

AVALIAÇÃO DE MODELOS UTILIZADOS NA ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO DIFUSA NA RESOLUÇÃO DOS MINUTOS PARA UMA CIDADE DE BAIXA LATITUDE

João Victor Furtado Frazão de Medeiros – joao.furtado@ufpe.br

Diego Rodrigues de Miranda - diego.rmiranda@ufpe.br

Emerson Torres Aguiar Gomes - emerson.torres@ufpe.br

Olga C. Vilela - olga.vilela@ufpe.br

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

Alex Coutinho Pereira - alexcp@chesf.gov.br

Eduardo Boudoux Jatoba - ejatoba@chesf.gov.br

Alcides Codeceira Neto - alcidesc@chesf.gov.br

José Bione de Melo Filho - jbonef@chesf.gov.br

Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF)

Resumo. A simulação de sistemas fotovoltaicos e térmicos demanda o conhecimento acurado da radiação que incide no plano dos módulos fotovoltaicos e coletores térmicos. Muitas vezes as componentes difusa e direta não são medidas, sendo necessário decompor a irradiância global horizontal nas demais componentes para posterior transposição para o plano inclinado. No presente estudo, doze modelos de separação da irradiância do plano horizontal foram aplicados para a região de Petrolina-PE localizada no semiárido brasileiro. Os modelos de separação foram avaliados para dados na escala dos minutos, fornecendo uma maior descrição do comportamento da radiação. A comparação estatística foi realizada para componente difusa por meio do erro médio, raiz do erro quadrático médio, razão entre os desvios padrões, correlação e pelo skill score, uma análise gráfica foi conduzida utilizando o diagrama de Taylor. Os modelos multiparâmetros de Engerer, Perez e Skartveit apresentaram os melhores resultados para Petrolina (latitude de 9,11°S) com correlação entre 0,85 e 0,88 e skill score entre 0,72 e 0,77, corroborando com resultados obtidos anteriormente para o modelo de Skartveit na escala horária e Engerer e Perez na escala dos minutos para localidades de clima similar.

Palavras-chave: Irradiância difusa, Modelos de decomposição, Resolução minuto a minuto.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das três componentes da radiação, irradiância global horizontal (GHI), direta normal (DNI) e difusa horizontal (DHI) é fundamental na simulação de sistemas fotovoltaicos (FV) e térmicos. Para definir a irradiância que incide no plano dos coletores/módulos FV é necessário primeiramente encontrar pelo menos duas componentes (a terceira é diretamente estimada), em seguida transpor essas componentes para o plano inclinado referente ao plano do arranjo. Algumas vezes podem estar disponíveis aos projetistas todas as componentes do plano horizontal, entretanto, na maior parte das localidades as componentes difusa e direta não são medidas, uma vez que demandam maior investimento inicial e esforço operacional na utilização de dispositivos de rastreamento para medição da irradiância direta e difusa (Starke *et al.*, 2018). Dessa forma, os dados solarimétricos de entrada utilizados pelos projetistas nas simulações são geralmente atrelados à irradiância global no plano horizontal.

Diversos modelos são largamente utilizados na literatura para a decomposição da irradiância global nas componentes direta e difusa, alguns deles relacionam a fração difusa (k_d , razão entre DHI e GHI) em função do índice de claridade (k_t , razão entre GHI e a irradiância extraterrestre no plano horizontal, I_{ext}), como é o caso dos modelos de um parâmetro propostos por Orgill e Hollands (1977) e Erbs *et al.* (1982). Esses modelos de um parâmetro possuem apenas um valor de k_d para um valor de k_t , não conseguindo reproduzir a dispersão dos pontos associados aos dados medidos. Dessa forma, outros modelos, também chamados de modelos multiparâmetros, acrescentam outras variáveis na correlação (elevação solar, temperatura ambiente, etc), permitindo assim reproduzir a dispersão dos pontos no gráfico k_t x k_d . Como é o caso do modelo de Reindl *et al.* (1990) que apresenta um modelo de um parâmetro e modelos multiparâmetros que consideram a elevação solar, temperatura ambiente e umidade relativa do ar. Outros trabalhos ainda acrescentam a Hora Solar Aparente (Ridley *et al.* 2010, Engerer, 2015), índices de variabilidade horária (Skartveit *et al.*, 1998), entre outros.

Nas últimas décadas o registro dos dados solarimétricos tem passado da escala horária para sub-horária, com o objetivo de fornecer mais informações e garantir uma simulação mais acurada principalmente para sistemas de concentração de energia solar (CSP) onde a não linearidade e os efeitos transientes da radiação afetam fortemente o sistema (Gueymard e Ruiz-Arias, 2016). A princípio, para escala horária o modelo de Skartveit *et al.* (1998) se destacou

apresentando bons resultados estatísticos para três cidades localizadas no semiárido brasileiro, mais precisamente no interior da Paraíba, os modelos de Perez *et al.* (1992) e Reindl *et al.* (1990) ainda apresentaram desvio padrão similar ao das medições (Rodrigues *et al.*, 2019). Destaca-se aqui que as localidades avaliadas por Rodrigues *et al.* (2019) encontram-se na mesma região climática (semiárido) que a cidade de Petrolina – PE. Já para escala minuto a minuto, o modelo Engerer2 (Engerer, 2015) foi recomendado para regiões tropicais e áridas no trabalho de Gueymard e Ruiz-Arias (2016) onde 140 modelos de decomposição da radiação foram comparados para obtenção da componente direta normal.

Dessa forma, o presente estudo visa avaliar comparativamente diversos modelos de um parâmetro e multiparâmetros que fazem a decomposição de *GHI* para obter *DHI* com base em dados minuto a minuto para a cidade de Petrolina - PE. A notar que a análise com foco na região semiárida do Brasil é de alta relevância, pois essa região é a que apresenta os maiores níveis de radiação solar no país e, portanto, o maior potencial de geração solar fotovoltaica e térmica. Além disso, o estudo com base na separação de *GHI* nas demais componentes do plano horizontal é de suma importância no processo de simulação de sistemas cuja fonte é a energia solar.

2. BASE DE DADOS

A base de dados utilizada na presente pesquisa foi obtida na estação meteorológica do Centro de Referência em Energia Solar de Petrolina (CRESP), cuja latitude é de 9,106861 °S, longitude de 40,441944 °O e altitude de 385 m em relação ao nível do mar. A cidade de Petrolina se encontra no estado de Pernambuco no Brasil, possui clima tropical semiárido, tipo BSh na classificação de Köppen.

Os dados utilizados foram registrados na frequência de 1 em 1 minuto desde o dia 26 de setembro de 2018 até o dia 05 de julho de 2021 e compreendem as medições de irradiância global horizontal, direta normal, difusa horizontal, velocidade do vento, temperatura ambiente, umidade relativa e pressão atmosférica. Foram utilizados piranômetros da EKO, modelo MS-80 (classe A), faixas de medição de 0 a 4000 W/m², faixa espectral de 285 nm a 3000 nm com tempo de resposta de 0,5s, para medir *GHI* e *DHI* (a difusa é medida por uma esfera de sombreamento acoplada ao *tracker solar*). O pireliômetro (*DNI*) também é da marca EKO, modelo MS-57 (classe A), com mesma faixa de medição e tempo de resposta, a faixa espectral é de 20 nm a 4000 nm. O *tracker solar* instalado é da marca EKO, modelo STR-22 SET 10. A Figura 1 apresenta uma foto com o rastreador solar, os três piranômetros e o pireliômetro da estação do CRESP.



Figura 1 – Rastreador solar da EKO instalado na Plataforma Solar de Petrolina (CRESP).

Um procedimento de garantia de qualidade foi aplicado aos dados medidos de radiação, baseado na metodologia descrita por Petribú *et al.* (2017), de forma a identificar *outliers* provenientes da campanha de medições. O procedimento de garantia de qualidade consiste na aplicação de testes objetivos e automáticos que podem ser divididos em dois grandes grupos: os testes globais, que identificam anomalias nos *timestamps* das séries analisadas, avaliando a qualidade das séries temporais como um todo, e os testes locais, que são específicos para cada variável analisada e levam em consideração a natureza física das variáveis estudadas. Os testes locais aplicados são divididos em testes físicos (teste dos limites, testes BSRN e teste do modelo de céu claro), testes comparativos (teste do *tracker off* e teste da coerência) e testes de refinamento. Vale salientar que os testes locais para séries de radiação só são aplicados nos dados medidos com elevação solar maior que 7°, já que as medições de amanhecer e entardecer estão próximas do erro dos instrumentos.

Os testes físicos utilizam equações baseadas na geometria solar para avaliar as medições de radiação, compreendendo o teste dos limites, que propõe que os dados que não estiverem nos intervalos de 0 a 1,2 para o índice de

claridade, de 0 a 1,1 para a fração difusa, e de 0 a 1,1 para a transmitância da irradiância direta normal (k_n , razão entre DNI e a irradiância extrarrestre no plano normal a radiação, $I_{ext,o}$) sejam considerados anômalos; os testes propostos pela *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN) que estabelecem limites físicos para GHI , DHI e DNI (Long e Dutton, 2010) e um teste baseado nos valores da irradiância em condições de céu claro, conforme o modelo proposto por Rigollier *et al.* (2000), utilizando um índice de turbidez de Link de 2,5, conforme Ruiz-Arias *et al.* (2010), para criar um filtro baseado em modelo de céu claro. Em seguida aos testes físicos, os testes comparativos são realizados e compreendem o teste do *tracker off*, que avalia momentos nos quais, possivelmente, o *tracker* da estação solarimétrica esteve desalinhado; e o teste da coerência (BSRN) que utiliza um conjunto de equações para avaliar as medidas das três componentes da radiação. Por fim, os testes de refinamento visam avaliar variações abruptas nos valores de radiação entre *timestamps* consecutivos (teste de consistência temporal) e a repetição contínua de valores da radiação ao longo do tempo (teste da persistência).

3. METODOLOGIA

O conhecimento das componentes direta e difusa a partir de GHI pode ser obtido com base na relação da fração difusa com o índice de claridade, como também com base na transmitância da irradiância direta normal em função de k_t . Uma vez determinada a relação entre $k_d \times k_t$ ou entre $k_n \times k_t$, torna-se possível conhecer a componente difusa ou direta, respectivamente. Em seguida, devido à relação das irradiâncias apresentada na Equação 1, é possível obter todas as componentes da radiação no plano horizontal.

$$GHI = DNI \cos(\theta_z) + DHI \quad (1)$$

Onde θ_z é o ângulo zenital, correspondente ao ângulo entre o zênite e a linha da radiação direta.

3.1 Modelos selecionados

No presente trabalho quatro modelos de um parâmetro e oito modelos multiparâmetros foram selecionados, totalizando assim 12 modelos de separação de GHI .

- Orgill e Hollands (1977) [O&H]:

Um dos pioneiros na modelagem da fração difusa em função do índice de claridade considerando intervalos de k_t , o modelo de Orgill e Hollands (1977) (O&H) foi desenvolvido com base em dados de 4 anos da cidade de Toronto, Canada (latitude 43,8°N). Esse modelo é obtido a partir das expressões visualizadas na Eq. 2:

$$k_d = \begin{cases} 1 - 0,249k_t & 0 \leq k_t < 0,35 \\ 1,557 - 1,84k_t & 0,35 \leq k_t \leq 0,75 \\ 0,177 & k_t > 0,75 \end{cases} \quad (2)$$

- Erbs *et al.* (1982) [ERBS]:

Largamente utilizado em *softwares* de simulação de sistemas fotovoltaicos, o modelo de Erbs *et al.* (1982) foi proposto com base em 5 cidades dos Estados Unidos (latitudes entre 31,08°N e 42,42°N). ERBS é escrito na forma de:

$$k_d = \begin{cases} 1 - 0,09k_t & k_t \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604k_t + 4,388k_t^2 - 16,638k_t^3 + 12,336k_t^4 & 0,22 < k_t \leq 0,80 \\ 0,165 & k_t > 0,80 \end{cases} \quad (3)$$

- Chandrasekaran e Kumar (1994) [C&K]:

O modelo C&K proposto para a cidade de Madras na Índia (latitude 13°N) foi desenvolvido com base em 5 anos de dados. Os autores desenvolveram modelos para diferentes estações e meses, como também para toda a base de dados avaliada. O modelo que teve melhor ajuste para todos os meses de medições pode ser visualizado na Eq. 4:

$$k_d = \begin{cases} 1,0086 - 0,178k_t & k_t \leq 0,24 \\ 0,9686 + 0,1325k_t + 1,4183k_t^2 - 10,1860k_t^3 + 8,3733k_t^4 & 0,24 < k_t \leq 0,80 \\ 0,197 & k_t > 0,80 \end{cases} \quad (4)$$

- Reindl *et al.* (1990) [REINDL1, REINDL2 e REINDL3]:

Em Reindl *et al.* (1990), 5 localidades distribuídas entre Alemanha, Dinamarca, Espanha e Estados Unidos foram avaliadas. Com latitudes entre 28,4°N (EUA) e 55,7°N (Dinamarca), os autores desenvolverem 3 modelos, o modelo REINDL1 é um modelo univariável que considera apenas o índice de claridade.

$$k_d = \begin{cases} 1,02 - 0,248k_t & 0 \leq k_t \leq 0,3 \\ 1,45 - 1,67k_t & 0,30 < k_t < 0,78 \\ 0,147 & k_t \geq 0,78 \end{cases} \quad (5)$$

O modelo REINDL2 é o primeiro modelo no presente trabalho que considera mais de um parâmetro em seus cálculos sendo eles k_t e a elevação solar (α).

$$k_d = \begin{cases} 1,02 - 0,254k_t + 0,0123 \sin(\alpha) & 0 \leq k_t \leq 0,3 \\ 1,40 - 1,749k_t + 0,177 \sin(\alpha) & 0,30 < k_t < 0,78 \\ 0,486k_t - 0,182 \sin(\alpha) & k_t \geq 0,78 \end{cases} \quad (6)$$

Os autores ainda desenvolveram um modelo (REINDL3) que considera além do índice de claridade, a elevação solar (α), a temperatura ambiente (T_a) e a umidade relativa (ϕ).

$$k_d = \begin{cases} 1 - 0,232k_t + 0,0239 \sin(\alpha) - 0,000682T_a + 0,0195\phi & 0 \leq k_t \leq 0,3 \\ 1,329 - 1,716k_t + 0,267 \sin(\alpha) - 0,00357T_a + 0,106\phi & 0,30 < k_t < 0,78 \\ 0,426k_t - 0,256 \sin(\alpha) + 0,00349T_a + 0,0734\phi & k_t \geq 0,78 \end{cases} \quad (7)$$

- Maxwell (1987) [DISC]:

Desenvolvido para o programa *Direct Insolation Simulation Code (DISC)*, o autor Maxwell (1987) propôs um modelo usado para estimar a componente DNI a partir da decomposição de GHI com base em dados de 3 estações dos Estados Unidos (latitudes entre 25,9°N e 46,77°N). O modelo utiliza equações baseadas em princípios físicos com funções de correlações experimentais. As variáveis de entrada são k_t e principalmente a massa de ar (AM) utilizada para calcular o índice de transmitância da direta normal de céu claro (k_{nc}). DNI é obtido pela multiplicação da irradiância extraterrestre normal ($I_{ext,o}$) pela transmitância direta normal ($k_n = k_{nc} - \Delta k_n$), onde k_{nc} e Δk_n são obtidos a partir das Eq. 8 e 9.

$$k_{nc} = 0,866 - 0,122AM + 0,0121AM^2 - 0,000653AM^3 + 0,000014AM^4 \quad (8)$$

$$\Delta k_n = a + b \exp(c AM) \quad (9)$$

Onde os coeficientes a, b e c variam em função de k_t para dois intervalos específicos ($k_t > 0,6$ e $k_t \leq 0,6$).

- Perez *et al.* (1992) [DIRINT]:

Baseado no modelo de DISC, os autores Perez *et al.* (1992) corrigem DNI estimada pelo modelo DISC multiplicando por um coeficiente $X(k_t', \theta_z, W, \Delta k_t')$. Esse coeficiente é obtido a partir de uma matriz de 6x6x5x7 baseado em intervalos definidos dos parâmetros de X, onde k_t' é o índice de claridade dependente da massa de ar (Eq. 10), W corresponde à água precipitável (varia em função da temperatura do ponto de orvalho, T_{dp}) (Eq.11) e $\Delta k_t'$ é o índice de estabilidade que considera a dinâmica das séries temporais, sendo definida pela Eq. 12 e Eq. 13, onde os subscritos $i+1$ ou $i-1$ refere-se ao instante posterior e anterior ao instante i . Nos instantes de início e fim do dia esse índice é obtido pela Eq. 13.

$$k_t' = k_t / (1,031 \exp(-1,4 / (0,9 + 9,4 / AM)) + 0,1) \quad (10)$$

$$W = \exp(0,07T_{dp} - 0,075) \quad (11)$$

$$\Delta k_t' = 0,5(|k_t' - k_{t_{i+1}}'| + |k_t' - k_{t_{i-1}}'|) \quad (12)$$

$$\Delta k_t' = |k_t' - k_{t_{i\pm 1}}'| \quad (13)$$

- Skartveit *et al.* (1998) [SKARTVEIT]:

Semelhantemente a DIRINT, Skartveit *et al.* (1998) propuseram um índice que considera a variabilidade temporal nos cálculos, sendo nomeado como índice de variabilidade horária (σ_3) (Eq. 15 e 16). O modelo ainda considera o índice de claridade (k_t), a elevação solar (α) e o índice de céu claro (ρ), sendo usados para detectar a presença de nuvens não homogêneas uma vez que essas afetam as componentes direta e difusa de diversas formas (Skartveit *et al.*, 1998). O modelo foi desenvolvido na resolução horária com base em dados de Lisboa, Lyon, Garston e Gävle, cujas latitudes são respectivamente 38,77°N, 45,78°N, 51,72°N e 60,67°N.

$$\rho = k_t / (0,83 - 0,56 \exp(-0,06 \alpha)) \quad (14)$$

$$\sigma_3 = \{[(\rho_i - \rho_{i-1})^2 + (\rho_i - \rho_{i+1})^2] / 2\}^{0,5} \quad (15)$$

$$\sigma_3 = |\rho - \rho_{i \pm 1}| \quad (16)$$

Para ambientes sem neve, os autores subdividem a análise em quatro intervalos para momentos invariáveis ($\sigma_3 \approx 0$) e momentos variáveis ($\sigma_3 > 0$). Uma série de equações define os quatro intervalos e a fração difusa equivalente, onde para momentos em que o índice de variabilidade horária é maior que zero um termo $\Delta(k_t, \alpha, \sigma_3)$ deve ser adicionado com o objetivo de considerar os efeitos de nuvens não homogêneas. Nas simulações o valor $\sigma_3 \approx 0$ considerado foi de 0,0005.

- Ridley et al. (2010) [BRL]:

Em Ridley et al. (2010) um modelo multiparâmetro, conhecido como BRL (Boland-Ridley-Lauret), foi proposto com base no índice de claridade horário, hora solar aparente (*HSA*) obtida do cálculo de ângulo horário e expressa em unidade de horas, altura solar expressa em radianos, índice de claridade diário (*K_t*) e na persistência (ψ). Essa última variável considera a variação do índice de claridade horário no momento anterior e posterior ao intervalo *i* (Eq. 18). Os autores desenvolveram esse modelo com o objetivo de obter um modelo de decomposição adequado para Austrália.

$$k_d = 1 / [1 + \exp(-5,38 + 6,63k_t + 0,006HSA - 0,007\alpha + 1,75K_t + 1,31\psi)] \quad (17)$$

$$\psi = \begin{cases} \frac{k_{t_{i-1}} + k_{t_{i+1}}}{2} & \text{nascido do sol} < i < \text{pôr do sol} \\ k_{t_{i+1}} & i = \text{nascido do sol} \\ k_{t_{i-1}} & i = \text{pôr do sol} \end{cases} \quad (18)$$

- Lemos et al. (2017) [BRL-BR]:

Em Lemos et al. (2017) o modelo BRL proposto para dados horários foi ajustado considerando os mesmos parâmetros para dados minuto-a-minuto com base em dados de nove estações solarimétricas da rede SONDA (Sistema Nacional de Organização de Dados Ambientais) no Brasil. O modelo ajustado, chamado de BRL-BR (Salazar et al., 2018), apresentou melhor desempenho quando comparado ao modelo BRL. A Eq. 19 apresenta o modelo BRL ajustado.

$$k_d = 1 / [1 + \exp(-6,26 + 5,97k_t + 0,024HSA - 0,0053\alpha + 2,84K_t + 2,41\psi)] \quad (19)$$

A notar que a aplicação do modelo ajustado para o Brasil agrega ainda mais valor no presente estudo, pois a análise permite comparar o modelo ajustado com base em 9 estações com outros modelos encontrados na literatura para Petrolina.

- Engerer (2015) [ENGERER]:

Motivado pela escassez de trabalhos que avaliam os modelos de *k_d* em resolução minuto a minuto e visando propor um novo modelo que pudesse representar o comportamento da radiação nessa resolução temporal para Austrália, Engerer (2015) avaliou 9 modelos bem estudados na literatura para a região da Austrália (latitudes entre 34,24°S e 40,68°S). O autor propõe 3 modelos, sendo ENGERER1 para o conjunto de dados sem momentos com efeito de lente produzido pelas nuvens, conhecido na literatura como *cloud enhancement* (Andrade e Tiba, 2016), ENGERER2 criado para todos os tipos de céu (incluindo momentos de *cloud enhancement*) e ENGERER3 para condições de céu claro.

O modelo analisado na presente pesquisa, abordado como ENGERER é o modelo ENGERER2 que descreve o céu para todos os instantes e é escrito de acordo com a Equação 20.

$$k_d = 0,042336 + \frac{1 - 0,042336}{1 + \exp(-3,7912 + 7,5479k_t - 0,010036 HSA + 0,003148 \theta_z - 5,3146\Delta k_{tc})} + 1,7073 k_{de} \quad (20)$$

Onde Δk_{tc} corresponde à diferença entre o *k_t* medido e o índice de claridade de céu claro obtido pelo modelo de céu claro REST2 e o *k_{de}* representa uma porção da fração difusa atribuída aos eventos de *cloud enhancement*.

Todos os modelos apresentados, exceto os modelos de Lemos et al. (2017) e Engerer (2015) foram obtidos com base em dados horários. Como o foco da presente pesquisa consiste em avaliar os modelos em base minuto a minuto, todos os parâmetros horários foram alterados quanto à resolução, assim os índices de variabilidade, persistência, entre outros, foram corrigidos de forma a considerar a variabilidade na escala dos minutos do recurso solar. A notar igualmente que modelos de natureza empírica não possuem validade “universal” para aplicação, ou seja, a empregabilidade dos mesmos pode não ser acurada para uma dada localidade (Sengupta et al., 2021), podendo acarretar em erros significativos nas simulações, dessa forma, se faz necessário validar os modelos para o local em estudo.

3.2 Validação dos modelos de decomposição de GHI

Os indicadores estatísticos considerados para validação dos modelos foram empregados na comparação da componente difusa obtida a partir dos modelos de decomposição de *GHI*. Os estatísticos utilizados são o erro médio (*MBE*), a raiz do erro quadrático médio (*RMSE*), seus normalizados (*nMBE* e *nRMSE*), a correlação (*R*), a razão entre o desvio padrão medido (σ_m) e observado (σ_o), também chamado de *stdr* e o *skill score* (*SS4*).

Modelos mais acurados devem apresentar baixos valores de *MBE*, *nMBE*, *RMSE* e *nRMSE*, onde valores próximos a 0 são desejados e para os demais estatísticos, valores próximos a 1 destacam ótimos modelos. O primeiro grupo indica o quanto o modelo subestima ou superestima os resultados reais medidos (*MBE* e *nMBE*) e o quanto o modelo se dispersa dos valores reais (*RMSE* e *nRMSE*). Já para o segundo grupo de estatísticos, o *R* diz respeito à similaridade das estruturas de fase e frequência entre os dados observados e simulados, enquanto que o *stdr* se relaciona com a amplitude de variação das séries observada e modelada (*stdr*). Por fim, o *SS4* indica o desempenho geral do modelo, uma vez que o mesmo considera a correlação e o desvio padrão do modelo normalizado pelo desvio padrão da observação (Perruci, 2018).

Com o objetivo de facilitar a validação dos modelos a partir da componente *DHI*, o diagrama de Taylor (Taylor, 2001) foi adotado como ferramenta de avaliação dos modelos frente aos resultados medidos. A análise estatística gráfica se apresenta como uma ferramenta útil, onde a correlação, o desvio padrão, o *RMSE* e o *SS4* são apresentados.

4. RESULTADOS

Os resultados da garantia de qualidade indicam que os dados de *GHI* possuem apenas 0,0004% dos dados como *outliers*, enquanto que para a *DHI* e a *DNI*, os testes indicam, respectivamente, 1,25% e 1,21% de *outliers*. Dados os percentuais baixos de indicativos de *outliers* para as três componentes da radiação, pode-se afirmar que os dados medidos na estação de Petrolina são, em sua maioria, confiáveis.

Os modelos de um parâmetro não descrevem a dispersão dos pontos no gráfico $k_d \times k_t$, já que esses modelos somente reproduzem momentos de céu nublado, parcialmente nublado e de céu claro, conforme mostrado na Figura 2. Condições intermediárias em que o céu varia, bem como as condições de k_t e k_d elevados (tipicamente associadas ao fenômeno de *cloud enhancement*), podem ser reproduzidas por modelos multiparâmetros que permitem representar melhor a dispersão da relação $k_d \times k_t$, dos dados observacionais, conforme mostrado na Fig. 3. Dos resultados dos 8 modelos multiparâmetros aplicados neste trabalho, 6 deles foram concebidos para a escala horária e adaptados neste trabalho para a escala de 1 minuto. É possível observar que nem todos os modelos multiparâmetros reproduzem a região de *cloud enhancement*.

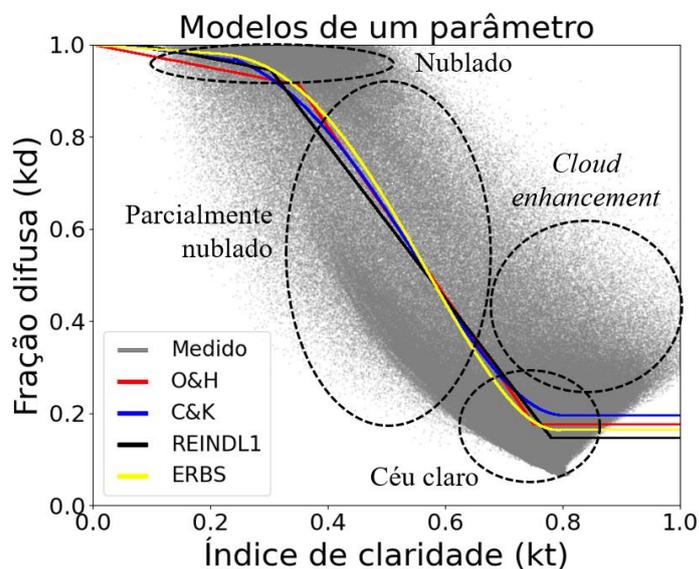


Figura 2 – Gráfico $k_d \times k_t$ obtido pelos modelos de um parâmetro comparado as medições na escala dos minutos.

Na Figura 3, observa-se que os modelos de Maxwell (1987), Reindl *et al.* (1990), Perez *et al.* (1992), Skartveit *et al.* (1998) e Engerer (2015) permitem uma maior descrição dos dados concentrados na região de *cloud enhancement*. Ainda é observado visualmente que os modelos SKARTVEIT e DIRINT fornecem uma nuvem de pontos que engloba os dados medidos de uma forma mais completa. A notar que o modelo DIRINT e DISC foram obtidos a partir da relação $k_n \times k_t$, sendo a *DHI* obtida pelas componentes *GHI* medida e *DNI* estimada pelo modelo.

O diagrama de Taylor apresentado na Figura 4 compara a irradiância difusa modelada à irradiância observada (ponto destacado na cor magenta). O diagrama é dividido em 3 regiões, os modelos concentrados na região R1 apresentam desvio padrão e correlação razoáveis, a região R2 indica modelos com correlações razoáveis e desvios distantes do desvio dos dados medidos, enquanto que a região R3 representa modelos com correlações baixas.

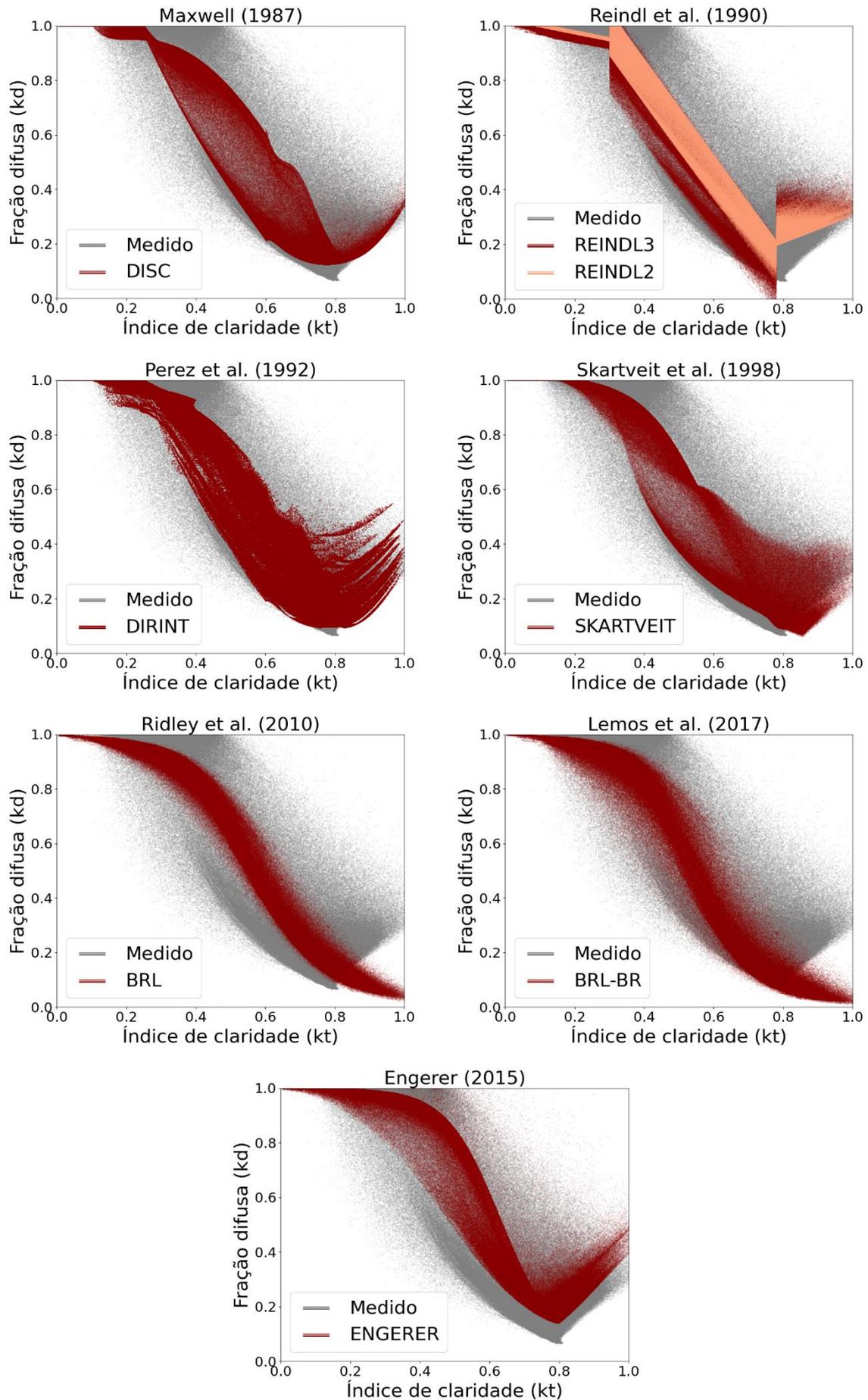


Figura 3 - Gráfico $k_d \times k_t$ obtido pelos modelos multiparâmetros comparado às medições minuto a minuto.

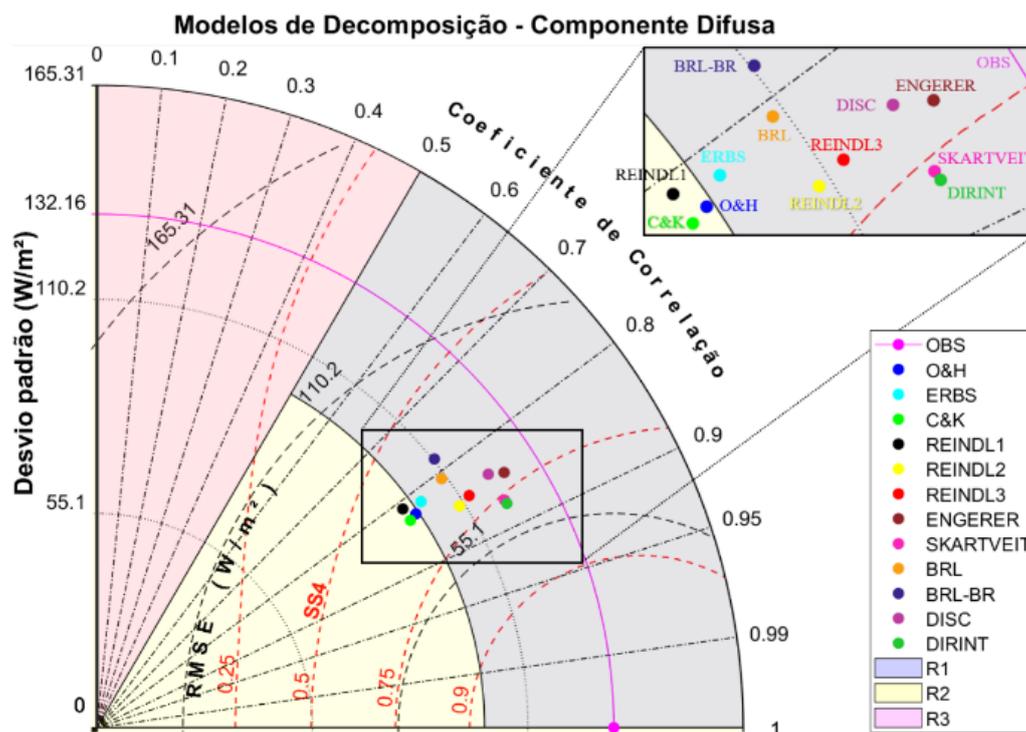


Figura 4 – Diagrama de Taylor da irradiância difusa simulada pelos modelos.

Com base na Figura 4, pode-se observar que os modelos de um parâmetro se concentram próximos uns dos outros, com menor representação do desvio padrão da observação (valores de *stdr* entre 0,73 e 0,77), correlações abaixo de 0,83 e *skill score* abaixo de 0,64.

Dentre os modelos multiparâmetros, o modelo de ENGERER se aproxima mais da observação pelo desvio padrão, enquanto que os modelos DIRINT e SKARTVEIT apresentaram as melhores correlações, dispersões (*RMSE*) e *SS4*. O resultado observado foi semelhante ao obtido por Rodrigues *et al.* (2019) na escala horária para as cidades de São João do Rio do Peixe, Coremas e Patos na Paraíba (latitudes entre 6,73°S e 7,03°S), onde o modelo SKARTVEIT foi destacado como mais representativo para as três localidades. Os estatísticos encontrados pelos autores abordavam *RMSE* da componente *DHI* da ordem de 50 W/m², enquanto no presente trabalho o menor valor encontrado foi de 65,97 W/m² para o modelo DIRINT, demonstrando assim, o aumento na dispersão dos modelos quando aplicados à escala sub-horária.

A Tabela 1 apresenta todos os estatísticos dos modelos empregados na estimativa da componente difusa.

Tabela 1 – Estatísticos dos modelos avaliados.

MODELO	MBE (W/m ²)	nMBE (%)	RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)	R (-)	stdr (-)	SS4 (-)
O&H	-17,45	-8,52	77,52	37,85	0,8250	0,7437	0,6359
ERBS	-18,77	-9,18	78,93	38,60	0,8158	0,7671	0,6338
REINDL1	-23,43	-11,46	81,85	40,03	0,8085	0,7303	0,6066
C&K	-11,24	-5,50	75,65	37,00	0,8303	0,7297	0,6361
REINDL2	2,49	1,22	69,38	33,93	0,8516	0,8253	0,7082
DISC	-18,36	-8,96	75,02	36,61	0,8384	0,9082	0,7074
SKARTVEIT	-15,56	-7,59	66,81	32,61	0,8719	0,9041	0,7596
DIRINT	-16,44	-8,04	65,97	32,27	0,8759	0,9053	0,7664
REINDL3	-4,66	-2,28	70,31	34,40	0,8473	0,8516	0,7093
ENGERER	8,72	4,26	72,20	35,24	0,8458	0,9380	0,7225
BRL	-24,20	-11,85	82,47	40,38	0,8046	0,8289	0,6400
BRL-BR	-45,94	-22,50	93,03	45,55	0,7934	0,8309	0,6248

Entre os modelos multiparâmetros, os modelos DIRINT, SKARTVEIT e ENGERER apresentaram os maiores valores de *skill* de Taylor (entre 0,72 e 0,77) com altas correlações entre as séries modeladas e as séries observacionais. Contudo, o modelo ENGERER apresentou erro médio (*MBE* e *nMBE*) inferior e maior *stdr* quando comparado aos modelos de DIRINT e SKARTVEIT. Embora Gueymard e Ruiz-Arias (2016) tenham mostrado que para regiões áridas, o modelo DIRINT apresenta os melhores resultados em estimativas de minuto a minuto, os autores recomendam o modelo de Engerer (2015), uma vez que o modelo de Perez *et al.* (1992) apresenta um maior desvio dos estatísticos em função da localidade na região árida e devido ao *bias* nem sempre ser baixo.

Ainda sobre os modelos de mais de um parâmetro, observa-se que o modelo BRL-BR, após ajuste do modelo BRL com base em dados de diversas estações localizadas no Brasil, não conseguiu descrever o comportamento da radiação difusa para Petrolina. Um novo ajuste do modelo poderá ser feito com o objetivo de tornar a estimativa de *DHI* mais acurada para a localidade. Além disso, os modelos REINDL2 e REINDL3 apresentaram os menores erros médios, próximos a 0.

Quanto aos modelos de um parâmetro, o modelo C&K apresentou o menor erro médio (*MBE* e *nMBE*), a menor dispersão entre a estimativa e a observação (*RMSE* e *nRMSE*), maior correlação e *SS4*, indicando ser o melhor modelo de um parâmetro dentre os avaliados. O modelo de Erbs *et al.* (1982), largamente utilizado em ferramentas de simulação, apresentou a melhor relação entre os desvios padrão, com o maior *stdr*, correspondendo a 0,7671, apresentando desempenho melhor que o C&K em dias de céu claro (Fig. 5). Ambos modelos de um parâmetro apresentam desempenho inferior frente aos três melhores modelos multiparâmetros.

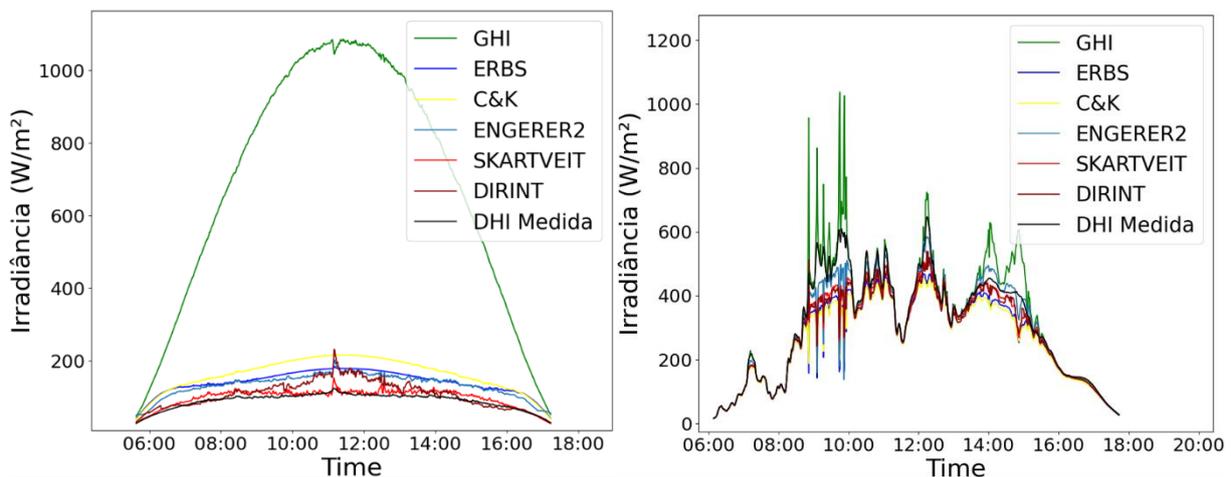


Figura 5 – Irradiância difusa para dia de céu claro (a esquerda) e nublado (a direita).

Pela Figura 5, observa-se a diferença entre os melhores modelos multiparâmetros e de um parâmetro, onde para um dia de céu claro, os modelos ERBS e C&K estimaram a *DHI* alcançando 180 e 220 W/m² respectivamente, enquanto que a *DHI* medida alcançou valores próximos a 110 W/m². A descrição de *DHI* para esse dia foi melhor alcançado pelos modelos multiparâmetros. A notar que existe uma relação entre os resultados dos modelos e o ângulo zenital, o modelo de Perez *et al.* (1992) apresentou menor erro frente aos demais modelos para θ_z elevado, enquanto SKARTVEIT se destacou para momentos de baixo θ_z no dia de céu claro. Além disso, o modelo de Engerer (2015) se aproximou mais da difusa medida para o dia nublado apresentado na Figura 5.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou estatisticamente 12 modelos de decomposição de *GHI* na escala dos minutos identificando os melhores modelos para estimar a componente difusa (*DHI*). Com base nos estatísticos *RMSE* e *R*, os modelos de Skartveit *et al.* (1998) e Perez *et al.* (1992) apresentaram o melhor desempenho, quanto ao estatístico *MBE* os modelos multiparâmetros de Reindl *et al.* (1990) tiveram os melhores resultados. Quanto ao estatístico *stdr* o modelo de Engerer (2015) se destacou frente aos demais, apresentando a menor diferença entre a amplitude da série de irradiância modelada e a medida. Uma vez que o *skill score* indica o desempenho geral do modelo, os modelos DIRINT, ENGERER e SKARTVEIT foram selecionados como os melhores modelos na resolução dos minutos para a localidade de Petrolina (latitude de 9,11°S) com *SS4* entre 0,72 e 0,77. Portanto, recomenda-se que a decomposição de *GHI* nas simulações de sistemas FV ou térmicos localizados na região de estudo seja realizada pelos modelos de Skartveit *et al.* (1998), Perez *et al.* (1992) ou Engerer (2015). Futuras simulações sobre a influência da seleção de diferentes modelos de separação de *GHI* no desempenho de centrais fotovoltaicas poderão ser realizadas, visando assim verificar o real impacto da acurácia dos modelos na estimativa da geração dos sistemas FV.

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 do projeto 23076.009704/2020-56 no âmbito do Programa de P&D ANEEL, como também ao Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo apoio aos bolsistas no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares – PROTEN.

REFERÊNCIAS

- Andrade, R. C., Tiba, C., 2016. Extreme global solar irradiance due to cloud enhancement in northeastern Brazil. *Renewable energy*, v. 86, p. 1433-1441.
- Chandrasekaran, J., Kumar, S., 1994. Hourly diffuse fraction correlation at a tropical location. *Solar Energy*, v. 53, n. 6, p. 505-510.
- Engerer, N. A., 2015. Minute resolution estimates of the diffuse fraction of global irradiance for southeastern Australia. *Solar Energy*, v. 116, p. 215-237.
- Erbs, D. G., Klein S. A., Duffie J. A., 1982. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation. *Solar Energy*, v. 28, n. 4, p. 293-302.
- Gueymard, C. A.; Ruiz-Arias, J. A., 2016. Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct irradiance predictions from 1-min global irradiance. *Solar Energy*, v. 128, p. 1–30.
- Lemos, L. F., Starke, A. R., Boland, J., Cardemil, J. M., Machado, R. D., Colle, S., 2017. Assessment of solar radiation components in Brazil using the BRL model. *Renewable Energy*, v. 108, p. 569-580.
- Long, C. N., Dutton, E. G., 2010. BSRN Global Network recommended QC tests, V2.x, Bremerhaven, PANGAEA.
- Maxwell, E., 1987. A quasi-physical model for converting hourly global horizontal to direct normal insolation. Tech. rep., Solar Energy Research Institute. Golden, CO (USA).
- Orgill J., Hollands K., 1977. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy*, v. 19, p. 357-359.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R. D., Maxwell, E. L., Zalenka, A. J. A. T., 1992. Dynamic global-to-direct irradiance conversion models. *ASHRAE transactions*, v. 98, n. 1, p. 354–369.
- Perruci, V. P., 2018. Análise da complementariedade entre diferentes técnicas estatísticas para aumento na resolução espacial do comportamento do vento local. Dissertação de Mestrado, CER, UFPE, Recife.
- 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-AVERMA*, 2017, v. 21, p. 67-78.
- Reindl, D.T., Beckman, W.A., Duffie, J.A., 1990. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, v. 45, p. 1–7.
- Ridley, B., Boland, J., Lauret, P., 2010. Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors. *Renewable Energy*, v. 35 n. 2, p. 478-483.
- Rigollier, C., Bauer, O., Wald, L., 2000. On the clear sky model of the ESRA—European Solar Radiation Atlas—with respect to the Heliosat method. *Solar Energy*, v. 68, n. 1, p. 33–48.
- Ruiz-Arias, J. A., Alsamamra, H., Tovar-Pescador, J., Pozo-Vázquez, D., 2010. Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions. *Energy Conversion and Management*, v. 51, n. 5, p. 881-893.
- Rodrigues, D., Petribú, L., Galdino, J., Vilela, O. C., 2019. Estudo comparativo de modelos de estimativa da radiação difusa no sertão da Paraíba, região Nordeste do Brasil. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 23, p. 7–18.
- Salazar, G. A., Nollas, F. M., Gueymard, C. A., Filho, M. H. O. P., 2018. Análisis de valores de irradiancia difusa medidos y estimados usando los modelos BRL y Engerer, caso de estudio: La Quiaca (Argentina). VII CBENS - VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Sengupta, M., Habte, A., Wilbert, S., Gueymard, C., Remund, J., 2021. Best practices handbook for the collection and use of solar resource data for solar energy applications. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden.
- Skartveit, A., Olseth, J. A.; Tuft, M. E., 1998. An hourly diffuse fraction model with correction for variability and surface albedo. *Solar Energy*, v. 63, n. 3, p. 173–183.
- Starke, A. R., Lemos, L. F., Boland, J., Cardemil, J. M., Colle, S., 2018. Resolution of the cloud enhancement problem for one-minute diffuse radiation prediction. *Renewable Energy*, v. 125, p. 472-484.
- Taylor, K.E., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, v. 106, p. 7183-7192.

EVALUATION OF MODELS USED TO ESTIMATE DIFFUSE RADIATION AT MINUTE RESOLUTION FOR A LOW-LATITUDE CITY

Abstract. *The simulation of photovoltaic and thermal systems requires accurate knowledge of the incident radiation on the plane of photovoltaic modules and thermal collectors. The diffuse and direct components are often not measured, making it necessary to decompose global horizontal irradiance into the other components for subsequent transposition to the inclined plane. In the present study, twelve separation models were applied to Petrolina, located in the Brazilian semiarid region. All separation models were evaluated for data at minute resolution, providing a better description of the radiation behavior. Statistical comparison was performed for the diffuse component using mean bias error, root mean square error, the ratio of standard deviations, correlation, and skill score. Taylor diagram provided a graphical analysis of statistical metrics. Engerer, Perez and Skartveit models presented the best results for Petrolina (latitude 9.11°S) with a correlation between 0.85 and 0.88 and skill score between 0.72 and 0.77, corroborating with previous results obtained for Skartveit model at hourly resolution and Engerer and Perez at minute resolution for locations with similar climate.*

Key words: *Diffuse irradiance, Decomposition models, Minute resolution.*