

AValiação DE Modelos DE Decomposição DE Irradiância Global Sobre O Brasil.

Ricardo Almeida de Siqueira - ricardo.siqueira@inpe.br

André Rodrigues Gonçalves

Rodrigo Santos Costa

Divisão de Impactos, Adaptações e Vulnerabilidade (DIIAV) - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT),
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Resumo. Existe o desafio de se estimar as frações difusa e direta da irradiância solar global em estações solarimétricas que não possuam equipamentos para a medição destes componentes de forma direta. Modelos de decomposição da irradiância global vem sendo utilizados nestes casos para a determinação empírica da sua fração difusa com variados graus de sucesso. Este trabalho apresenta uma análise de desempenho dos modelos de decomposição de radiação de Erbs e de Engerer para algumas estações solarimétricas da rede SONDA sobre o Brasil. As estações escolhidas foram as de Petrolina, Cachoeira Paulista e São Martinho da Serra. Os resultados mostraram que embora o modelo de Engerer exiba melhores métricas em termos de regressão linear (R^2 com valores 0.02 mais altos), para os casos com ângulo zenital solar menores que 60 graus, o modelo de Erbs exibiu melhores resultados.

Palavras-chave: Irradiância Solar; Fração difusa, Modelo de decomposição

1. INTRODUÇÃO

O principal componente do balanço radiativo terrestre é a irradiância global descendente (GHI) (Stuhlmann; Rieland; Paschke, 1990). Esta energia irradiada pelo Sol alimenta diversos processos térmicos, químicos e dinâmicos em nosso planeta, incluindo a fotossíntese, o ciclo hidrológico e a dinâmica de atmosfera e oceanos (Letu *et al.*, 2020).

O GHI é composto por suas componentes direta e difusa. A componente direta se refere à quantidade de energia recebida diretamente pelo Sol, sem sofrer processos radiativos, geralmente definida em relação à incidência perpendicular sobre uma superfície, ou em outras palavras, a irradiância direta normal (DNI). Já a componente difusa se refere à quantidade de energia proveniente das demais direções devido aos processos de espalhamento e reflexão pelos constituintes atmosféricos e superfícies vizinhas, definida em relação a uma superfície horizontal, ou em outras palavras, a irradiância difusa horizontal (DIF). Combinando os dois componentes, podemos definir o GHI pela a soma:

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

onde θ_z é o ângulo zenital do Sol.

Por questões relacionados ao custo de equipamentos (Bright; Engerer, 2019), não são todas as estações solarimétricas que realizam medidas simultâneas de GHI e seus componentes, de forma que geralmente apenas o GHI é obtido. Isto acaba incentivando o surgimento de metodologias para a estimativa destes componentes a partir de valores do próprio GHI . Este problema é análogo ao dos modelos numéricos que estimam GHI e precisam realizar a partição em suas componentes, pois também precisam determinar uma maneira de parametrizar este processo.

Modelos de decomposição são utilizados para particionar a irradiância global em suas componentes e são essenciais para entender a distribuição da radiação solar na atmosfera e na superfície da Terra. Também são úteis para aplicações práticas, como o planejamento e a operação de sistemas de energia solar (Bright; Engerer, 2019). Matematicamente, eles realizam uma determinação empírica para o parâmetro K_d , definido pela fração de radiação difusa, ou:

$$K_d = \frac{DIF}{GHI} \quad (2)$$

Este trabalho avaliou as performances dos modelos de decomposição de Erbs (Erbs; Klein; Duffie, 1982) e de Engerer (Bright; Engerer, 2019; Engerer, 2015) comparando-se as estimativas de radiação difusa com as medidas por estações solarimétricas da rede SONDA (seção 2.1). Mais detalhes sobre os respectivos métodos de decomposição podem ser vistos na seção 2.2, enquanto as métricas utilizadas para a análise estão descritas na seção 2.3.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Dados da rede SONDA

A rede SONDA é uma rede de coleta de dados de radiação solar, vento e variáveis meteorológicas coordenada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) com colaboração de institutos de pesquisa e universidades brasileiras.

Está em operação desde 2004 e foi criada para fornecer dados de apoio para o desenvolvimento de modelos numéricos para o setor energético (Bueno Pereira *et al.*, 2017). Recomendações da Organização Meteorológica Mundial (WMO) para a Baseline Surface Radiation Network (BSRN) são seguidas em termos de manutenção e coleta de dados (McArthur, 2005). Todas as estações utilizam piranômetros do tipo *ISO 9060*, com as medições sendo realizadas a cada 1 segundo e armazenando-se as médias a cada 1 minuto. A Tab. 1 mostra as estações escolhidas para a realização deste trabalho, onde é possível ver suas coordenadas de latitude, longitude e altitude, além do período de medições considerado. Os critérios para a escolha foram a quantidade de dados contínuos em termos anuais e de que representassem diferentes regiões do país.

Tabela 1 – Estações da rede SONDA, com suas coordenadas e período dos dados utilizados.

Estações	UF	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Período
Cachoeira Paulista (CPA)	SP	-22.690	-45.006	574	2015-2018
Petrolina (PTR)	PE	-9.069	-40.320	387	2013-2017
São Martinho da Serra (SMS)	RS	-29.443	-53.823	489	2013-2017

2.2 Decomposição da Irradiância Global

Este estudo avaliou as performances dos modelos de decomposição de Erbs e de Engerer. Scripts Fortran foram criados para a realização dos cálculos. Para o caso do Engerer, o script foi criado baseado no material suplementar fornecido no trabalho do autor (Bright; Engerer, 2019). Esta seção descreve de maneira sucinta a matemática envolvida na estimativa da fração K_d pelos dois métodos.

O modelo de decomposição de Erbs foi desenvolvido a partir de dados de estações de medições dos Estados Unidos entre as latitudes de 31 e 42 graus Norte. Matematicamente, ela é baseada na estimativa de K_d para diferentes intervalos de K_t (clearness index) conforme:

$$K_d = 1 - 0,09.K_t : (K_t < 0,22) \quad (3.1)$$

$$K_d = 0,9511 - 0,164.K_t + 4,388.K_t^2 - 16,638.K_t^3 + 12,336.K_t^4 : (0,22 \leq K_t \leq 0,8) \quad (3.2)$$

$$K_d = 0,165 : (K_t > 0,8) \quad (3.3)$$

onde $K_t = GHI/GE_{xt}$ e GE_{xt} é a irradiância global no topo da atmosfera.

A decomposição de Engerer é mais recente e foi desenvolvida a partir de dados de diversas estações pelo globo e é calculada da maneira abaixo:

$$\Delta K_{tc} = K_{tc} - K_t \quad (4.1)$$

$$\alpha = 1 + \exp(\beta_0 + \beta_1.K_t + \beta_2.AST + \beta_3.\theta_z + \beta_4.\Delta K_{tc}) \quad (4.2)$$

$$K_d = C + \frac{1-C}{\alpha} + \beta_5.K_{de} \quad (4.3)$$

onde K_{tc} é análogo ao parâmetro K_t , mas calculado supondo-se que o céu esteja limpo de forma que:

$$K_{tc} = \frac{GHI_{ic}}{GE_{xt}} \quad (5)$$

com GHI_{ic} sendo referente ao GHI para o caso de céu limpo. AST é o tempo solar aparente e K_{de} é definido como a porção de K_d atribuído ao envigoramento por nuvens, ou seja, aos casos em que o GHI é maior que o valor hipotético GHI_{ic} , devido à reflexão de radiação pelas nuvens. Este fator é calculado por:

$$K_{de} = \max(0, 1 - \frac{GHI_{ic}}{GHI}) \quad (6)$$

Finalmente, os valores de C e dos vários β dependem da resolução temporal. Neste texto foram utilizados os valores de 1 minuto, a resolução temporal dos dados SONDA, e logo temos os respectivos valores para C e β_0, \dots, β_5 de 0,10562; -4,1332; 8,2578; 0,010087; 0,00088801; -4,9302 e 0,44378.

2.3 Métricas de Desempenho

Cada metodologia de partição de irradiância foi avaliada com base em métricas para o cálculo do erro, a raiz do erro médio quadrático relativo ($rRMSE$), o erro médio absoluto percentual ($MAPE$) (Engerer, 2015), além do coeficiente de determinação (R^2), definidos respectivamente por:

$$rRMSE = \frac{1}{O} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (7)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \quad (8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

onde P_i é a estimativa no tempo i , O_i é o valor observado no tempo i , n o número total de observações e \bar{O} a média dos valores observados. Aqui P e O referem-se aos valores de irradiância difusa (DIF) preditos e observados respectivamente. As métricas foram avaliadas em termos médios (R^2) e em função do ângulo zenital solar ($rRMSE$ e $MAPE$).

3. RESULTADOS

A Fig. 1 mostra o comportamento médio horário e seasonal da irradiância descendente global e de suas componentes difusa e direta para cada estação SONDA.

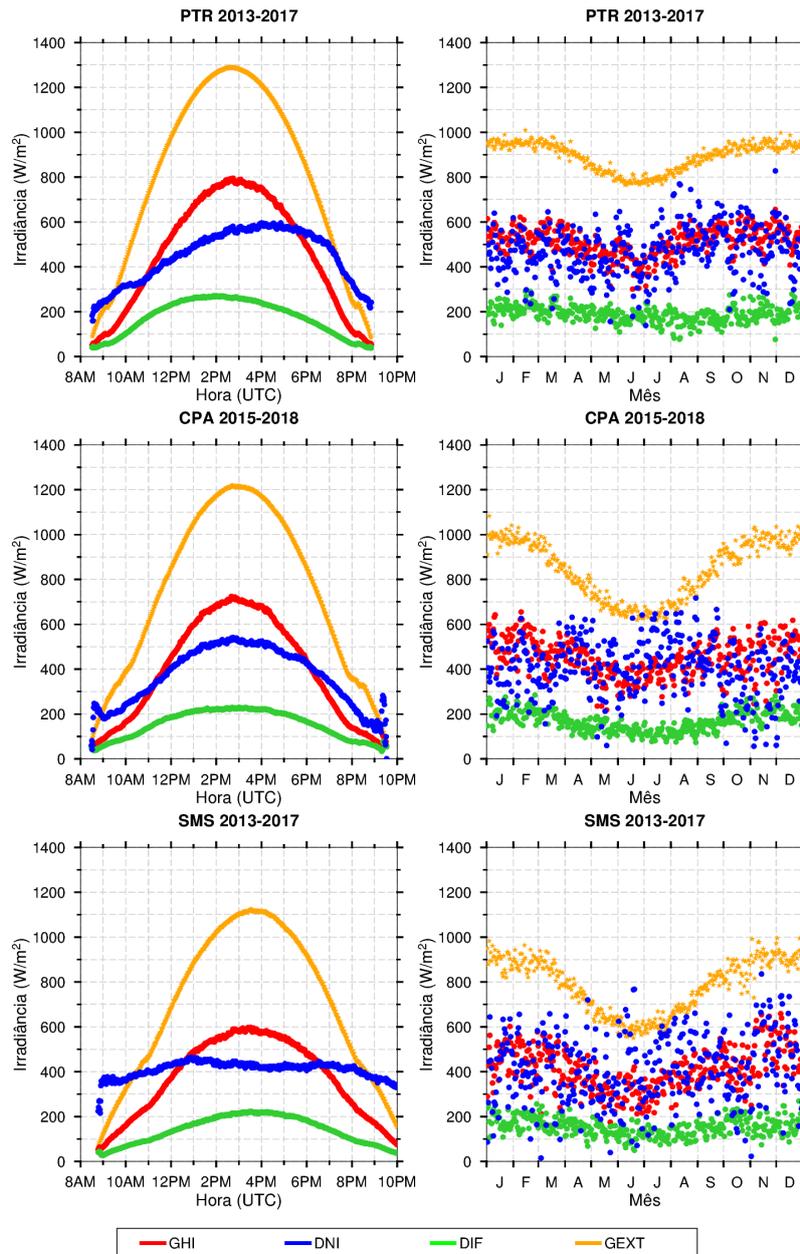


Figura 1 – Valores médios, incluindo dias com e sem nuvens, de GHI , DNI , DIF e $GExt$ calculados com dados das estações de Petrolina (PTR), Cachoeira Paulista (CPA) e São Martinho da Serra (SMS) da rede SONDA. $GExt$ foi estimado a partir das coordenadas de cada estação com a biblioteca Python pvlib (Holmgren; Hansen; Mikofski, 2018)

A Fig. 2 mostra os gráficos de K_d em função de K_t para cada estação, onde é possível notar a amplitude da mancha cinza de pontos representando todos os casos observados. Como um exemplo, para valores de K_t por volta de 0,6, os valores de K_d observado variaram de 0,1 a 0,9. Esse tipo de variabilidade não é capturado pelas parametrizações de K_d em sua totalidade, o que pode ser notado diretamente na figura pelas manchas de pontos azuis e vermelhos representando os valores de K_d para Engerer e Erbs, respectivamente. Logo, os gráficos de K_d por K_t parecem sugerir que a parametrização de Engerer é capaz de representar mais casos distintos que a de Erbs. Este fato parece ter contribuído para os melhores parâmetros de regressão obtidos para a parametrização de Engerer na mesma figura 2, que mostra as equações de regressão obtidas quando se plota o gráfico de K_d parametrizado contra o K_d medido nas estações. Embora o coeficiente linear não tenha apresentado grandes mudanças, os valores do coeficiente angular e do coeficiente de determinação (R^2) foram de 0,01 a 0,02 pontos superiores (mais próximo de 1) para a parametrização de Engerer.

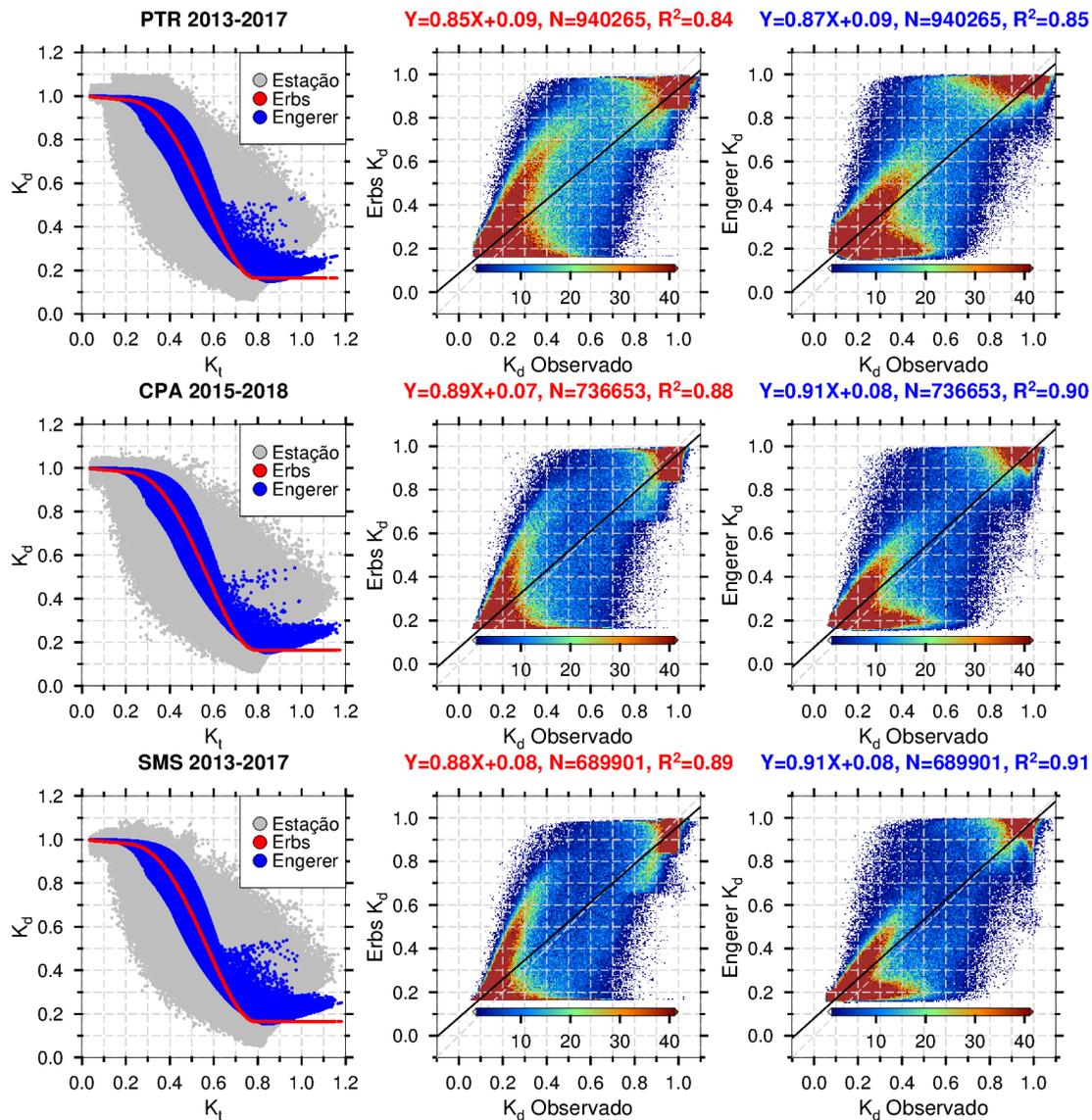


Figura 2 – Os painéis da esquerda exibem o gráfico de K_d por K_t para as estações Sonda de Petrolina (PTR), Cachoeira Paulista (CPA) e São Martinho da Serra (SMS). Para cada estação é exibido o período de dados considerado. Os pontos cinza representam os dados da estação, enquanto os dados vermelhos e azuis representam os valores obtidos via parametrizações de Erbs e Engerer respectivamente. Os demais painéis exibem o histograma de duas dimensões para o K_d medido em cada estação juntamente com o K_d parametrizado de Erbs (painéis centrais) e de Engerer (painéis da direita). Também são exibidas as equações de regressão entre os K_d medido e parametrizado juntamente com o coeficiente de determinação. A barra de cores representa o número de dados em cada intervalo de 0.005.

Embora na média a parametrização de Engerer tenha obtido melhor performance, decidiu-se avaliar também o comportamento das parametrizações em função do ângulo zenital solar. A Fig. 3 mostra os erros de *DIF* em termos de *rRMSE* e *MAPE*, calculados em função do ângulo zenital solar para as mesmas estações da figura 2. Para valores de ângulo zenital menores que 60 graus, os erros na componente *DIF* predita pela parametrização de Engerer tenderam a ser maiores que os de Erbs quanto menores os ângulos zenitais. Porém a situação se inverte para o oposto para os ângulos maiores de 60 graus, onde a parametrização de Erbs erra de forma muito mais significativa que a de Engerer. Considerando a média das três estações, para ângulos menores que 60 graus, os erro de *DIF* para Engerer foram de aproximadamente 40% para *rRMSE* e 45% para *MAPE*, enquanto para Erbs foram de aproximadamente 40% para *rRMSE* e 35% para *MAPE*. Para ângulos maiores que 60 graus, as estimativas de *DIF* com Erbs podem chegar a 60% de erro sendo aproximadamente 1,5 vezes maiores que a de Engerer. De maneira geral e considerando as estações Sonda analisadas, embora a parametrização de Engerer erre um pouco mais para os casos de Sol mais à pino, este erra muito menos para os casos em que o Sol esteja mais próximo do nascente ou poente ($\theta_z > 60$) e é provável que esta compensação seja responsável pelos melhores coeficientes de determinação observados na figura 2.

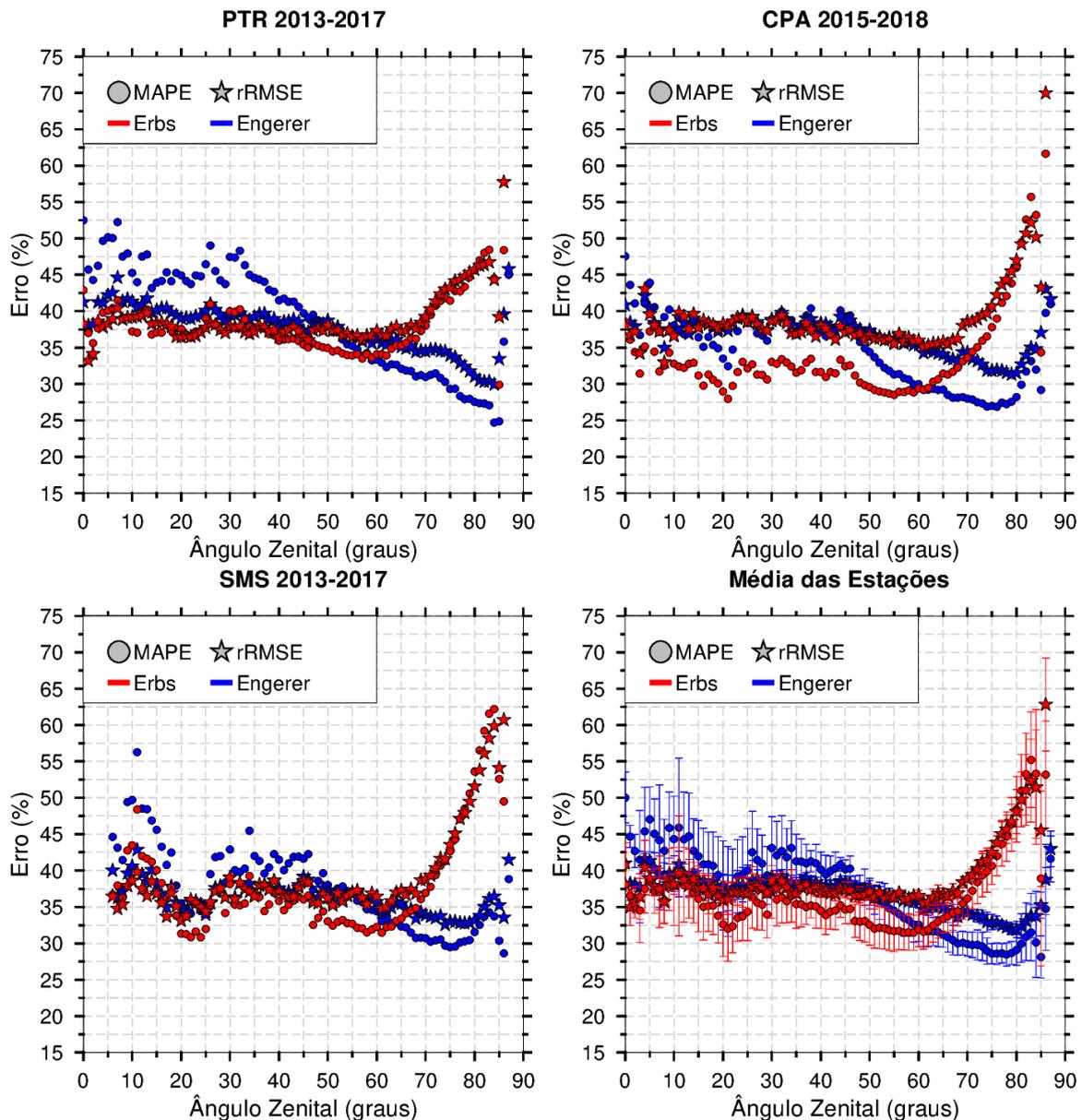


Figura 3 – Valores médios obtidos para o *MAPE* e *rRMSE* em função do ângulo zenital solar para as estações Sonda de Petrolina (PTR), Cachoeira Paulista (CPA) e São Martinho da Serra (SMS). Para cada estação é exibido o período de dados considerado. Também é exibido a média e desvio padrão (barras de erro) considerando estas três estações.

4. CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma análise de desempenho dos modelos de decomposição de irradiância de Erbs e de Engerer para algumas estações solarimétricas da rede SONDA sobre o Brasil. Os resultados mostraram que o modelo de Engerer exibe melhores métricas em termos de regressão linear (R^2 com valores 0.02 mais altos) provavelmente associado a sua capacidade de representar mais casos distintos para a variabilidade observada de K_d e pelo fato do erro do modelo de Erbs aumentar de forma significativa para ângulo zenitais maiores que 60 graus. Por outro lado, para os casos com ângulo zenital solar menores que 60 graus, o modelo de Erbs exibiu melhores resultados principalmente em termos de *MAPE* (erros aproximadamente 10% menores). Esta é uma vantagem importante para o modelo de Erbs, pois este apresentou maior destreza na estimativa da fração difusa quando a incidência de *GHI* é maior.

REFERÊNCIAS

- Bright, Jamie M., Engerer, Nicholas A. Engerer2: Global Re-Parameterisation, Update, and Validation of an Irradiance Separation Model at Different Temporal Resolutions. *Journal of Renewable and Sustainable Energy, American Institute of Physics*, v. 11, n. 3, p. 033701, mai. 2019. DOI: 10.1063/1.5097014. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5097014>>. Acesso em: 22 set. 2022.
- Bueno Pereira, Enio et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. [S.l.: s.n.], 2017. ISBN 978-85-17-00089-8. Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html>. Acesso em: 22 set. 2022.
- Engerer, N. A. Minute Resolution Estimates of the Diffuse Fraction of Global Irradiance for Southeastern Australia. *Solar Energy*, v. 116, p. 215–237, 1 jun. 2015. ISSN 0038-092X. DOI: 10.1016/j.solener.2015.04.012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15001905>>. Acesso em: 28 set. 2022.
- 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*, v. 28, n. 4, p. 293–302, 1 jan. 1982. ISSN 0038-092X. DOI: 10.1016/0038-092X(82)90302-4. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X82903024>>. Acesso em: 16 nov. 2023.
- Holmgren, William F.; Hansen, Clifford W., Mikofski, Mark A. Pylib Python: A Python Package for Modeling Solar Energy Systems. *Journal of Open Source Software*, v. 3, n. 29, p. 884, 7 set. 2018. ISSN 2475-9066. DOI: 10.21105/joss.00884. Disponível em: <<https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.00884>>. Acesso em: 9 jan. 2023.
- Letu, Husi et al. A Review of the Estimation of Downward Surface Shortwave Radiation Based on Satellite Data: Methods, Progress and Problems. *Science China Earth Sciences*, v. 63, n. 6, p. 774–789, 1 jun. 2020. ISSN 1869-1897. DOI: 10.1007/s11430-019-9589-0. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11430-019-9589-0>>. Acesso em: 7 mar. 2023.
- McArthur, L. J. B. World Climate Research Programme - Baseline Surface Radiation Network (BSRN) - Operations Manual Version 2.1. EPIC3Downsview, Ontario, CANADA, Experimental Studies Division, Atmospheric Environment Service. Abr. 2005. Disponível em: <<https://epic.awi.de/id/eprint/30644/>>. Acesso em: 15 mar. 2023.
- Stuhlmann, Rolf; Rieland, Martin, Paschke, Ehrhard. An Improvement of the IGMK Model to Derive Total and Diffuse Solar Radiation at the Surface from Satellite Data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology, American Meteorological Society*, v. 29, n. 7, p. 586–603, 1 jul. 1990. ISSN 1520-0450, 0894-8763. DOI: 10.1175/1520-0450(1990)029<0586:AIOTIM>2.0.CO;2. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/29/7/1520-0450_1990_029_0586_aiotim_2_0_co_2.xml>. Acesso em: 13 fev. 2023.

EVALUATION OF GLOBAL IRRADIANCE DECOMPOSITION MODELS OVER BRAZIL.

Abstract. *There is a challenge in estimating the diffuse and direct fractions of global solar irradiance at solarimetric stations that do not have equipment for direct measurement of these components. Decomposition models of global irradiance have been used in these cases for the empirical determination of its diffuse fraction, with varying degrees of success. This work presents a performance analysis of the Erbs and Engerer radiation decomposition models for some solarimetric stations of the SONDA network over Brazil. The chosen stations were those of Petrolina, Cachoeira Paulista, and São Martinho da Serra. The results showed that although the Engerer model exhibits better metrics in terms of linear regression (R^2 with values 0.02 higher), for cases with solar zenith angles less than 60 degrees, the Erbs model exhibited better results.*

Keywords: *Solar Irradiance, Diffuse fraction, Decomposition model*