

# DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO PARA ESTIMAR A IRRADIAÇÃO GLOBAL EM FORTALEZA UTILIZANDO A METODOLOGIA DE BIRD

**Francisca Fernanda Carneiro Pereira** (CEUPI) - fernandacarneiro1212@gmail.com

**Caio Araujo Damasceno** (UFPI) - caio@ufpi.edu.br

## **Resumo:**

*A energia solar fotovoltaica por ser uma energia limpa, sustentável e renovável é uma alternativa técnica e econômica viável que garante a segurança e a diversificação do sistema elétrico e está crescendo exponencialmente nos últimos anos. Conhecer os valores de irradiação solar em superfície é importante para o desenvolvimento de projetos em energia solar, obtidos através de radiômetros instalados em determinados locais ou publicações como em atlas de energia solar. A estimativa da radiação solar de curto prazo para a geração de energia é um desafio, pois sua natureza é inconstante. O objetivo desse estudo foi desenvolver um modelo horário para estimar radiação global horizontal diária em Fortaleza utilizando a metodologia de Bird, com dados coletado na estação Fortaleza-A305 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Dos vários modelos existentes na literatura para calcular a radiação global foi utilizado o modelo de céu aberto Bird. Um modelo para estimar a radiação foi desenvolvido através do BIRD, de técnicas de regressão linear, em função da temperatura e da umidade e da radiação medida através da metodologia Bird. O modelo foi validado via coeficiente de correlação (R) e a Raiz do Erro Quadrático Médio Normalizado (nRMSE). Os resultados obtidos mostram que o modelo tem um bom desempenho para estimar a radiação global.*

**Palavras-chave:** *Irradiação Solar, Estações Automáticas Meteorológicas, Energia*

**Área temática:** *Radiação Solar*

**Subárea temática:** *Recursos Solares e Meteorologia da Radiação Solar*

# DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO PARA ESTIMAR A IRRADIAÇÃO GLOBAL EM FORTALEZA UTILIZANDO A METODOLOGIA DE BIRD

**Francisca Fernanda Carneiro Pereira** – fernandacarneiro1212@gmail.com

**Prof. Me. Caio Araújo Damasceno** – caio.damasceno@ceupi.com.br

Centro de Ensino Unificado do Piauí, Curso de Engenharia Elétrica

## 1.1. Recursos solares e meteorologia da radiação solar

**Resumo.** A energia solar fotovoltaica por ser uma energia limpa, sustentável e renovável é uma alternativa técnica e econômica viável que garante a segurança e a diversificação do sistema elétrico e está crescendo exponencialmente nos últimos anos. Conhecer os valores de irradiação solar em superfície é importante para o desenvolvimento de projetos em energia solar, obtidos através de radiômetros instalados em determinados locais ou publicações como em atlas de energia solar. A estimativa da radiação solar de curto prazo para a geração de energia é um desafio, pois sua natureza é inconstante. O objetivo desse estudo foi desenvolver um modelo horário para estimar radiação global horizontal diária em Fortaleza utilizando a metodologia de Bird, com dados coletado na estação Fortaleza-A305 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Dos vários modelos existentes na literatura para calcular a radiação global foi utilizado o modelo de céu aberto Bird. Um modelo para estimar a radiação foi desenvolvido através do BIRD, de técnicas de regressão linear, em função da temperatura e da umidade e da radiação medida através da metodologia Bird. O modelo foi validado via coeficiente de correlação (R) e a Raiz do Erro Quadrático Médio Normalizado (nRMSE). Os resultados obtidos mostram que o modelo tem um bom desempenho para estimar a radiação global.

**Palavras-chave:** Irradiação Solar, Estações Automáticas Meteorológicas, Energia

## 1. INTRODUÇÃO

A radiação solar é a principal fonte de todos os fenômenos atmosféricos e processos físicos, químicos e biológicos observados nos ecossistemas e pode ser aproveitada de várias formas, no campo da energia vem ganhando muito destaque. Assim sendo relevante um conhecimento preciso do recurso solar.

De acordo com Sclar et al. (2003), estudos das intensidades e variações de radiação solar devem compreender medidas por um período mínimo de um ano. Isso se deve ao fato de as medidas variarem conforme as diferentes condições atmosféricas (nebulosidade, umidade relativa do ar etc.), latitude local e da posição no tempo (hora do dia e dia do ano), devido à inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira diariamente (movimento rotacional) e o caminho elíptico que a Terra percorre ao redor do sol (movimento de translação). Sendo assim, a duração solar do dia - período de visibilidade do Sol ou de claridade - varia, em algumas regiões e períodos do ano, de zero hora (sol abaixo do horizonte durante todo o dia) a 24 horas (sol sempre acima do horizonte).

Em consequência de a luz ser refletida e absorvida pela atmosfera, apenas parte da radiação solar atinge a superfície da Terra. Contudo, conforme CRESEB, estima-se que a energia solar que incide na superfície da terra seja da ordem de 10 mil vezes o consumo energético mundial.

Como define Fiorin et al., (2011), a irradiação difusa corresponde a parcela da irradiação que chega à superfície depois de sofrer o espalhamento, o processo físico no qual o material particulado, aerossol ou molécula de gases que estão no percurso da onda eletromagnética remove energia da onda incidente, em todos os comprimentos de onda, e dispersa essa energia em todas as direções. No processo de absorção da radiação solar, as moléculas de gases absorvem a energia incidente, que é transformada em movimento molecular que resulta no aquecimento da atmosfera.

No Brasil a maior parte do território nacional fica próxima a linha do equador, portanto não apresenta grandes variações de radiação solar ao longo do dia. Os valores anuais da radiação solar global incidente variam de 1.550 a 2.400 kWh / m<sup>2</sup> em todo o território nacional e são mais altos que os da maioria dos países da União Europeia, como Alemanha (900 - 1.250 kWh / m<sup>2</sup>) e França (900 - 1.650 kWh / m<sup>2</sup>). Como é mostrado na Fig. 1, em boa parte do país, principalmente na região do nordeste e parte do centro-oeste teve a radiação é superior a 1826 kWh / m<sup>2</sup>.

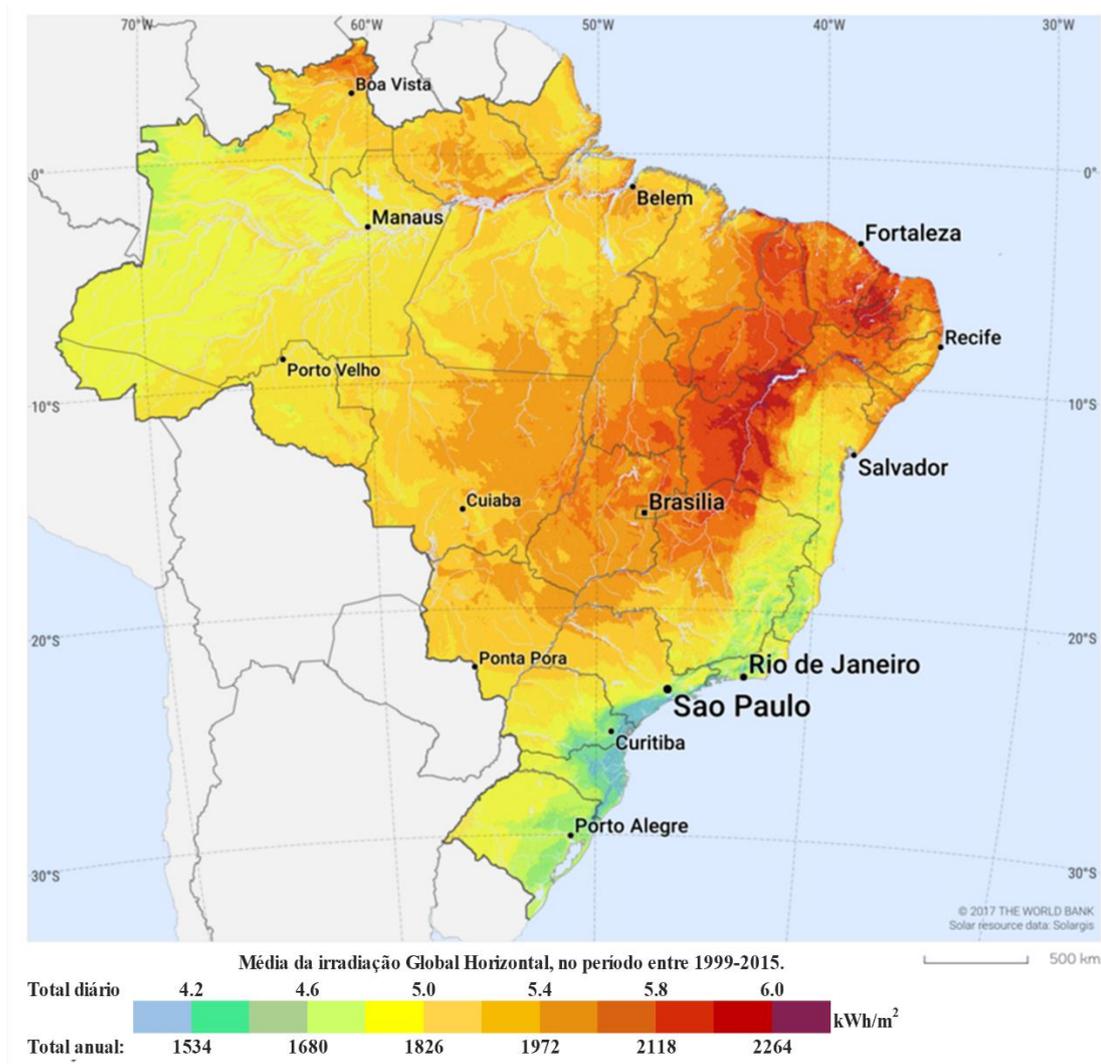


Figura 1 – Mapa Solarimétrico da Brasil.  
Fonte: Solar finger (2017)

A irradiação solar pode ser utilizada de diferentes maneiras e de forma direta utilizada para geração de energia elétrica, através dos painéis fotovoltaicos, e na geração de energia térmica, por meio do aquecimento de fluidos e ambiente. Dentre as duas, a energia solar fotovoltaica é a que vem sendo mais utilizada no mundo. Ressalta-se ainda que a energia solar é uma energia limpa, sustentável e renovável, além de sua geração não emitir gases de efeito estufa.

As taxas de crescimento de energia renovável, singularmente as energias fotovoltaicas, diferem substancialmente entre regiões e nações, no entanto, no Brasil a capacidade de geração de energia renovável experimentou seu maior aumento anual em 2017, estima-se que houve um aumento de cerca de 938 MW neste ano.

## 2. DADOS E METODOLOGIA

### 2.1. Dados

Conforme a Nota técnica nº. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET, as informações meteorológicas (temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade dos ventos e radiação solar) são coletadas das estações meteorológicas automáticas (EMA), de minuto em minuto. A cada hora, esses dados são integralizados e disponibilizados para serem transmitido, via satélite ou telefonia celular, para a sede do Instituto Nacional de Meteorologia INMET, em Brasília, onde são validados, através de um controle de qualidade e armazenado no banco de dados.

O centro de controle (CCIM) do INMET, em Brasília, permite monitorar o funcionamento de cada equipamentos das EMA's. Se caso ocorra alguma pane em uma EMA, um relatório será enviado pelo CCIM à SEGER para as providências de reparo e consertos durante a próxima programação mensal de manutenção.

Os dados utilizados nesse trabalho são provenientes da EMA A305, mostrada na Fig. 2, que está situada na cidade de Fortaleza no Ceará, localizada em Latitude 3° 48' 56,5" S, Longitude 38° 32' 16,1" W, altitude 30 metros. Foram obtidos os dados de irradiação, temperatura e umidade correspondentes ao período de um ano, de 18 de novembro de

2018 a 19 de novembro de 2019, através da plataforma web do INMET. Os dados de radiação são memorizados no intervalo de 1h em W/m<sup>2</sup> por dia juliano.



Figura 2 - Estações meteorológicas automáticas situada em Fortaleza – CE.  
Fonte: INMET (2019)

## 2.2. Metodologia

Bird e Hulstrom (1986) desenvolveram um modelo que produz uma estimativa das irradiações global, diretas e difusa para condições de céu aberto, ou seja, que produz estimativas do feixe direto de radiação em céu claro, sem neblina, nuvens ou poluição, em função da absorção e transmissão pelos componentes atmosféricos, tais como o ozônio, gases, vapor d'água e aerossóis.

O modelo de céu aberto de Bird usa uma parametrização baseada em cálculos de transferência radiativa e é composto de expressões algébricas simples que definem a posição do sol em relação ao ponto de estudo baseado no dia e hora do ano. Ele pode ser usado em resoluções de 1 minuto ou mais e pode aceitar entradas nessa frequência, se disponível. No entanto, na ausência de parâmetros de entrada de alta resolução temporal, os valores médios climatológicos ou anuais podem ser utilizados como entradas para o modelo, tais como, pressão atmosférica.

Os dados obtidos através desse algoritmo foram utilizados como um dos parâmetros de entrada para o modelo de previsão de radiação diária através da técnica de regressão múltipla, para a qual foram considerados também a temperatura e a umidade. De acordo com Montgomery et al. (2001) a análise de regressão é uma técnica estatística para investigar e modelar a relação entre variáveis, em outras palavras, a análise regressão linear gera uma equação que narra a relação estatística entre uma ou mais variáveis preditoras e a variável resposta. As aplicações de regressão são numerosas e ocorrem em quase todos os campos, incluindo engenharia, ciências físicas e químicas, economia, administração, ciências biológicas e da vida e ciências sociais. Por certo, a análise de regressão pode ser a técnica estatística mais amplamente usada.

O modelo de regressão linear múltipla, ou seja, que depende de mais de uma componente, é representado pela equação:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n + \varepsilon \quad (1)$$

No qual  $y$  = Variável dependente;  $x_n$  = n-ésima variável independente;  $\beta_n$ = n-ésimo coeficiente ou parâmetro do modelo;  $\varepsilon$  = efeito da variável residual. A diferença entre o valor observado de  $y$  e a reta ( $\beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n$ ) é um erro residual  $\varepsilon$ .

Nesse estudo  $y$  indica a radiação estimada,  $x_1$  indica a radiação global segundo a metodologia Bird,  $x_2$  indica a média de temperatura horária e  $x_3$  e média umidade de ar horária para obtenção da radiação horária. Ao final, os valores de radiação horária são somados para obtenção do valor da radiação diária.

Heil (2010) discorreu que na regressão linear multivariada, a estimação dos parâmetros é feita por meio do método mínimos quadrados. Assim estimam-se os valores dos parâmetros  $\beta_i$  para  $i=1, 2, 3, \dots, n$ , os quais minimizam a soma dos quadrados das distâncias (SQD), procurando diminuir ao máximo a quantidade da variável aleatória " $\varepsilon$ " existente no processo.

Os resultados da regressão foram correlacionados utilizando o Coeficiente de correlação ( $r$ ) aplicado aqui também é chamado de coeficiente de correlação Bravais – Pearson e é representado pela equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

Onde  $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$  e  $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$ , e  $x$  representa a radiação medida na estação e  $y$  a radiação estimada pelo modelo proposto.

Também foi mostrado o quanto a regressão linear está ajustada através do coeficiente de determinação ( $r^2$ ), definido por uma medida descritiva da proporção da variação de  $y$  que pode ser explicada por variação em  $x$ , e é o quadrado do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) explicado pela razão da variação modelo pela variação total, expressa na Eq. (3):

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (3)$$

Os resultados de  $r^2$  devem ser sempre positivos e quanto mais próximo de 1 melhor.

Fez-se uma estimativa, através desse método, da irradiação global esperada para o mesmo sensor da estação meteorológica A305. Após isso, usou-se os dez primeiros meses para o desenvolvimento da regressão múltipla dos mínimos quadrados e mínimos quadrados ordinários (OLS) e obteve-se o método de estimação de radiação global. Posteriormente foi aplicada o modelo aos últimos 31 dias dos meses (outubro e novembro). Por fim validou os resultados via coeficiente de correlação ( $r$ ) e a Raiz do Erro Quadrático Médio Normalizado (nRMSE). Para processar este último utilizamos a equação a seguir, em que  $O$  será a radiação medida na estação e  $P$  a obtida pelo modelo proposto.

$$RMSE = \max \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{0,5} \times \left( \frac{100}{O} \right) \quad (4)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 3 mostra a relação entre radiação medida a radiação estimada pelo modelo apontado, onde ambas as radiações são medidas em ( $W/m^2$ ) e a equação do gráfico é  $y = 0,4526x + 57,625$ . O espalhamento da correlação é justificável devido a vários fatores como presença de nuvens, aerossóis e chuvas que contribuem para o espalhamento da irradiação, do mesmo modo para temperatura e umidade.

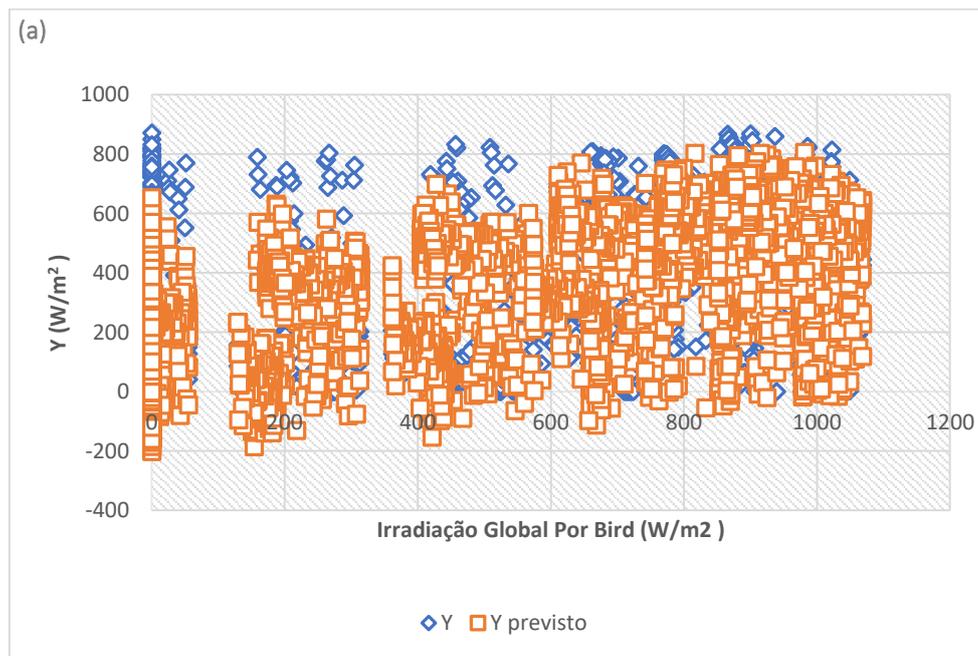


Figura 3 – Regressão linear entre os valores da irradiação medida e irradiação global pelo método de Bird.

Através da Fig. 4 observamos a correlação entre radiação medida a radiação estimada tendo a temperatura como variáveis de entrada e a equação encontrada foi  $y = 12.934x - 24.751$ .

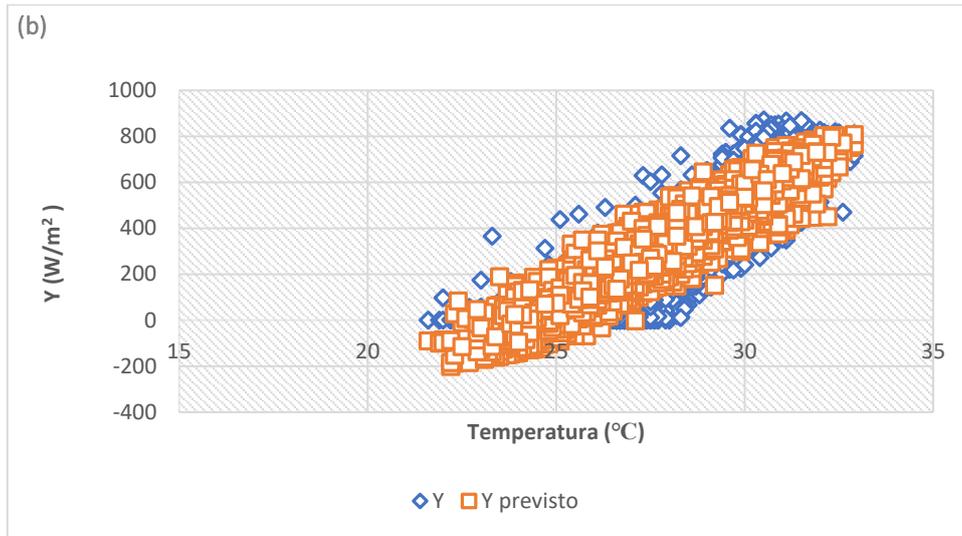


Figura 4 – Regressão linear entre os valores da irradiação medida e temperatura local.

Para a correlação exposta na Fig. 5, envolvendo umidade como variável de entrada, entre radiação medida a radiação estimada a equação encontrada foi  $y = 2.9407x + 76.684$ .

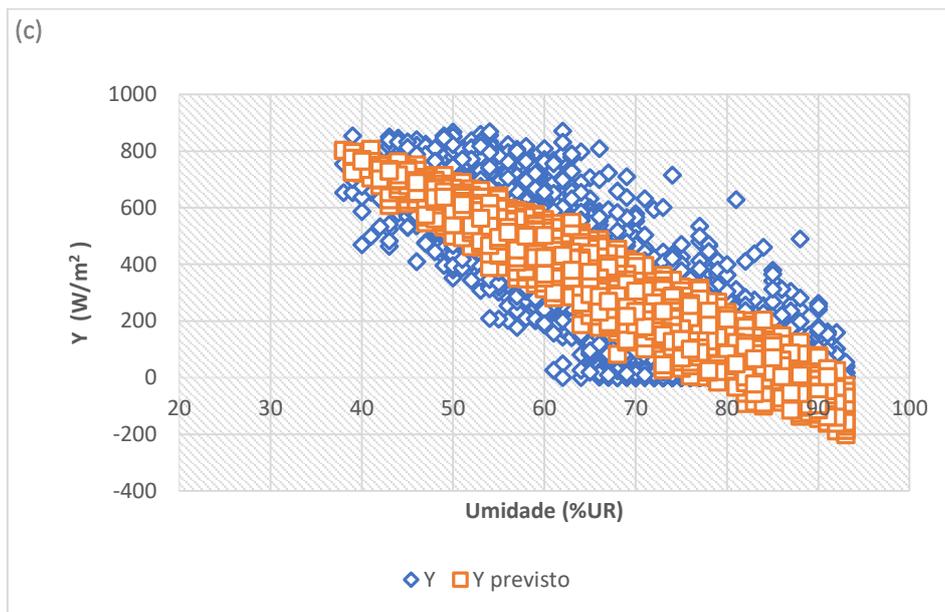


Figura 5 – Regressão linear entre os valores da irradiação medida e umidade local.

Considerando o modelo multivariável obtido e representado pela equação  $Y = 0.107 * X_1 + 34.213 * X_2 - 10.324 * X_3 - 1.451$ , A correlação entre as variáveis é satisfatória com resultado de 0.9339 e o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) do modelo foi 87,21%.

A Fig. 6 expõe a relação entre a radiação estimada e a medida entre os dias 21 de outubro de 2019 e 18 de novembro de 2019, dentre esses dias, alguns tiveram os níveis de umidade bastante elevados, nesses dias pudemos observar uma discrepância entre a relação da radiação estimada pelo modelo proposto e a medida. Partindo dessa relação pudemos observar a frequência de erros.

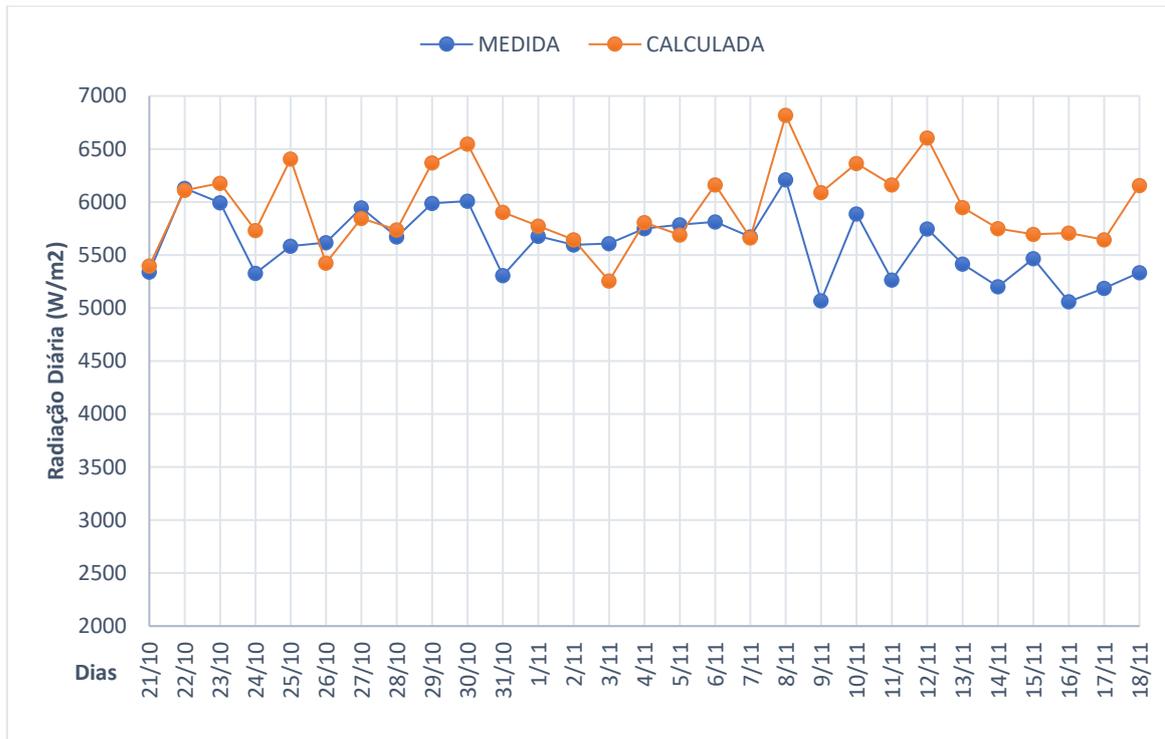


Figura 6 – A relação da radiação medida nas EMA situada em Fortaleza – CE e a estimada pelo modelo proposto.

Na Fig. 7 está exposta a distribuição da frequência de erros em percentual entre os valores reais e os valores obtidos pelo modelo e observa-se que na maioria dos dias apresentou valores aceitáveis de erro.

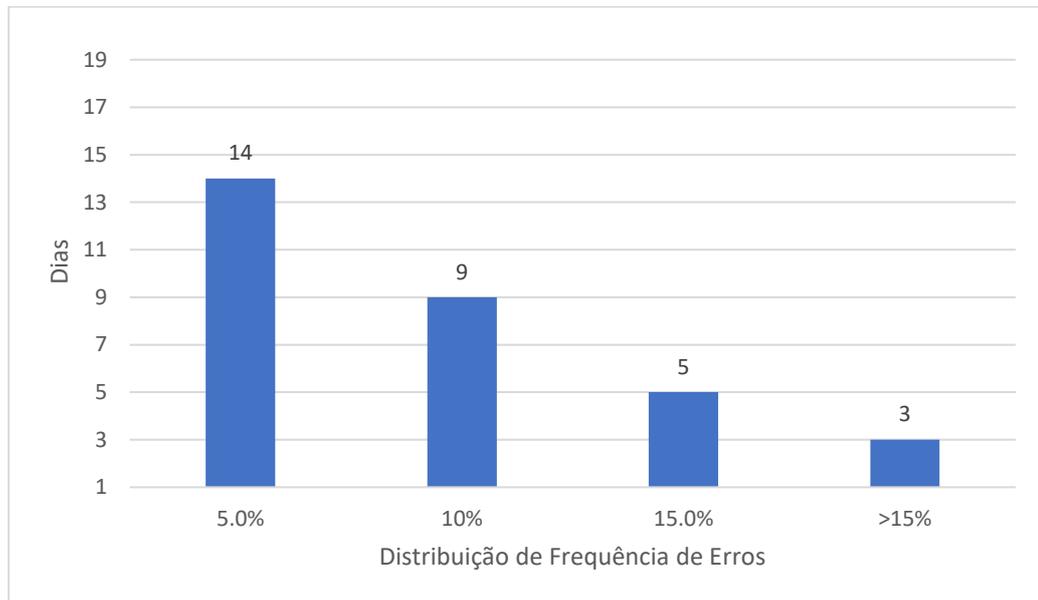


Figura 2 – A distribuição de frequência de erros, entre radiação medida e a estimada, ao longo de um mês.

Após a aplicação nos 31 dias, obteve-se como resultados dos indicadores estatísticos o nRMSE = 1.54%, considerado bastante satisfatório.

### 3. CONCLUSÕES

A metodologia de Bird resultou no modelo  $Y = 0.107 * X_1 + 34.213 * X_2 - 10.324 * X_3 - 1.451$  que foi validado de maneira satisfatória. Através de comparações de valores de radiação parametrizados em relação aos, os fatores que aparentemente estão aumentados em comparação aos medidos, demonstraram precisão. As estimativas de radiação de

irradiação global apresentaram erros de raiz quadrada média de 85.989 em comparação aos medidos na estação automática do INMET.

Quando comparados os resultados obtidos por meio do modelo com o valor real de irradiação mostram discrepâncias, entretanto estas são satisfatoriamente aceitáveis. Estes erros ocorrem em consequência dos diversos fenômenos atmosféricos e a radiação pode ser alterada em dias chuvosos, úmidos ou nublado, por exemplo.

De maneira geral o modelo validado apresentou os resultados estatísticos bastantes satisfatórios isso mostra que o que pode ser usados para estimar a radiação global em Fortaleza – CE.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio Brito.C, Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=301](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=301)
- Dodge, Y. 2008. The Concise Encyclopedia of Statistics. Springer, p. 115-118
- Fiorin et al., 2011. Aplicações de redes neurais e previsões de disponibilidade de recursos energéticos solares. Rev. Bras. Ensino Fís. vol.33, n.1.
- Heil, J., 2013. Emprego da estatística multivariada como proposta para o cálculo do valor venal e tributação imobiliária. Diss., Universidade Federal do Paraná. Rev. Produção Online, v. 13, n. 2, pp. 601-633.
- INMET – Instituto Nacional de meteorologia. Ministério Da Agricultura, Pecuária E Abastecimento. Data Base. 2019. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>
- Montgomery, D. C.; Vining, G. G.; Peck, E. A., 2001. Introduction to Linear Regression Analysis. ed. 3, New York: John Wiley & Sons, p 641.
- Neter, J.; Kutner, M. H.; Nachtsheim, C. J.; Li, W., 2005. Applied Linear Statistical Models. 5. ed. New York: Mc Graw-Hill/Irwin, 1396 p.
- Pereira, A.B.; Villa Nova, N.A.; Galvani, E., 2003. Estimation of Global Solar Radiation Flux Density in Brazil from a Single Measurement at Solar Noon. Rev. Biosystems Engineering. v.86, n.1, p. 27-34.
- Querino, C.A.S., Moura, M.A.L., R.F.F. Lyra, Mariano, G.L., 2006. Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zenital na região Amazônica. Rev. Bras. de Meteorologia. v. 21(3a), p. 42 - 49.
- Scolar, J.; Martins, D.; Escobedo, J. F., 2003. Estimativa da irradiação total sobre uma superfície inclinada a partir da irradiação global na horizontal. Revista Brasileira de Geofísica, v.21, p.249-258.

## DEVELOPMENT OF A MODEL TO ESTIMATE GLOBAL IRRADIATION IN FORTRESS USING BIRD

**Abstract.** Photovoltaic solar energy as a clean, sustainable and renewable energy is a viable technical and economical alternative that guarantees the reability and diversification of the electrical system and has been growing exponentially in recent years. Be aware of the values of solar irradiation on the surface is important for the development of solar energy projects and can be obtained through radiometers installed in certain locations or publications such as solar energy atlases Estimating short-term solar radiation for power generation is a challenge, as its nature is uncertain.. The objective of this study was to develop an hourly model to estimate daily horizontal global radiation in Fortaleza using the Bird methodology, with data collected at the Fortaleza-A305 station of the National Institute of Meteorology (INMET). Among the various models in the literature to calculate global radiation, the open sky model BIRD was used. The radiation obtained through this model was adjusted using linear regression techniques, depending on the temperature and humidity and on the radiation measured using the Bird methodology. The model was validated by the correlation coefficient (R) and the normalized Root Mean Square Error (nRMSE). The results obtained show that the model has a good performance to estimate the global radiation.

**Keyword:** Solar Irradiation, Meteorological Automatic Stations, Energy