abertura da página está indicada na Fig. 5.

Figura 5 - Tela de entrada de dados da ferramenta web desenvolvida.

Na Fig. 5, é possível verificar que os 4 campos de dados de entrada estão disponíveis para o usuário digitar os valores. A latitude está limitada entre -34° e $+6^{\circ}$ e a longitude entre -74° e -33° que são os limites do território brasileiro. A inclinação pode ter valores de 0° a 90° e a orientação de 0° a 360° . Foi colocada uma rosa dos ventos com as referências dos ângulos para orientar os usuários.



Figura 6 - Tela de saída de dados da ferramenta web desenvolvida.

A Fig. 6 mostra um exemplo da saída dos dados. São fornecidos os valores de entrada e a média diária horizontal e inclinada em valores anuais. Um gráfico e uma tabela apresentam os valores diários médios mensais. Destaca-se que, como o índice de claridade modificado (ktm) depende de uma variável randômica, para as mesmas coordenadas e valores de inclinação e orientação, o algoritmo produz resultados que variam entre $\pm 0,1\%$.

Como conclusões, foi apresentado neste trabalho o desenvolvimento de uma ferramenta web para cálculo da irradiação transposta a partir dos dados disponibilizados pela 2ª versão do Atlas Brasileiro de Energia Solar. As comparações feitas com o RADIASOL, apresentaram desvios médios quadráticos menores que 1,4 %, o que demonstra que a ferramenta desenvolvida pode ser utilizada para esta finalidade, suprimindo assim a necessidade de se ter disponível, de forma livre e de fácil acesso, uma ferramenta que utilize os dados da 2ª versão do Atlas

Brasileiro de Energia Solar e que calcule a irradiação em um plano com qualquer inclinação e direção.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, IFPE Campus Pesqueira, pelo fomento à pesquisa com o financiamento das bolsas do estudante.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, 2022. Resultado de leilões. Disponível em <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-contudos/relatorios-e-indicadores/leiloes>>. Acessado em 12 jul. 2022.
- Collarespereira, M. e Rabl, A., 1979. Average distribution of solar radiation - correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy*, vol. 22, n. 2, pp. 155–164.
- CRESESB, 2021. Potencial solar - sundata v 3.0. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 10 set. 2021.
- Dal Pai, A., 2005. *Anisotropia da irradiação solar difusa medida pelo método de sombreamento melo-escobedo: fatores de correções anisotrópicos e modelos de estimativa*. Tese Doutorado.
- Duffie, J. A. e Beckman, W. A., 1991. *Solar engineering of thermal processes*. New York: Wiley-Interscience.
- Erbs, D., Klein, S., e Duffie, J., 1982. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, vol. 28, n. 4, pp. 293–302.
- Gueymard, C. A., 2009. Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiance for solar engineering applications. *Solar Energy*, vol. 83, n. 3, pp. 432–444.
- Krenzinger, A., 1994. Sequências horárias de radiação solar. *V Encontro Nacional de Ciências Térmicas*. São Paulo.
- Krenzinger, A. e Burg, r. C., 2010. Radiasol2 software para sintetizar dados de radiação solar. *IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES CLA) y XVII Simpósio Peruano de Energía Solar (XVII SPES)*. Cuzco.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L., e Rüther, R., 2017. Atlas brasileiro de energia solar, INPE.
- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., e Menicucci, D., 1987. A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy*, vol. 39, n. 3, pp. 221–231.
- Rabl, A., 1985. *Active Solar Collectors and Their Applications*. New York: Oxford University Press.
- Sinnott, R., 1984. Virtues of the haversine. *Sky Telescope*, vol. 68, n. 158.
- Utrillas, M. e Martinez-Lozano, J., 1994. Performance evaluation of several versions of the perez tilted diffuse irradiance model. *Solar Energy*, vol. 53, n. 2, pp. 155–162.
- Yang, D., 2016. Solar radiation on inclined surfaces: Corrections and benchmarks. *Solar Energy*, vol. 136, pp. 288–302.
- Zilles, R., Macêdo, W. N., Galhardo, M. A. B., e Oliveira, S. H. F. d., 2012. *Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica*.

DEVELOPMENT OF A WEB TOOL FOR INCLINED PLAN IRRADIATION CALCULATION USING BRAZILIAN SOLARIMETRIC ATLAS DATA

Abstract. This paper presents the development of a web tool for calculating irradiation on the inclined plane that uses the values of the 2nd Brazilian Solar Energy Atlas as input data. It provides daily average monthly values. The distance between the user point and the Atlas point was calculated. The transposition model used was Perez4. The errors between the web tool and the RADIASOL tool were less than 1.4 %. The web tool is located on the site www.radiacaosolar.com.br, and it is open and free to use.

Keywords: Solar energy, Solar radiation, Web tool