

Artigo

Comparação de Modelagens e Equacionamento de Irradiação Difusa Estimada para Sistemas Fotovoltaicos

Muriele Bester de Souza^{1*}

<https://orcid.org/0000-0002-4510-5207>

Diego Vitoriano de Freitas²

<https://orcid.org/0000-0002-0089-0205>

Renata Lautert Yang¹

<https://orcid.org/0000-0002-1867-229X>

Gerson Maximo Tiepolo²

<https://orcid.org/0000-0002-0409-4484>

Jair Urbanetz Junior¹

<https://orcid.org/0000-0001-9355-1730>

¹Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia (PPGSE), Laboratório de Energia Solar (LABENS), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, Brasil;

²Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELT), Laboratório de Energia Solar (LABENS), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Editor associado:

Recebido: DD.MM.YYYY; Aceito: DD.MM.YYYY.

* Correspondência: murielebester@gmail.com; Tel.: +55-41-996003310

DESTAQUES

- Aquisição de dados da rede SONDA.
- Uso de metodologias para calcular a irradiação difusa.
- Validação de dados através de análises estatísticas.
- Comparação entre os modelos existentes e o desenvolvido pelos autores.

Resumo: Este trabalho apresenta cinco modelos para estimativa da componente difusa da radiação solar a partir da radiação global horizontal medida pela rede SONDA para a cidade de Curitiba, que correlacionam a fração da radiação difusa (K_d) com o índice de claridade (K_t). Os modelos utilizados para este estudo foram os propostos por Liu e Jordan

(1960), Page (1961), Orgill e Hollands (1977) e Erbs *et al.* (1982). Analisando os resultados entre eles, concluiu-se que a equação de Orgill e Hollands apresentou melhores resultados, então foi desenvolvido um quinto modelo, proposto pelos autores e chamado de Souza et al. (2019) para a cidade de Curitiba a partir deste modelo. Na modelagem, utilizou-se um período de 12 meses de dados fornecidos pela rede SONDA (outubro de 2014 a setembro de 2015) e a validação foi realizada através dos indicadores estatísticos o erro médio (Viés), o erro médio relativo (rViés), a Raiz do Erro Quadrático Médio relativo (rRMSE), o desvio absoluto médio (MBA) e o desvio absoluto relativo médio (rMBA) com dois meses de dados (outubro e novembro de 2015) e as partições utilizadas foram horárias. O melhor modelo para estimativa da componente difusa da radiação neste estudo foi o de Orgill e Hollands.

Palavras-chave: radiação solar; estimativa; irradiação difusa; índice de transmissividade, validação.

INTRODUÇÃO

O Brasil encontra-se em crescente desenvolvimento tecnológico na área das fontes renováveis de energia. Estudar a radiação solar em determinado local onde se irá desenvolver uma pesquisa ou um projeto é muito importante quando se trata de energia solar, e para locais em que a radiação solar não é monitorada, a solução é utilizar modelos ou correlações empíricas para a estimativa [1]. A produção de energia esperada de um sistema fotovoltaico pode ser estimada utilizando modelos que estimam seu rendimento, estes modelos necessitam de parâmetros de entrada, como a irradiância solar global horizontal [2].

A irradiação de maior interesse para o aproveitamento fotovoltaico é a irradiação global horizontal, pois determina a quantidade da radiação recebida por uma superfície plana horizontal. A principal parcela da radiação em dias nublados é a irradiação difusa horizontal, enquanto que em dias de céu claro, sem nuvens prevalece a irradiação direta [3].

As componentes da radiação solar direta e difusa são necessárias em muitas aplicações da energia solar. Pelo país, existem várias estações meteorológicas responsáveis pela medição da radiação global em superfície, mas apenas algumas disponibilizam dados de medição das componentes difusa e direta [4].

No estado do Paraná, em dezembro de 2017, foi publicado o primeiro Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná onde foi percebido, durante o projeto, certa dificuldade na validação dos dados estimados pelo modelo BRASIL-SR com os dados coletados em superfície, devido ao fato do estado do Paraná não possuir rede solarimétrica própria e de alta confiabilidade [5].

Visto a necessidade de se obter dados da radiação difusa e a dificuldade de medição dessa componente, este trabalho tem o objetivo de determinar a irradiação difusa a partir de dados medidos em superfície da irradiação global horizontal na cidade de Curitiba, através dos modelos estudados por Liu e Jordan [6], Page [7], Orgill e Hollands [8] e Erbs et al. [9], e, a partir do modelo que apresentar melhores resultados, elaborar uma equação de estimativa para a cidade de Curitiba com os dados característicos da cidade, tudo em função do índice de claridade na partição horária, ao final, comparar os modelos consolidados com o proposto pelos autores e realizar análises sobre eles.

MATERIAIS E MÉTODOS

A radiação global horizontal e a radiação difusa foram retiradas da base de dados da Estação Curitiba (CTB) pertencente à rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) que possui latitude 25° 29' 43,60" S e longitude 49° 19' 52,35" O [10]. A base fornece um ano e dois meses de dados válidos, nos períodos de outubro de 2014 a novembro de 2015. Os dados são fornecidos de minuto em minuto, portanto, foram realizados cálculos para torná-los horários.

Os modelos escolhidos para o presente estudo são apresentados nas Equações (1) – (5):

Liu e Jordan (1960)

$$\frac{H_d}{H} = 1,39 - 4,027Kt + 5,531Kt^2 - 3,108Kt^3 \quad (1)$$

Page (1961)

$$\frac{H_d}{H} = 1,00 - 1,13Kt \quad (2)$$

Orgill e Hollands (1977)

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,249Kt; \text{ para } 0 \leq Kt < 0,35 \\ 1,557 - 1,84Kt; \text{ para } 0,35 \leq Kt \leq 0,75 \\ 0,177; \text{ para } Kt > 0,75 \end{cases} \quad (3)$$

Erbs et al. (1982)

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,09Kt; \text{ para } 0,22 \leq Kt \\ 0,9511 - 0,1604Kt + 4,388Kt^2 - 16,638Kt^3 + 12,336Kt^4; \text{ para } 0,22 < Kt \leq 0,80 \\ 0,165; \text{ para } Kt > 0,80 \end{cases} \quad (4)$$

Validação das Estimativas do Modelo

O processo de validação da irradiação global para a cidade de Curitiba foi realizado mensalmente, através de filtros para verificar e excluir dados fisicamente impossíveis de ocorrerem de acordo com a rede SONDA e valores negativos de irradiação.

Existem várias maneiras de comparar resultados de modelos numéricos e dados observados. Neste trabalho foram utilizadas análises estatísticas indicadas por Tiepolo et al. [11] e Mubarak [2]. Esta validação utiliza cinco índices estatísticos: o erro médio (Viés), o erro médio relativo (rViés), a raiz do erro quadrático médio relativo (rRMSE), o desvio absoluto médio (MAD) e o desvio absoluto relativo médio (rMAD). Estes parâmetros estão indicados nas Equações (5) – (9):

$$\text{Viés} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_0) \quad (5)$$

Viés indica a tendência do modelo em superestimar (valores positivos) ou subestimar (valores negativos) o comportamento de uma determinada variável [11].

$$rViés = \left| 100 \cdot \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_0)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_0)} \right| \quad (6)$$

O rViés relativo indica o erro médio do modelo em porcentagem sobre o valor da média [11].

$$MAD = \frac{\sum |Mi - Ci|}{n} \quad (7)$$

Onde Mi é a irradiância medida em um plano inclinado e Ci o valor do modelo calculado [2].

$$rMAD = \frac{MAD}{\bar{M}} 100\% \quad (8)$$

O rRMSE dá noção do espalhamento entre os dados medidos em superfície e os estimados pelo modelo e, quanto menores forem os valores, melhor será o desempenho [11].

$$rRMSE = \frac{[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_0)^2]^{1/2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_0)} \quad (9)$$

RESULTADOS

A Figura 1 apresenta as correlações horárias entre a fração da radiação difusa Kd e o índice de transmissividade Kt, que se encontra de acordo com o esperado apresentado pela bibliografia.

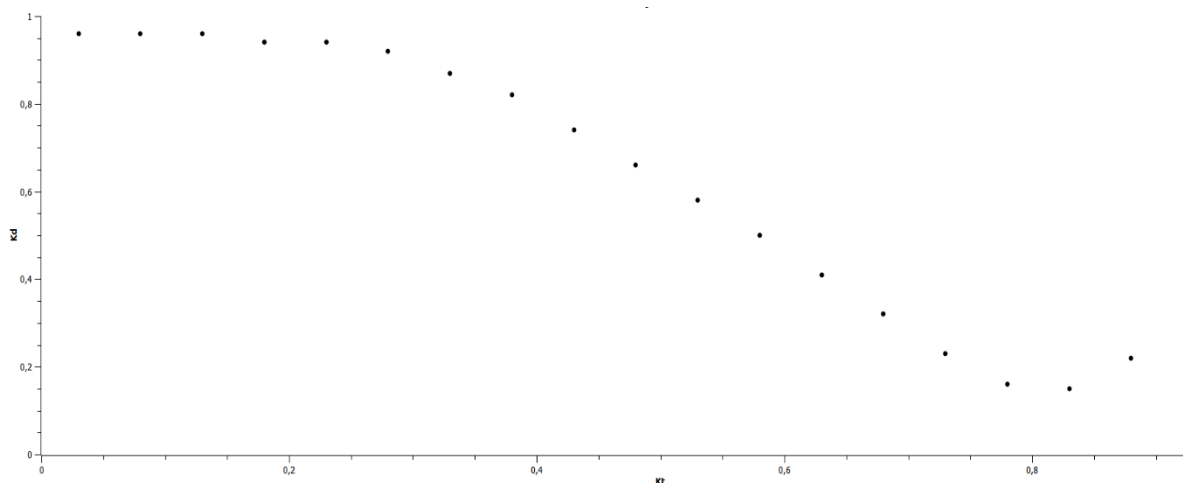


Figura 1. Correlações horárias entre Kd e kt.

Realizadas as análises estatísticas, foi escolhido o modelo que apresentou melhores resultados para realizar o equacionamento proposto pelos autores para a cidade de Curitiba. O modelo é apresentado na Equação 10 e a Tabela 1 mostra os índices estatísticos de todos os modelos apresentados neste estudo.

Souza et al. (2019)

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 0,99 - 0,291Kt; & \text{para } 0 \leq Kt < 0,33 \\ 1,434 - 1,630Kt; & \text{para } 0,33 \leq Kt \leq 0,78 \\ 0,163; & \text{para } Kt > 0,78 \end{cases} \quad (5)$$

Tabela 1. Índices estatísticos de todos os modelos.

Modelo	Devio Médio (Viés)	Desvio Relativo Médio (rViés)	Desvio Absoluto Médio (MAD)	Desvio Absoluto Relativo Médio (rMAD)	Desvio Quadrático Médio (RMSE)
Page	-62,82	-21,38	63,91	22,45	92,42
Orgill e Hollands	-8,66	0,41	23,47	9,14	45,35
Erbs et al.	-6,30	1,53	23,85	9,53	46,86
Liu e Jordan	-71,19	-20,15	74,47	26,90	107,97
Souza et al.	-8,82	-0,03	23,63	9,52	42,50

A Tabela 2 apresenta a classificação final de acordo com os resultados obtidos por cada modelo estudado neste trabalho.

Tabela 2. Classificação dos modelos propostos.

Classificação	Modelo	Ano
1	Orgill e Hollands	1977
2	Souza et al.	2019
3	Erbs et al.	1982
4	Page	1961
5	Liu e Jordan	1960

Nota-se que apesar do equacionamento proposto pelos autores para a cidade de Curitiba utilizando a linha de tendência dos dados medidos pela rede SONDA, o modelo de Orgill e Hollands ainda apresenta os melhores resultados para a estimativa da radiação difusa neste estudo.

DISCUSSÃO

O trabalho proposto foi analisado com base em dados horários da radiação solar. Os modelos propostos por Liu e Jordan e Page são para a estimativa da irradiação solar difusa diária média mensal, enquanto os modelos de Orgill e Hollands e Erbs et al. realizam estimativas de irradiação solar difusa horária.

Os autores optaram por utilizar essa metodologia para modelar uma equação baseada em modelos que utilizariam a mesma base de dados, no mesmo período de tempo. Conforme esperado, os modelos de Page e Liu e Jordan, por serem estudos em dados diários médios mensais, apresentaram os piores resultados neste estudo.

Enquanto os modelos que estimam a irradiação horária apresentaram bons resultados e serviram de modelo para o equacionamento, onde o estudo base escolhido foi o de Orgill e Hollands por apresentar os melhores resultados.

O período utilizado para a validação e estimativas (total de 14 meses) foram muito curtos, seria necessário uma base de dados mais ampla para um estudo mais aprofundado

nesta área, porém, devido a falta de dados medidos disponíveis, e de acordo com a literatura, já se pode realizar estas estimativas com mais de doze meses de dados validados.

CONCLUSÃO

A validação das estimativas de irradiação difusa foi realizada com os dados de superfície da estação pertencente a rede SONDA localizada na cidade de Curitiba, Paraná, pois ainda são as únicas fontes disponíveis dessa componente da radiação atualmente.

Os dados estatísticos mostram que os modelos propostos neste estudo são muito próximos do que se espera, exceto pelos modelos de Page e Liu e Jordan que obtiveram desvios muito altos comparados os resultados.

Apesar do modelo de Orgill e Hollands ter apresentado uma soma entre os desvios menor do que o modelo proposto pelos autores, o modelo de Souza et al. está apresenta resultados muito próximos e satisfatórios para a estimativa da componente difusa da radiação solar.

Os desvios para os modelos de Orgill e Hollands, Page e Souza et al. mostraram excelentes resultado de acordo com a literatura e podem ser utilizados para a estimativa da radiação difusa quando se obtém a radiação global horizontal medida em superfície.

Para saber qual modelo realmente apresenta melhores estimativas da irradiação difusa, o ideal seria possuir mais dados medidos em superfície desta componente, passo este que será realizado na próxima etapa desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UTFPR pelo apoio e infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento destas pesquisas e a COPEL - Distribuição pelo apoio e financiamento dos recursos para realização do projeto P&D ANEEL/COPEL Distribuição PD 2866-0464/2017 - METODOLOGIA PARA ANÁLISE, MONITORAMENTO E GERENCIAMENTO DA GD POR FONTES INCENTIVADAS”.

REFERÊNCIAS

1. Escobedo, J. F.; Gomes, E. N.; Oliveira, A. P.; Soares, J. Frações das Radiações Direta (Kdh) e Difusa (Kd) na Horizontal em Função do Índice de Claridade (Kt), 2006. Disponível online: <http://www.cbmet.org.br/cbm-files/14-6e7047bc029d82a56acaf1d506f40622.pdf> (acesso em 10 de Setembro de 2019).
2. Mubarak, R.; Hofman, M.; Riechelmann, S.; Seckmeyer, G. Comparison of Modelled and Measured Tilted Solar Irradiance for Photovoltaic Applications. *Energies* 2017, 10, 1688; doi:10.3390/en10111688.
3. EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica. Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: http://www.cogen.com.br/content/upload/1/documentos/Solar/Solar_COGEN/NT_EnergiaSolar_2012.pdf (acesso em 05 de Setembro de 2019).
4. Crotti, P.; Rampinelli, G. A. Estimativa das Componentes Direta e Difusa da Radiação Solar em Superfície Horizontal para Araranguá/Sc a partir de Redes Meteorológicas. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018.
5. Souza, M. B; Tonolo, E. A; Yang, R. L.; Tiepolo, G. M.; Urbanetz Jr, J. Determinação da Irradiação Difusa a Partir da Irradiação Global Horizontal – Estudo para a Cidade de Curitiba. *Smart Energy*, 2018, Vol. 5, pp. 184-190.
6. Liu B.Y.H., Jordan R.C. The inter-relationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*. 1960; 4(3):1–19.
7. Page, J. K. The estimation of monthly mean values of daily total short-wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N-40°S. *Proc. U.N. Conf. New Sources Energy*, 1961, Paper no S98, Vol. 4, pp. 378-390.

8. Orgill J.F., Hollands K.G.T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy*. 1977;19(4):357–359.
9. Erbs D.G., Klein S.A., Duffie J.A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*. 1982;28(4):293–302.
10. SONDA. Estação de Curitiba – Dados Ambientais Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/curitiba.html> (acesso em 09 de Setembro de 2019).
11. Tiepolo, G. M.; Pereira, E. B.; Urbanetz JR, J.; Pereira, S. V.; Gonçalves, A. R.; Lima, F. J. L.; Costa, R. S., Alves, A. R. "Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná". 1a Edição. Curitiba: UTFPR, 2017.



© 2018 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).