

ANÁLISE DE MODELOS DE ALBEDO PARA SOLO ARENOSO NO SEMIÁRIDO DO BRASIL

João Victor Furtado^{1,2} – joao.furtado@ufpe.br

Janis Joplim Bezerra Galdino¹

Emerson Torres Aguiar Gomes¹

Rodrigo Alonso-Suárez³

Olga de Castro Vilela¹

¹Centro de Energias Renováveis, Universidade Federal de Pernambuco (CER-UFPE)

²Laboratorio Solar de UTEC, Universidad Tecnológica del Uruguay (LSU-UTEC)

³Laboratorio de Energía Solar, CENUR Litoral Norte, Universidad de la República (UDELAR)

Resumo. O notável protagonismo dos módulos bifaciais no mercado fotovoltaico desencadeou a necessidade de estimar o albedo da superfície de forma mais detalhada. Alguns tipos de solos podem apresentar características ópticas que otimizam a geração das usinas fotovoltaicas com módulos bifaciais. No semiárido brasileiro, região com elevado potencial solar, o solo típico predominante nas centrais fotovoltaicas é o solo do tipo arenoso. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de quatro modelos de albedo existentes na literatura e um modelo simplificado proposto para um solo arenoso da região de Petrolina, Pernambuco. Nessa análise, foram considerados modelos constantes, univariados e bivariados. O modelo bivarido, que considera a fração difusa e o ângulo zenital demonstrou ganhos significativos na estimativa do albedo do solo correspondendo a uma melhora de 30,6% no nRMSE, com diferença de quase 4% em relação ao modelo constante de referência (valor médio). Ainda foi observado que a depender da disponibilidade de medidas da fração difusa é recomendável aplicar modelos univariados que consideram como entrada o ângulo zenital, cuja melhora pode alcançar 15,3% no nRMSE e diferença de 1,9% frente aos modelos constantes.

Palavras-chave: Reflectância do solo, Albedo, Módulos bifaciais.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, foi registrado um forte crescimento da participação dos módulos bifaciais no mercado fotovoltaico e do emprego de sistemas de rastreamento para aumento do fator de capacidade das usinas fotovoltaicas (UFV). Em 2022 os módulos bifaciais já abarcavam uma significativa fatia de 60% do mercado total de módulos fotovoltaicos comercializados. Apesar de representarem mais da metade dos módulos comercializados, os bifaciais ainda apresentam elevada margem para crescimento, com expectativas de que até o ano de 2032, representem mais de 80% dos módulos FV comercializados no mundo (Hwang, Lee e Kang, 2023). Diante da relevância do tema no setor de energia solar fotovoltaica, surge a motivação de diversos trabalhos destinados a estudar e modelar a irradiância refletida do solo. Essa componente da irradiância é obtida pelo produto do albedo do solo, também conhecido como reflectância da superfície, com a irradiância global horizontal. A partir das informações da irradiância refletida, da difusa oriunda do céu e da direta incidente no plano do arranjo é possível estimar a energia incidente nos módulos fotovoltaicos e, conseqüentemente, estimar a geração do sistema fotovoltaico.

A modelagem de sistemas fotovoltaicos bifaciais demanda informações acuradas relacionadas ao albedo local. Os modelos de albedo existentes na literatura podem ser classificados em três categorias de complexidade crescente (Rodríguez-Muñoz *et al.*, 2022). A primeira categoria apresenta menor complexidade e considera que o solo é um refletor difuso hemisférico isotrópico e constante, ou seja, toda irradiância incidente ao longo do dia é refletida de maneira igual e sempre com a mesma intensidade. Já a segunda categoria de modelos é composta por modelos univariados que são funções do ângulo zenital (θ_z) (Psiloglou e Kambezidis, 2009) ou da fração difusa (k_d) (Ineichen *et al.*, 1990). Esse grupo de modelos apresenta variações intradiárias no albedo, geralmente atreladas à irradiância difusa ou mais frequentemente ao ângulo zenital. Por fim, a terceira categoria corresponde aos modelos bivariados que consideram ambas informações, o ângulo zenital e a fração difusa. Vale salientar que os modelos que requerem informações da fração difusa (segunda e terceira categorias) são modelos de maior complexidade devido à necessidade de implementação de sensores de maior custo associado, já os modelos de primeira, e alguns de segunda categoria, podem ser aplicados somente com a irradiância global horizontal apresentando assim, maior facilidade na implementação.

Rodríguez-Muñoz *et al.* (2022) avaliaram o desempenho de seis modelos existentes na literatura (sendo 2 de cada categoria) para estimar o albedo da região da Pampa úmida, onde o solo é coberto majoritariamente por pasto natural (gramíneas). Os autores observaram que os modelos da categoria 3, com destaque ao modelo de Tuomiranta *et al.* (2021) obtiveram os melhores resultados estatísticos para o solo avaliado. Em Tuomiranta *et al.* (2021), 20 modelos pré-existent e 6 novos modelos propostos pelos autores foram avaliados para 26 localidades distribuídas ao longo do planeta

para diferentes climas. Os autores ressaltam a importância de aplicar modelos da categoria 1 ou 2 frente ao uso de valores constantes de albedo, alertando sobre potenciais erros nas simulações quando considerados valores constantes de bases de dados.

Dessa forma, é fundamental aplicar modelos uni ou bivariados com os coeficientes adequados às características específicas da região de interesse (clima e tipo de solo). Além disso, o ajuste dos coeficientes para implementação dos modelos demanda a realização de medições *in-situ* do albedo, permitindo a identificação do modelo mais adequado. No documento de Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à Participação nos Leilões de Energia Elétrica da EPE (EPE, 2021), para a certificação de produção anual de energia são demandadas análises de albedo para a usina. O documento recomenda também campanhas de medições dessa variável para auxiliar na estimativa de produção de energia de usinas com módulos fotovoltaicos bifaciais.

Considerando-se que a região semiárida brasileira é uma das regiões no Brasil que apresenta maior potencial solar e que climas com características áridas tendem a favorecer os modelos univariados de cálculo de albedo (Tuomiranta *et al.*, 2021), propõe-se, neste trabalho avaliar o desempenho de quatro modelos de albedo existentes na literatura para a localidade de Petrolina (Pernambuco), cujo clima é o semiárido seco (BSH da classificação atualizada de Köppen-Geiger; Peel *et al.*, 2007) e cujo solo é arenoso, característico da região. Adicionalmente, esses modelos são comparados a um modelo de categoria 1, proposto no presente trabalho, que considera a fração difusa diária na análise.

2. MODELOS DE ALBEDO

A estimativa da irradiância no plano do arranjo fotovoltaico é realizado por meio da transposição das componentes da irradiância incidentes no plano horizontal (global, direta e difusa) para o plano inclinado. A irradiância refletida que incide no módulo é obtida pela relação do albedo da superfície com a irradiância global horizontal. Dessa forma, a reflectância da superfície (albedo) é definida a partir da Eq. (1).

$$\rho = \frac{RHI}{GHI} \quad (1)$$

onde GHI corresponde a irradiância global horizontal, RHI a irradiância refletida pelo solo e ρ a reflectância do solo, albedo. Esse último parâmetro é conhecido por variar em função de diversos fatores, como a natureza do solo, o ângulo zenital, a nebulosidade, presença ou não de neve, entre outros fatores (THEVENARD *et al.*, 2006).

Os modelos de albedo da primeira categoria correspondem a valores médios e constantes. Dessa categoria o modelo de média aritmética da medição é utilizado no presente trabalho (Eq. (2)).

$$\rho_{1,Méd} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i \quad (2)$$

onde ρ_i representa o valor de ρ para cada instante i . A média aritmética é obtida para todos os valores de albedo da série temporal medida.

Dois modelos univariados da categoria 2 são considerados, onde o primeiro é proposto em Tuomiranta *et al.* (2021) e o segundo é uma função de segundo grau apresentado em De Medeiros *et al.* (2022a) aplicado para estimar a irradiância no plano inclinado. Modelos na forma de equação polinomial também são observados em Wang *et al.* (2005).

$$\rho_{2,T1} = \rho_n \frac{1 + b}{1 + b \cos \theta_z} \quad (3)$$

$$\rho_{2,M} = 0,0014 \theta_z^2 - 0,0289 \theta_z + 25,6851 \quad (4)$$

Onde θ_z corresponde ao ângulo zenital, ρ_n e b são parâmetros ajustáveis, o primeiro corresponde ao albedo em incidência normal, ou seja, o albedo médio para os instantes de tempo em que o ângulo zenital está entre 0° e 5° (TUOMIRANTA *et al.*, 2021). Já o b é um coeficiente de ajuste, cujo valor deve estar compreendido entre 0 e 2.

Um último modelo existente na literatura e adotado no presente trabalho corresponde ao modelo bivariado de Tuomiranta *et al.* (2021) que considera duas variáveis de entrada (θ_z e k_d), além de três parâmetros ajustáveis, sendo o coeficiente b , o albedo em incidência normal, ρ_n , e o albedo referente a irradiância difusa, ρ_d . Este último representa o albedo médio com base em momentos de baixa irradiância direta (Ineichen *et al.*, 1990), calculado neste trabalho, como o albedo médio dos dias em que a irradiância direta normal não ultrapassou o valor de 50 W/m^2 em nenhum momento. O modelo $\rho_{3,T2}$ da categoria 3, é escrito segundo a Eq. (5).

$$\rho_{3,T2} = (1 - k_d) \rho_n \frac{1 + b}{1 + b \cos\theta_z} + k_d \rho_d \quad (5)$$

Além dos modelos apresentados, o presente trabalho apresenta uma proposta de modelo simplificado que considera a média do albedo diário em função da fração difusa diária, o modelo é então avaliado na seção 4.3.

3. METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho inicia com a aquisição, tratamento e garantia de qualidade dos dados medidos, correspondendo à etapa de processamento dos dados. Em segundo momento, os modelos são calibrados para o tipo de solo tipicamente arenoso predominante da região semiárida brasileira, onde foi utilizada a técnica de regressão linear aplicada a conjuntos de dados de treinamento e teste. Em seguida, o albedo local é analisado e um modelo de categoria 1 é proposto. Por fim, com os coeficientes dos modelos definidos para as características locais e os 5 modelos de albedo foram avaliados. Nas seções a seguir, são detalhadas cada uma das etapas da metodologia aplicada.

3.1 Base de dados

Os dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos a partir de duas estações meteorológicas situadas em Petrolina, de clima semiárido quente, BSh segundo a classificação Köppen-Geiger. As estações estão distanciadas de 75 metros e instaladas no Centro de Referência em Energia Solar de Petrolina (CRESP), cuja latitude é de 9,11 °S, longitude de 40,44 °O, altitude de 385 m em relação ao nível do mar. A Estação UFPE (Fig. 1.a) instalada no CRESP dispõe de sensores fotovoltaicos da LI-COR, modelo Li-200R, faixas de medição de 0 a 25 mV, faixa espectral de 400 nm a 1100 nm com tempo de resposta inferior a 1µs, para medições da irradiância refletida horizontal e global horizontal, além da irradiância no plano inclinado para diferentes orientações, conforme analisado em De Medeiros *et al.* (2022a), já a Estação Solarimétrica do CRESP compreende as medições da irradiância global horizontal, direta normal, difusa horizontal, precipitação e outras variáveis meteorológicas (Fig. 1.b). A instrumentação para medição da DHI e DNI é obtida a partir do solar tracker da marca EKO, modelo STR-22 SET 10, onde os sensores para medição da irradiância DHI corresponde ao piranômetro da EKO, modelo MS-80 (classe A), faixa de medição de 0 a 4000 W/m², faixa espectral de 285 nm a 3000 nm com tempo de resposta de 0,5s. Já a medição da irradiância direta normal é obtida pelo pireliômetro também da marca EKO, modelo MS-57 (classe A), com mesma faixa de medição e tempo de resposta, faixa espectral de 20 nm a 4000 nm. A Fig. 1 contempla as estações utilizadas no presente trabalho.

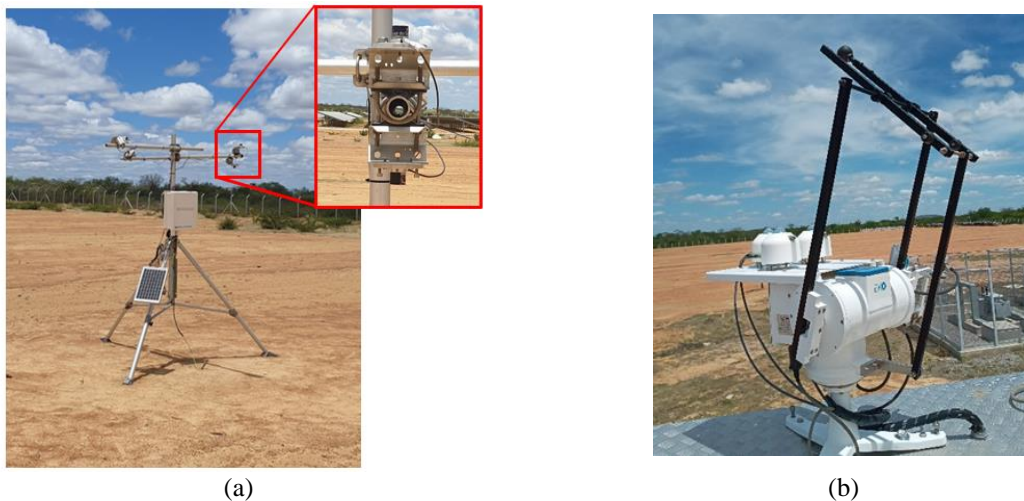


Figura 1 – Estações Solarimétricas adotadas para medição de:
a) Albedo (*RHI* e *GHI*). b) Irradiância Direta e Difusa (*DHI* e *DNI*).

Os sensores fotovoltaicos utilizados foram calibrados previamente e durante o período de calibração com um piranômetro padrão secundário da Kipp & Zonen modelo CMP22. As incertezas típicas da instrumentação FV e térmica para medição das componentes solarimétricas são de até ±5%, sendo esse valor inferior aos erros obtidos pelos modelos.

Além disso, os dados utilizados neste trabalho foram medidos a cada segundo e registrados na frequência de 1 em 1 minuto desde o dia 03 de dezembro de 2021 até o dia 27 de abril de 2022. Segundo Tuomiranta *et al.* (2021), independentemente do modelo escolhido, quando a calibração dos modelos é realizada com dados de meses próximos ao solstício de verão (como é o caso deste período de dados medidos), as parametrizações obtidas fornecem bom desempenho.

3.2 Processamento dos dados

Os dados adquiridos na resolução temporal de 1 minuto foram integrados na escala de 10 minutos visando atenuar o efeito da distância espacial entre as estações solarimétricas de direta/difusa e de albedo, além disso a integração dos períodos permite suavizar o efeito da sobreirradiação produzido pelo efeito de borda de nuvem (De Andrade e Tiba, 2016) nas análises dos modelos.

A garantia de qualidade empregada no processamento dos dados corresponde a filtros da *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN) e outros filtros adotados em Petribú *et al.* (2017) e Rodríguez-Muñoz *et al.* (2022). Os primeiros testes aplicados no conjunto de dados correspondem a testes globais discutidos em Petribú *et al.* (2017), relacionados à descontinuidade, dados faltantes e duplicados. Após os testes globais serem implementados, os primeiros filtros consistem nos limites físicos da BSRN sendo adotados como filtros F1, F2, F3 e F4, respectivamente às séries temporais de *GHI*, *DNI*, *DHI* e *RHI*. Os limites físicos são impostos pela relação da Eq. (6).

$$b \leq G \leq (S_0/AU) p (\cos \theta_z)^a + c \quad (6)$$

Onde G corresponde a irradiância avaliada, sendo *GHI*, *DHI*, *DNI* ou *RHI*, S_0 a constante solar correspondendo a 1367 W/m², AU a distância Sol-Terra em unidades astronômicas, variando de 1,016682 em Julho a 0,983277 em Janeiro (AMEEN *et al.*, 2018), p , a , b e c correspondem a coeficientes adotados para cada tipo de variável avaliado.

O filtro F5 corresponde aos momentos de Sol baixo onde os erros são mais significativos, o limite de θ_z adotado é semelhante a Rodríguez-Muñoz *et al.* (2022), sendo de até 80° (ou seja, altura solar maior que 10°). Já o filtro F6 representa a consistência de parâmetros referentes à equação do balanço de energia radiativa, onde a tolerância permitida entre a irradiância global medida e a irradiância global calculada a partir de *DHI* e *DNI* é de 8% para momentos de θ_z inferior a 75°, e de 15% para momentos de θ_z superior a 75°. Semelhante a Petribú *et al.* (2017), para esse filtro, são considerados tais intervalos para momentos que a irradiância é superior a 50 W/m².

Testes comparativos propostos em Raichijk (2012) são adotados como o filtro F7 e relacionam as variáveis k_t e k_d atribuindo limites para cada uma das variáveis, onde momentos em que os parâmetros não estejam inseridos na faixa permitida são considerados anômalos.

Por fim, três filtros são considerados ainda, o F8 que corresponde ao intervalo permitido para o albedo, correspondendo a valores entre 0 e 1 (ou 0 e 100%). O F9 que consiste no período de dados faltantes das componentes direta e difusa e o F10 que consiste no teste de envelope de Rodríguez-Muñoz *et al.* (2022). Esse último teste é um filtro cujos valores que ultrapassem a média da medição em até 2 desvios padrões são retirados da análise, em Rodríguez-Muñoz *et al.* (2022) foi adotado 3 desvios padrões, entretanto no presente trabalho foi adotado o mesmo valor do teste de envelope de Petribú *et al.* (2017). Uma vez aplicados todos os filtros os dados podem ser implementados para calibração e validação dos modelos.

3.3 Calibração dos coeficientes dos modelos

A calibração dos coeficientes b dos modelos univariado e bivariado de Tuomiranta *et al.* (2021) é realizado a partir da função *curve fit* existente em *python*, essa função permite encontrar o valor ótimo de parâmetros desejados da função definida a partir de entradas e saídas declaradas. Uma vez que temos todas as informações de entrada dos modelos $\rho_{2,T1}$ e $\rho_{3,T2}$, é possível determinar o alvo (saída) para o qual o coeficiente b ótimo deve ser calculado. A série temporal foi separada aleatoriamente em 60% dos dados para treino e 40% dos dados para validação, o procedimento foi realizado 100 vezes e a distribuição dos valores ótimos do coeficiente b para cada um dos dois modelos foi analisada.

3.4 Métricas de desempenho

O albedo do solo estimado foi validado estatisticamente com base nas relações *RHI* sobre *GHI* medidas na Estação UFPE. Os parâmetros estatísticos considerados são o erro médio (nMBE), o erro médio absoluto (nMAE) e a raiz do erro quadrático médio (nRMSE) normalizados pela média. Modelos mais acurados são caracterizados por exibir baixos valores de nMBE, nMAE e nRMSE, sendo desejável que esses valores se aproximem de zero. No caso do primeiro indicador, ele revela a medida em que o modelo subestima ou superestima os resultados reais (nMBE), podendo apresentar valores negativos ou positivos, por exemplo quando o nMBE é negativo, o modelo subestima os valores medidos, apresentando valores inferiores à medição. Já o nMAE e o nRMSE apresentam valores somente positivos, onde modelos mais acurados apresentam valores mais próximos de zero. O nMAE trata da média das diferenças absolutas entre a estimativa e a medição, fornecendo uma magnitude média dos erros, e o nRMSE fornece informações sobre a dispersão dos dados, fazendo uma comparação termo a termo do desvio real entre os dados medidos e os dados simulados pelo modelo.

4. RESULTADOS

O procedimento de garantia de qualidade é implementado para os dados na resolução de 10-min e não noturnos, sendo aplicados todos os 10 filtros abordados na seção 3.1. A Tab. 1 apresenta os filtros adotados com suas respectivas equações, variáveis consideradas, dados de saída após aplicação do filtro e o percentual de dados descartados. O percentual de dados descartados considera a aplicação do filtro avaliado, cujo total indica o total de dados descartados com a aplicação de todos os filtros.

Tabela 1 – Filtros aplicados no procedimento de Garantia de Controle de qualidade dos dados utilizados.

FILTRO	TESTE	EQUAÇÕES	VARIÁVEIS	DADOS DE SAÍDA	PERCENTUAL DE DADOS DESCARTADOS
F1	Testes da BSRN	$-4 \leq GHI \leq \left(\frac{S_0}{AU}\right) 1,5 (\cos \theta_z)^{1,2} + 100$	<i>GHI</i>	10469	0,0 %
F2		$-4 \leq DNI \leq \left(\frac{S_0}{AU}\right)$	<i>DNI</i>	10469	0,0 %
F3		$-4 \leq DHI \leq \left(\frac{S_0}{AU}\right) 0,95 (\cos \theta_z)^{1,2} + 50$	<i>DHI</i>	10469	0,0 %
F4		$-4 \leq RHI \leq \left(\frac{S_0}{AU}\right) 0,95 (\cos \theta_z)^{1,2} + 50$	<i>RHI</i>	10469	0,0 %
F5	Ângulo zenital	$\theta_z \leq 80^\circ$	Todas	9194	12,18 %
F6	Balanço das irradiâncias	I) $\left \frac{(DNI \cos \theta_z + DHI) - GHI}{GHI} \right \leq 0,08$ para $\theta_z < 75^\circ$ e $(DNI \cos \theta_z + DHI) > 50 W/m^2$ II) $\left \frac{(DNI \cos \theta_z + DHI) - GHI}{GHI} \right \leq 0,15$ para $\theta_z > 75^\circ$ e $(DNI \cos \theta_z + DHI) > 50 W/m^2$	<i>GHI, DNI e DHI</i>	9555	8,73 %
F7	Testes comparativos dos parâmetros	I) $k_d < 1,05$ para $\theta_z < 75^\circ$ e $GHI > 50 W/m^2$ II) $k_d < 1,1$ para $\theta_z > 75^\circ$ e $GHI > 50 W/m^2$ III) $k_d \geq 0,9$ para $k_t < 0,2$ IV) $k_d \leq 0,8$ para $k_t > 0,6$	<i>GHI e DHI</i>	10258	2,02 %
F8	Limites do albedo	$0 \leq \rho_g \leq 1$	<i>GHI e RHI</i>	10403	0,63 %
F9	Período sem DHI e DNI	28-12-2021 a 19-01-2022	<i>GHI e RHI</i>	8665	17,23 %
F10	Teste do envelope	$ \rho_g - \bar{\rho}_g \leq 3\sigma$	<i>GHI e RHI</i>	10153	3,02 %
Todos	Controle de Qualidade	-	Todas	6529	37,63 %

Após aplicar o controle de qualidade nos dados originais, observa-se a redução da nuvem de pontos nos gráficos da Fig. 2, onde os dados em cinza correspondem aos dados originais e os dados em laranja correspondem aos dados de saída do procedimento de controle de qualidade. Foram descartados 37,63% dos dados de entrada.

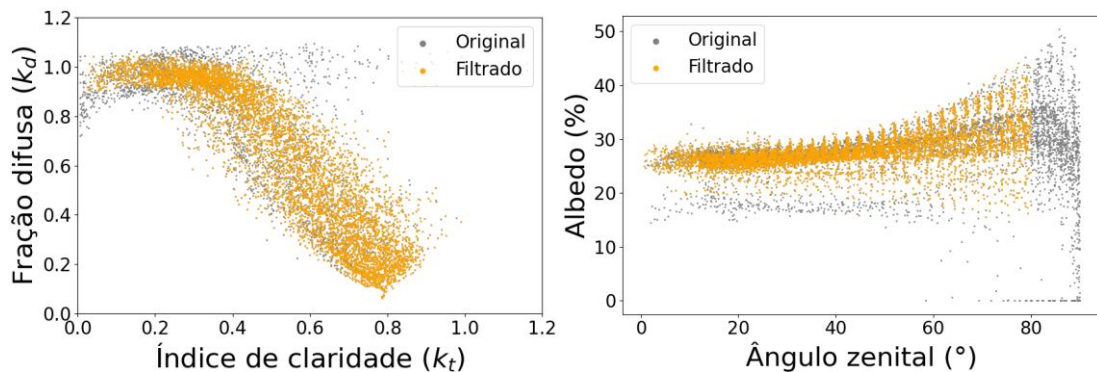


Figura 2 – Dispersão k_d vs k_t dos dados originais e filtrados e do albedo vs θ_z .

4.2 Análise do albedo local

Com base nos dados filtrados pelos procedimentos de garantia de qualidade os dados de albedo foram analisados mensalmente e para toda a série temporal, de forma que o albedo médio para o tipo de solo arenoso teve média de 27,84 % e variações mensais de 27,29 % a 28,69 %, conforme pode ser observado na Tab. 2.

Tabela 2 – Valores médios do albedo tipicamente arenoso de Petrolina.

MESES	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	TOTAL
ALBEDO	27,29 %	28,39 %	28,69 %	27,81 %	27,30 %	27,84%

A variação entre a menor e a maior média mensal observada é de até 1,4 %, sendo a média dos dados tratados de 27,84 %. Foram observados nos dados de albedo variações em função da precipitação diária. Na literatura é verificado que as condições do solo, seja de rugosidade ou de umidade influem no albedo da superfície (Matthias et al., 2000). A partir da Fig. 3 é possível observar que em dias de elevada precipitação o albedo médio diário reduz.

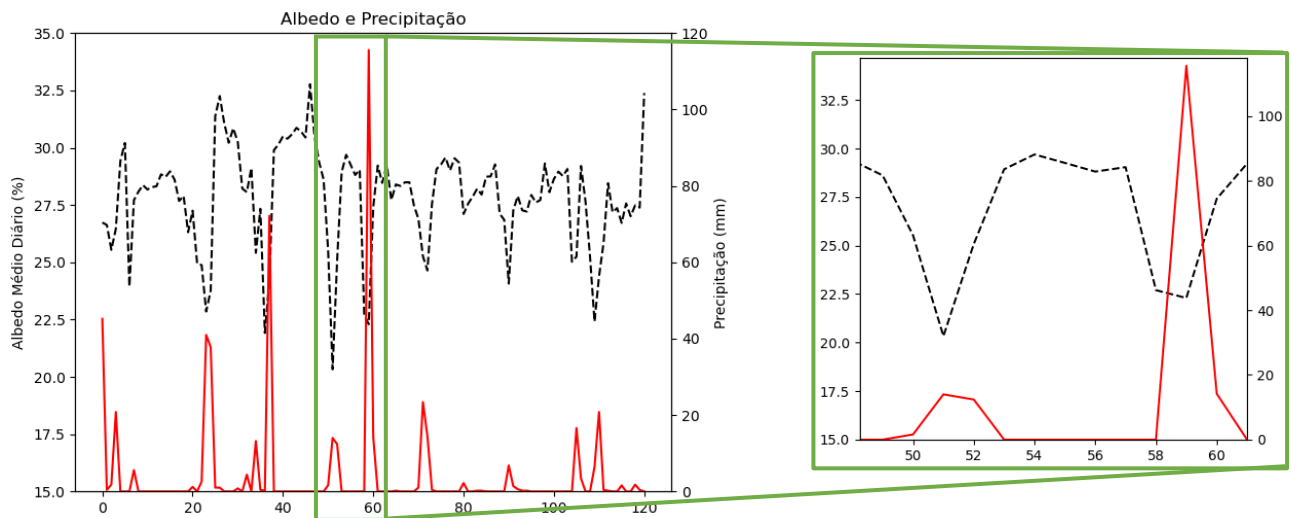


Figura 3 – Albedo médio diário (em preto) e precipitação (em vermelho) para todos os dias avaliados.

Ao avaliar o comportamento das variáveis da Fig. 3, observa-se que em alguns dias de pouca precipitação o albedo médio diário é também reduzido a valores entre 20 % e 21 % como pode ser observado nos dias 50 a 52. Esse fato se deve à redução da irradiância direta ao longo do dia, acarretando na diminuição da reflexão da irradiância direta pelo solo, isso pode ser verificado na Fig. 4 ao visualizar as variáveis albedo médio diário e a fração difusa diária.

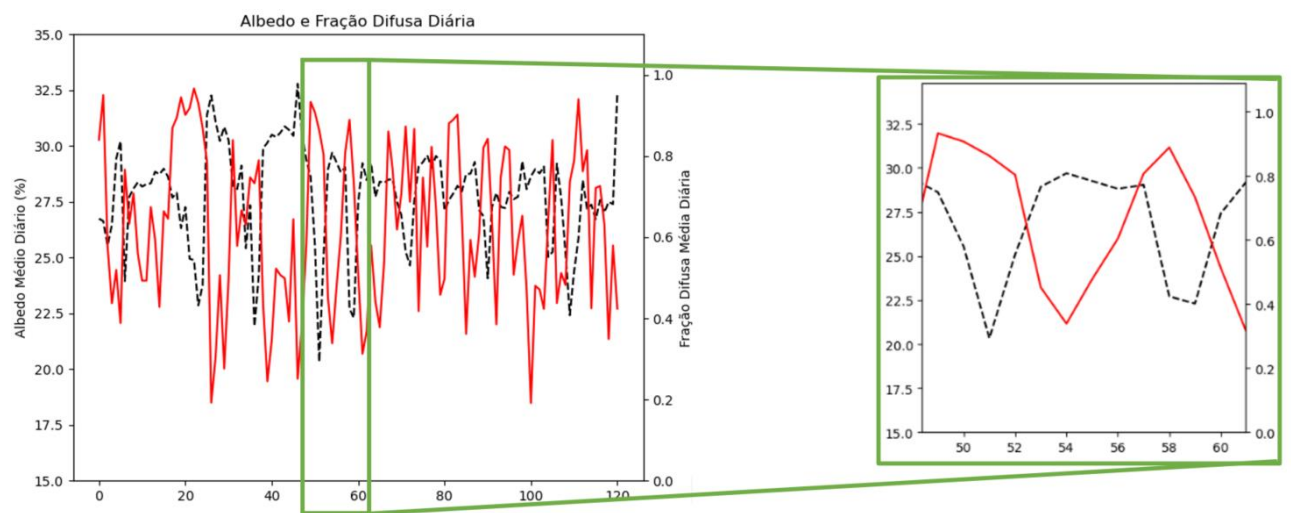


Figura 4 – Albedo médio diário (em preto) e fração difusa diária (em vermelho) para todos os dias avaliados.

A partir da Fig. 4 é possível observar uma relação inversa entre as variáveis, a tendência negativa entre a fração difusa e o albedo diário médio é também demonstrada na Fig. 5, onde dias nublados (elevado K_d) tendem a apresentar albedo mais baixo, enquanto em dias de baixa nebulosidade (baixo K_d) o albedo tende a ser mais elevado. A relação de

decaimento do albedo diário médio com a fração difusa diária média permite estabelecer um novo modelo de média aritmética, ou seja, de primeira categoria, que demanda o conhecimento da irradiância difusa para cálculo do K_d diário. O modelo aqui proposto é chamado de $\rho_{1,AD}$, sendo o 1 referente a categoria 1 adotada e o AD referente ao albedo diário, onde o valor do albedo calculado pela equação deve ser constante durante todo o dia.

$$\rho_{1,AD} = -6,628 K_d + 31,95 \quad (7)$$

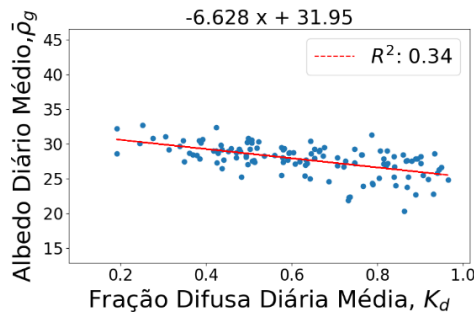


Figura 5 – Relação entre o Albedo diário médio e a fração difusa diária.

O modelo proposto é uma relação linear ($y = a.x + b$), onde y corresponde ao albedo médio diário e x à fração difusa diária média. Os coeficientes a e b correspondem aos números apresentados no gráfico e na Eq. (7), caracterizando os coeficientes para as condições climáticas e de solo avaliadas. Já para os modelos pré existentes, uni e bivariados de Tuomiranta *et al.* (2021), o ajuste dos coeficientes deve ser realizado.

4.3 Calibração dos modelos

Os parâmetros dos modelos $\rho_{2,T1}$ e $\rho_{3,T2}$ (albedos e coeficientes b) foram ajustados para as condições de solo e climáticas avaliadas. Os coeficientes de albedo relacionando a direta ρ_n e a difusa ρ_d foram calculados conforme descrito na seção dos modelos de albedo e no artigo de Ineichen *et al.* (1990). Já os coeficientes b de ambos modelos foram considerados como os valores médios da regressão realizada com o conjunto de dados de teste. Toda a série temporal foi separada em treinamento e teste (60:40) por 100 vezes, a cada processo de separação o coeficiente b foi ajustado para o modelo uni e bivariado e registrado, após as 100 separações o valor médio de b foi considerado para validação dos modelos.

A Tab. 3 apresenta os valores dos albedos e dos coeficientes obtidos. Foram consideradas e verificadas as limitações mencionadas em Tuomiranta *et al.* (2021) para o modelo bivariado, onde $b \in [0,2]$ e $\rho_n \in [0, \rho_d]$.

Tabela 3 – Coeficientes calibrados para os modelos uni e bivariados de Tuomiranta *et al.* (2021).

MODELO	ρ_n	b	ρ_d
$\rho_{2,T1}$	0,261	0,268	-
$\rho_{3,T2}$	0,260	1,055	0,260

4.4 Resultados dos modelos de albedo

Com os modelos calibrados é possível validar os modelos analisados, as Fig. 6a e 6b apresentam respectivamente os modelos da categoria 1 e 2, e o modelo bivariado da categoria 3.

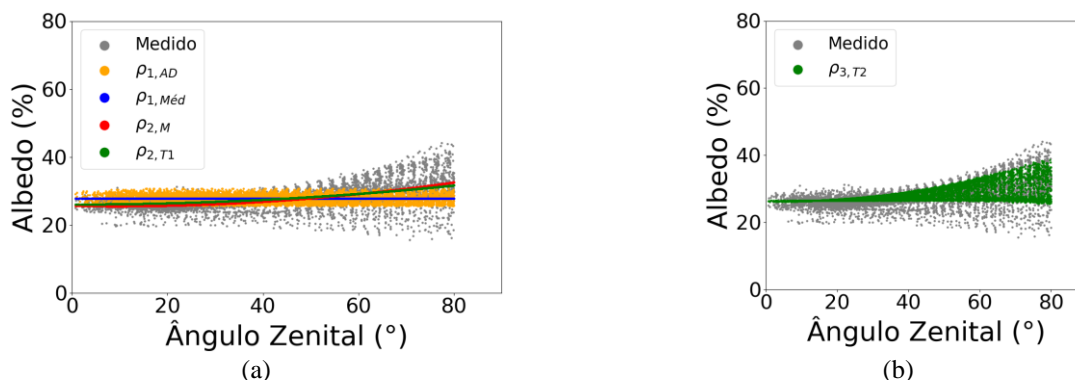


Figura 6 – Dispersão albedo vs ângulo zenital (°) dos modelos de a) categoria 1 e 2. b) categoria 3.

Observa-se a partir da Fig. 6 que o modelo proposto no presente trabalho apresenta uma elevada dispersão de pontos na horizontal no gráfico de dispersão. A elevada dispersão é devido ao modelo atribuir diferentes valores de albedo em função da fração difusa diária, assim para cada dia existirá um valor de albedo constante seguindo toda a variação da trajetória solar, ou seja, desde valores elevados de ângulo zenital até valores pequenos e por fim retornando a valores elevados.

Ainda na Fig. 6 é possível observar que o modelo de categoria 3 proposto por Tuomiranta *et al.* (2021) apresenta uma dispersão mais correspondente à dispersão de dados medidos (em cinza). Esse maior ajuste é observado também nas séries temporais (Fig. 7), onde o incremento da informação da fração difusa no modelo permite o seguimento de picos e vales provocados pela variabilidade da irradiância e que não são observados pelos modelos de categoria 1 e 2. A Fig. 7 e a Tab. 4 apresentam as séries temporais e os indicadores estatísticos dos modelos.

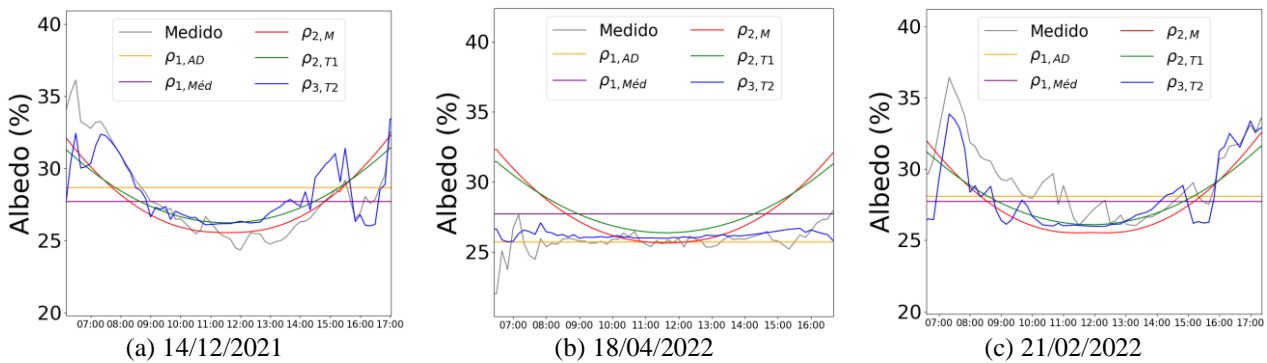


Figura 7 – Série temporal do albedo modelado pelos 5 modelos e a medição (em cinza).

Tabela 4 – Resultados estatísticos dos modelos avaliados para Petrolina.

Modelo	nMAE (%)	nMBE (%)	nRMSE (%)
$\rho_{1,Méd}$	8,8	-0,4	12,4
$\rho_{1,AD}$	8,7	-0,1	11,7
$\rho_{2,M}$	7,1	-0,4	10,5
$\rho_{2,T1}$	7,1	0,7	10,5
$\rho_{3,T2}$	6,6	-0,1	8,6

A partir da Fig. 7 é possível observar que os modelos de categoria 2 e 3 tendem a descrever a variação intradiária esperada do albedo, entretanto em dias muito nublados, como o dia 18/04/2022, o albedo tende a não apresentar variação e os modelos de categoria 2 são desfavorecidos. Em dias de céu variado como observado nas Fig. 7a e 7c, o modelo bivariado de Tuomiranta *et al.* (2021), $\rho_{3,T2}$, tem maior capacidade de descrever a variabilidade da irradiância provocada pela nebulosidade. A boa descrição do modelo reflete nos estatísticos da Tab. 4, cujo nRMSE apresenta diferenças significativas dos modelos de categoria 1, totalizando 3,8% de diferença do modelo $\rho_{1,Méd}$ (ganho de 30,6%), 2,2% em termos de erro médio absoluto normalizado e melhora de 0,3 % no nMBE.

O modelo proposto no presente trabalho, $\rho_{1,AD}$, apresenta ligeira melhora sobre o $\rho_{1,Méd}$ nos estatísticos, sendo de 0,7% no nRMSE e 0,3 % no nMBE, mesmo se tratando de um modelo de categoria 1 possui melhor capacidade de descrever o albedo do solo do que simplesmente uma média global. A notar que o modelo demanda o conhecimento da componente difusa para cálculo da fração difusa diária média, reduzindo a simplicidade do modelo.

5. CONCLUSÕES

A análise de diferentes modelos utilizados na estimativa do albedo do solo foi realizada para uma localidade do semiárido brasileiro com um solo predominantemente arenoso, característico da região. Inicialmente, os dados foram tratados seguindo um procedimento de garantia de qualidade de dados para retirada de dados anômalos. Em seguida, o estudo do albedo local foi realizado observando um albedo médio do solo de 27,84%, além também de variações do albedo em função das precipitações e da fração difusa diária. As análises conduzidas com essa última variável em termos diários motivou a proposição do modelo $\rho_{1,AD}$, que consiste em um modelo de categoria 1, sendo calculado como albedo médio diário obtido em função da fração difusa diária. Esse modelo e mais outros 4 modelos da literatura foram avaliados possibilitando destacar quatro principais pontos com o presente trabalho: (i) apesar de considerar variáveis importantes na análise do albedo, como a fração difusa, os modelos de categoria 1 (constantes) tendem a apresentar erros superiores aos modelos da categoria 2 ou 3; (ii) o modelo de categoria 3, que considera informações da irradiância difusa, como o k_d , e o ângulo zenital possibilita ganhos elevados na estimativa do albedo do solo, com diferenças de até 3,8% no nRMSE

em relação a modelos que são bastante implementados nas simulações de sistemas fotovoltaicos como os de categoria 1; (iii) o modelo bivariado de Tuomiranta *et al.* (2021) apresenta elevada capacidade de descrever o comportamento do albedo, é verificado que em dias de maior variabilidade no albedo ou dias nublados (cujo albedo tende a se manter constante) o modelo $\rho_{3,T2}$ estima bem a refletância do solo, fato esse que também é verificado a partir dos estatísticos; (iv) a depender da disponibilidade dos dados da fração difusa, é recomendável aplicar modelos univariados, pois estes apresentam diferenças no nRMSE de quase 2% do modelo constante. Como perspectivas futuras, almeja-se avaliar e modelar o mesmo tipo de solo em outras localidades visando estudar os coeficientes de ajuste dos modelos para esse tipo de solo e clima. Além disso, novos modelos uni e bivariados devem ser considerados em análises futuras, como também aplicar a irradiância difusa modelada (de Medeiros *et al.*, 2022b) para verificar se é possível adotar uma metodologia que não necessite de medições da fração difusa.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF por meio dos projetos CVI 80.2020.0010.00 e CVI 70.2020.2221.00 no âmbito dos Programas de P&D ANEEL, como também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS

- Ameen, B., Balzter, H., Jarvis, C., 2018. Quality control of global horizontal irradiance estimates through BSRN, TOACs and air temperature/sunshine duration test procedures. *Climate*, Vol. 6(3), 69.
- De Andrade, R.C. Tiba, C., 2016. Extreme global solar irradiance due to cloud enhancement in northeastern Brazil, *Renewable Energy*, Vol. 86, pp. 1433-1441.
- De Medeiros, J.V.F.F., Barboza, L., Galdino, J., Gomes, E., Jatoba, E., Miranda, D., Neto, A., Pereira, A., Vilela, O., de Melo Filho, J.B., 2022a. A Comparison of Eight Transposition Models Applied for Different Orientations Under Different Albedo Scenarios, *Solar Resources and Energy Meteorology*, EuroSun 2022.
- De Medeiros, J. V. F., Barboza, L. E., Miranda, D. R., Vilela, O. C., Gomes, E. T., & Salazar, G., 2022b. Modelos de separação o de GHI: validação para dados de 1-min e análise do impacto na geração de sistemas fotovoltaicos em baixa latitude. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 26, 291-302.
- EPE, 2022. Expansão da Geração, Empreendimentos Fotovoltaicos: Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à Participação nos Leilões de Energia Elétrica, Empresa de Pesquisa Energética.
- Hwang, S., Lee, H., Kang, Y., 2023. Energy yield comparison between monofacial photovoltaic modules with monofacial and bifacial cells in a carport, *Energy Reports*, Vol. 9, pp. 3148-3153.
- Ineichen, P., Guisan, O., Perez, R., 1990. Ground-reflected radiation and albedo, *Solar Energy*, Vol. 44(4), pp. 207-214.
- Matthias, A.D., Fimbres, A., Sano, E.E., Post, D.F., Accioly, L., Batchily, A.K., Ferreira, L.G., 2000. Surface roughness effects on soil albedo, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 64(3), pp. 1035-1041.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, Vol. 11, pp. 1633-1644.
- Petribú, L.B., Sabino, E., Barros, H., Costa, A., Barbosa, E., Vilela, O.C., 2017. Procedimento objetivo para a garantia de qualidade de dados de radiação solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 21, pp. 67-78.
- Psiloglou, B.E., Kambezidis, H.D., 2009. Estimation of the ground albedo for the Athens area, Greece, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 71(8–9), pp. 943-954.
- Raichijk, C., 2012. Control de calidad de mediciones de radiación solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 16, pp. 11.17-11.22.
- Rodríguez-Muñoz, J.M., Alonso-Suárez, R., Bove, I., Abal, G., 2022. Evaluación de seis modelos empíricos para estimar albedo de suelo en la Pampa Húmeda. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 26, pp. 357-368.
- Thevenard, D., Haddad, K., 2006. Ground reflectivity in the context of building energy simulation, *Energy and Buildings*, Vol. 38(8), pp. 972-980.
- Tuomiranta, A., Alet, P.-J., Ballif, C., y Ghedira, H., 2021. Worldwide performance evaluation of ground surface reflectance models, *Solar Energy*, Vol. 224, pp. 1063-1078.
- Wang, Z., Barlage, M., Zeng, X., Dickinson, R.E., Schaaf, C.B., 2005. The solar zenith angle dependence of desert albedo, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L05403.

ANALYSIS OF ALBEDO MODELS FOR SANDY SOIL IN THE BRAZILIAN SEMIARID

Abstract. The notable protagonism of bifacial modules in the photovoltaic market has triggered the need to estimate surface albedo more accurately. Some types of soil can have optical characteristics that optimize the generation of bifacial plants. In semi-arid Brazil, a region with high solar potential, the typical soil used in photovoltaic plants is sandy. With this in mind, the aim of this study is to evaluate the performance of four albedo models in the literature and a simplified model proposed for sandy soil in the region of Petrolina, Pernambuco. In this analysis, constant, univariate

and bivariate models were considered. The bivariate model, which takes into account the diffuse fraction and the zenith angle, showed significant gains in estimating soil albedo, corresponding to a 30.6% improvement in nRMSE, with a difference of almost 4% in relation to the constant reference model (average value). It was also observed that depending on the availability of diffuse fraction measurements, it is advisable to apply univariate models that take the zenith angle as input, whose improvement can reach 15.3% in nRMSE and a difference of 1.9% compared to the constant models.

Keywords: Soil reflectance, Albedo, Bifacial modules