

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

João Victor Medeiros

joao.furtado@ufpe.br

Diego Miranda

diego.rmiranda@ufpe.br

Emerson Gomes

emerson.torres@ufpe.br

Olga Vilela

ocv@ufpe.br

Alex Pereira

alexcp@chesf.gov.br

Eduardo Jatoba

ejatoba@chesf.gov.br

Alcides Neto

alcidesc@chesf.gov.br

José Melo Filho

jbionef@chesf.gov.br



Centro de Energias Renováveis
Center of Renewable Energy



Introducción

- O presente trabalho faz parte do projeto de pesquisa de mestrado “**Avaliação dos modelos utilizados na estimativa e previsão da geração fotovoltaica a partir de dados de uma usina localizada no semiárido brasileiro**”
- Conhecimento das três componentes da radiação no plano horizontal é fundamental na simulação de sistemas fotovoltaicos e térmicos.



- Definir a irradiância que incide no plano dos coletores/módulos FV é necessário encontrar **ao menos duas componentes** para poder conhecer a 3ª componente no plano horizontal e transpor as componentes para o plano inclinado, plano do arranjo (GTI).



Figura 1: Irradiância incidente no plano do arranjo (Plane of array – POA)

Introducción

→ Não disponibilidade de medições de irradiância plano do arranjo;

→ Os dados solarimétricos de entrada nas simulações correspondem geralmente à **irradiância global no plano horizontal (GHI)**

→ Modelos de decomposição de GHI

$$k_d = \frac{DHI}{GHI} \longleftrightarrow k_t = \frac{GHI}{I_{ext,h}}$$

→ Modelos de um parâmetro

$$k_d = \begin{cases} 1 - 0,249k_t & 0 \leq k_t < 0,35 \\ 1,577 - 1,84k_t & 0,35 \leq k_t \leq 0,75 \\ 0,177 & k_t > 0,75 \end{cases}$$

→ Modelos multiparâmetros

(RODRIGUES *et al.*, 2019)

- Elevação solar;
- Temperatura Ambiente;
- Umidade relativa do ar;
- Índices de variabilidade;

DNI

DHI

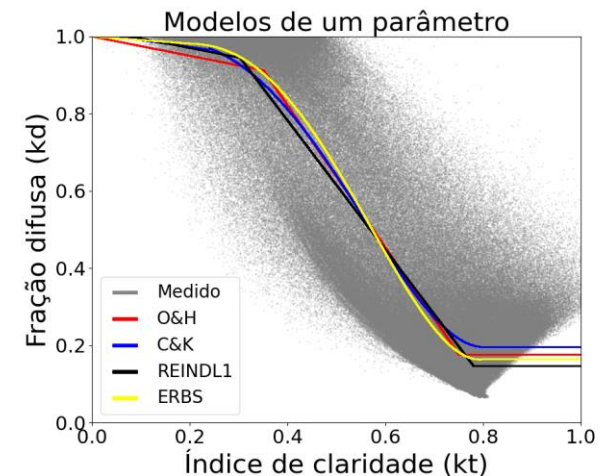


Figura 2: Fração difusa vs índice de claridade

Fonte: Autor.

Introducción

Resolução horária



Resolução dos minutos

(GUEYMARD; RUIZ-ARIAS, 2016)

- ✓ Fornecer mais informações
- ✓ Garantir simulações mais acuradas, principalmente para sistemas de concentração de energia solar;
 - Não linearidade
 - Efeitos transientes da radiação

Objetivos

- Avaliar comparativamente diversos modelos de decomposição de GHI para obtenção de DHI com base em dados minuto a minuto.
- Melhores modelos para a região de Petrolina - PE

Base de datos

- Estação meteorológica do Centro de Referência de Energia Solar de Petrolina (CRESP)
- Latitude: 9,106861 °S; Longitude: 40,441944 °O; Altitude: 385 m.
- Dados registrados de 1 em 1 minuto do dia 26 de setembro de 2018 a 05 de julho de 2021.
- Procedimento de garantia de qualidade dos dados de irradiância (PETRIBÚ *et al.*, 2017)
- Testes globais e locais
- *Outliers*:

GHI: 0,0004%

DHI: 1,25%

DNI: 1,21%

Uruguay, febrero 2022 | 6



Figura 4: Rastreador solar com piranômetros classe A do CRESP.

Metodología

→ 4 modelos de um parâmetro:

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

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

- Toronto, Canada lat: 43,8°N

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

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

- Estados Unidos
lat: 31,08°N -> 43,8°N

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

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

- Madras, Índia
lat: 13°N

- Reindl *et al.* (1990) [REINDL1]:

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

- Alemanha, Dinamarca, Espanha, Estados Unidos
lat: 28,4°N -> 43,8°N

Metodología

→ 8 modelos multiparámetros foram selecionados

- Reindl et al. (1990) [REINDL2]:

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

- Reindl et al. (1990) [REINDL3]:

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

- Alemanha, Dinamarca, Espanha, Estados Unidos

lat: 28,4°N -> 43,8°N

- Maxwell (1987) [DISC]:

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

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

- Estados Unidos lat: 25,9°N -> 46,8°N

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

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

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

$$\Delta k'_t = 0,5(|k'_t - k'_{t_{i+1}}| + |k'_t - k'_{t_{i-1}}|)$$

$$\Delta k'_t = |k'_t - k'_{t_{i\pm 1}}|$$

- 15 localidades

lat: 25,9°N -> 52°N

Metodología

→ 8 modelos multiparâmetros foram selecionados

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

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

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

$$\sigma_3 = |\rho - \rho_{i \pm 1}|$$

- 4 localidades na Europa lat: 38°N -> 61°N

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

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

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

- Hemisfério Norte e sul lat: 22°N -> 50,8°N e 12,5°S -> 35°S

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

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

- 9 localidades Brasil lat: 2,6°S -> 29,4°S

- Engerer (2015) [ENGERER]:

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

- Austrália lat: 34,2°S -> 40,7°S

Resultados

→ Relação k_d vs k_t

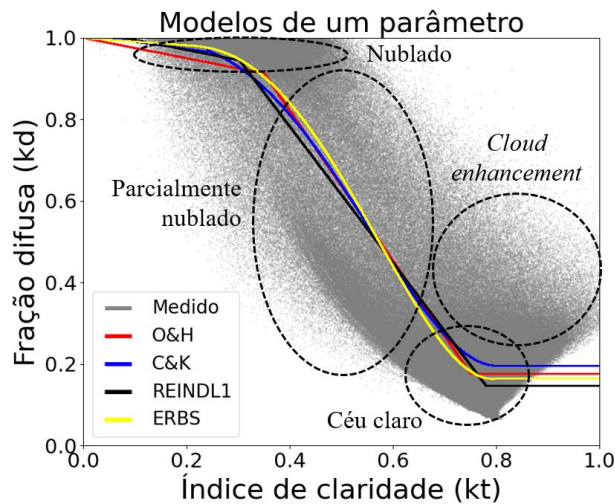


Figura 5: Modelos de um parâmetro comparados ao medido.

Fonte: Autor.

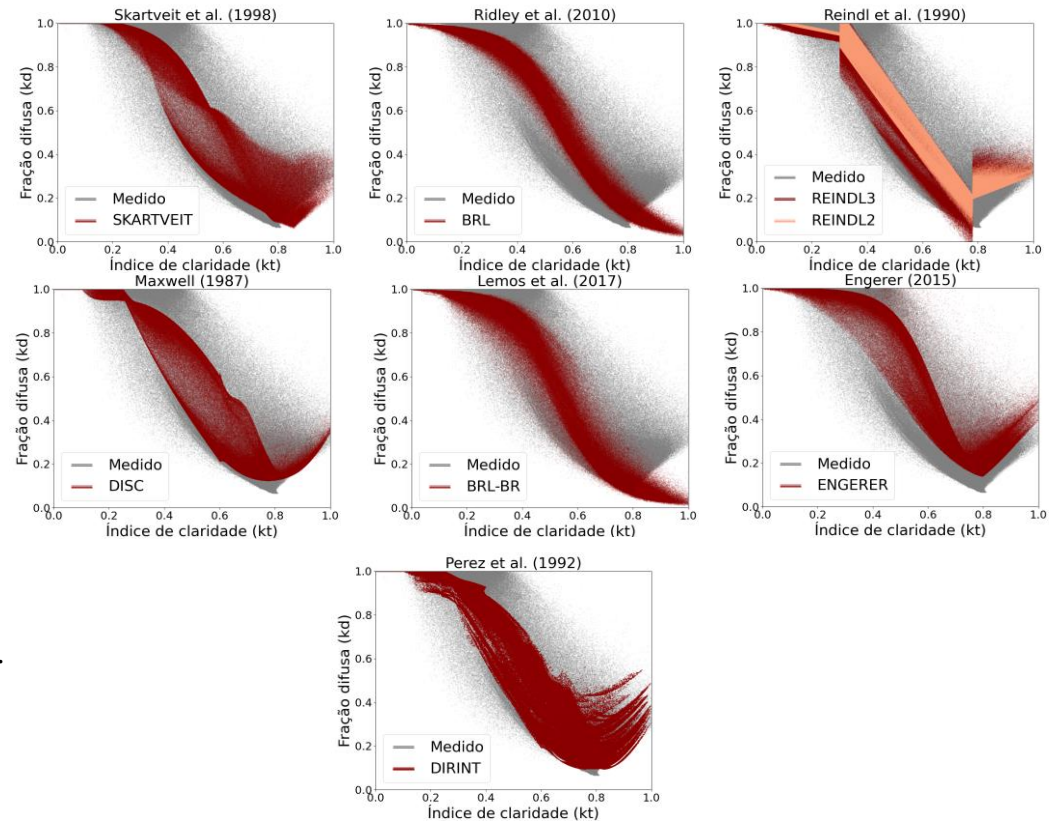


Figura 6: Modelos multiparâmetros.

Fonte: Autor.

Resultados

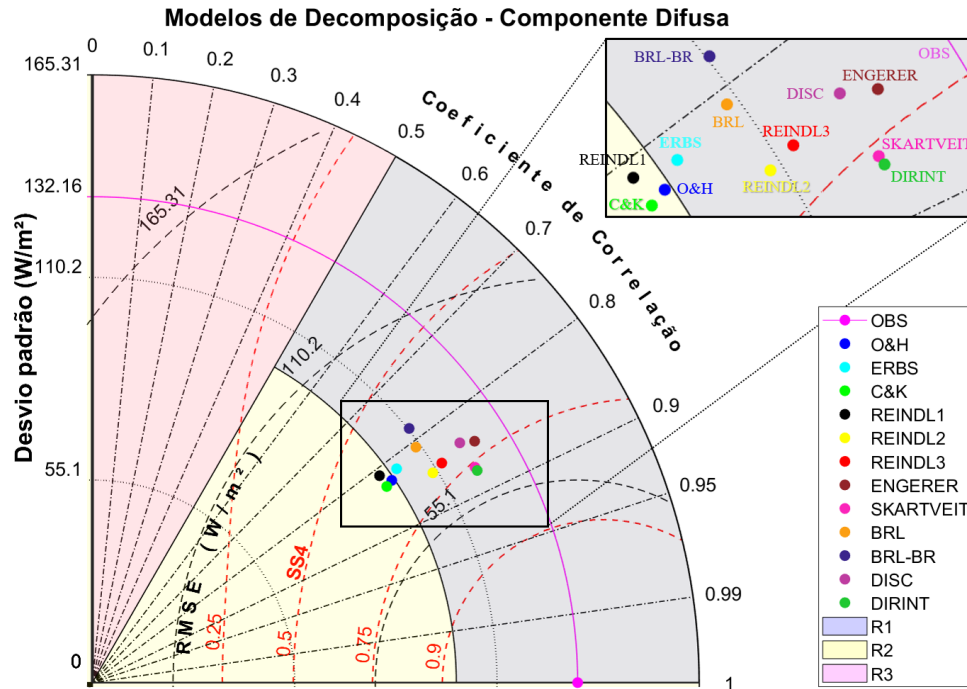


Figura 7: Análise estatística – Diagrama de Taylor.

Fonte: Autor.

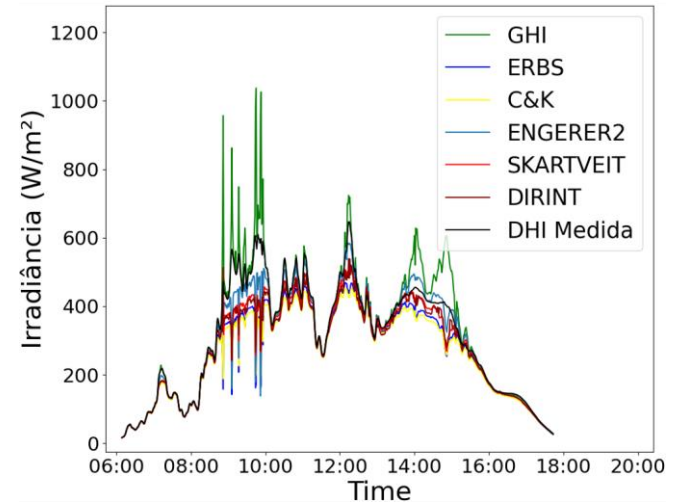
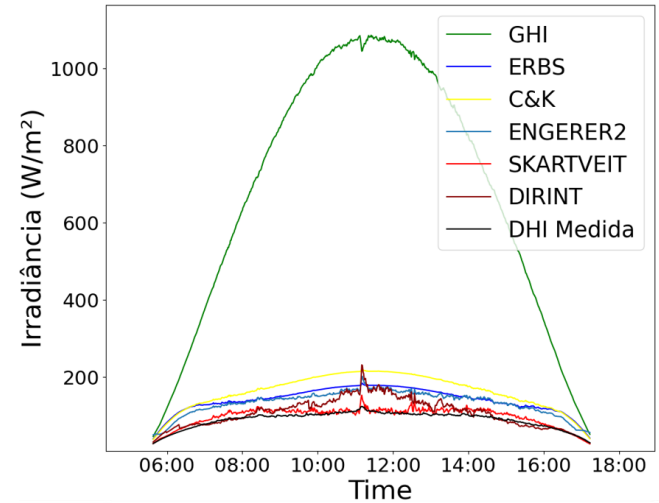


Figura 8: Comportamento da irradiância difusa (DHI) medida e obtida pelos modelos.

Fonte: Autor.

Resultados

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

Fonte: Autor.

- Modelos de um parâmetro apresentaram *skill score* abaixo de 0,64
- ENGERER, SKARTVEIT e DIRINT obtiveram altas correlações e os maiores SS4
- Em Gueymard e Ruiz-Arias (2016), embora o modelo de Perez *et al.* (1992) tenha apresentado os melhores resultados minuto a minuto, recomendam Engerer (2015) para regiões áridas e tropicais.
- Skartveit *et al.* (1998) se destacou no trabalho de Rodrigues *et al.* (2019) para 3 localidades do semiárido brasileiro com latitudes inferiores (escala horária)

Observaciones finales

- Modelos de um parâmetro apresentaram *skill score* abaixo de 0,64
- ENGERER, SKARTVEIT e DIRINT obtiveram altas correlações e os maiores SS4 (entre 0,72 e 0,77)
- Recomenda-se que a separação de *GHI* nas simulações de sistemas FV ou térmicos localizados na região de estudo sejam realizadas 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 decomposição de *GHI* no desempenho de sistemas FV poderão ser realizadas.

References

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Tiba, C.; Fraidenraich, N.; Moszkowicz M.; Cavalcant, E. S. C.; Lyra, F. J. M.; Nogueira, A. M. B.; Gallegos, H. G. *Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos*. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000.

Gracias!

João Victor Medeiros

joao.furtado@ufpe.br

Diego Miranda

diego.rmiranda@ufpe.br

Emerson Gomes

emerson.torres@ufpe.br

Olga Vilela

ocv@ufpe.br

Alex Pereira

alexcp@chesf.gov.br

Eduardo Jatoba

ejatoba@chesf.gov.br

Alcides Neto

alcidesc@chesf.gov.br

José Melo Filho

jbionef@chesf.gov.br



Centro de Energias Renováveis
Center of Renewable Energy

