

# Estimativa da Radiação Global no Plano Inclinado na Latitude a Partir da Radiação Global Horizontal para a Cidade de Curitiba/PR

Muriele Bester de Souza\* Nicolas Moreira Branco\*\* Renata Lautert Yang\*  
Gerson Máximo Tiepolo\* Jair Urbanetz Junior\*

\*Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil (e-mails: murielebester@gmail.com; relautert@gmail.com; tiepolo@utfpr.edu.br; urbanetz@utfpr.edu.br).

\*\*Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil (e-mail: nicolasmbranco@gmail.com)

---

**Abstract:** This paper evaluates four methods of global irradiation indicators in the tilted surface, comparing as referring to values measured on the surface. The average values come from a standard SONDA solarimetric station (National Environmental Data Organization System) installed at the Federal Technological University of Paraná (UTFPR) campus Curitiba, Neoville and the diffuse irradiation data are estimated by the methods of Erbs et al (1982) and Souza et al. (2020). Mathematical models consolidated by Liu and Jordan (1963), Hay-and-Davies (1980), HDKR (method proposed by several authors Hay-and Davies (1980), Klucher (1979) and Reindl (1990)) and the Perez et al. (1990) model were used to estimate global irradiation the tilted surface. Statistical parameters were used to validate the data and verify the best model for the city. The statistical indexes showed satisfactory results in terms of characteristics, where all rRMSE values for all models studied were less than 20%, which according to the indicator considers the models' performance to be good.

**Resumo:** Este trabalho avalia quatro métodos de estimativas de irradiação global no plano inclinado, comparando as estimativas com valores medidos em superfície. Os valores medidos são provenientes de uma estação solarimétrica padrão SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) instalada na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus Curitiba sede Neoville e os dados da irradiação difusa são estimadas pelos métodos de Erbs et al (1982) e Souza et al. (2020). Foram utilizados modelos matemáticos consolidados por Liu e Jordan (1963), Hay-and-Davies (1980), HDKR (método proposto por diversos autores Hay-and Davies (1980), Klucher (1979) e Reindl (1990)) e o modelo de Perez et al. (1990) para estimar a irradiação global no plano inclinado na latitude. Para validação dos dados e verificação do melhor modelo para a cidade foram utilizados parâmetros estatísticos. Os índices estatísticos mostraram resultados bastante satisfatórios quanto às estimativas, onde todos os valores de rRMSE para todos os modelos estudados foram menores que 20%, o que de acordo com o indicador considera o desempenho dos modelos como bons.

**Keywords:** Global Horizontal Irradiation; Global Irradiation on the Tilted Surface; Validation; Estimation; Solarimetric Station.

**Palavras-chaves:** Irradiação Global Horizontal; Irradiação Global no Plano Inclinado; Validação; Estimativa; Estação Solarimétrica.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A maior parte da matriz energética do Brasil é renovável, em grande parte devido as hidrelétricas. Entretanto, cada vez mais, o aumento dessa fonte torna-se mais difícil, tendo em vista limitações ambientais e, também, que boa parte desse potencial já está sendo explorado. Tendo isso em vista e devido a acordos internacionais (Paris Agreement, 2015) outras fontes como energia eólica e solar têm sido cada vez mais exploradas no Brasil (EPE,2019), principalmente a energia eólica que já possui um percentual significativo na região nordeste.

Por outro lado, a energia solar ainda não possui tamanha representação, mas segue aumentando em grande ritmo. Para o melhor aproveitamento de projetos fotovoltaicos é relevante conhecer detalhadamente o comportamento e características da radiação solar que chega à superfície terrestre. A radiação é dividida em componentes para facilitar seu estudo, segundo Pereira et al. (2017) elas são:

Irradiação extraterrestre ( $G_0$ ): taxa de energia incidente por unidade de área em um plano horizontal definido no topo da atmosfera

Irradiação direta normal ou DNI ( $G_n$ ): é a taxa de energia por unidade de área diretamente do sol, normal a superfície

Irradiação direta horizontal ( $G_{dir}$ ): é a taxa de energia por unidade de área diretamente do sol em uma superfície horizontal

Irradiação difusa horizontal ( $G_{dif}$ ): é a taxa de energia por unidade de área decorrente do espalhamento do feixe solar

Irradiância Global Horizontal ( $G$ ): é a taxa de energia total por unidade de área em uma superfície horizontal. É a soma das componentes direta e difusa

Algumas dessas componentes são demonstradas na Fig. 1. Além dessas componentes também é relevante o conhecimento sobre a radiação sobre planos inclinados em relação a superfície horizontal, para ser usada em uma grande variedade de aplicações, incluindo projetos de engenharia para coletores solares, projetos de arquitetura, planejamento urbano, estudos agrônômicos de insolação sobre vegetação e em estudos micrometeorológico sobre circulação local. (Scolar et al., 2004)

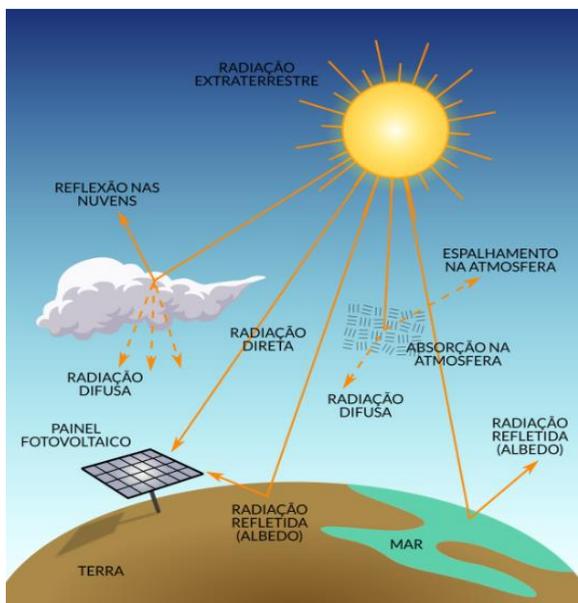


Fig. 1 Radiação Solar e Respectivas Componentes (Tiepolo et al., 2017).

## 2. DADOS DA RADIAÇÃO SOLAR EM CURITIBA

No estado do Paraná existem estações do Instituto Nacional de Meteorologia, o INMET, que fornecem dados meteorológicos e que medem, dentre eles, a radiação solar global horizontal. Também há uma estação da rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) na cidade de Curitiba, projeto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) que possui sensores para determinar as radiações global horizontal, direta normal, difusa além de outros dados solarimétricos, meteorológicos e anemométricos (SONDA, 2019) mas que parou de disponibilizar dados em 2015, fornecendo apenas 14 meses de dados válidos para estudos. Algumas instituições de ensino superior como a Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Curitiba (UTFPR),

possuem sensores para a medição da radiação solar. A UTFPR, financiada pela COPEL-Distribuição através do projeto “P&D ANEEL/COPEL-DIS/UTFPR-CT: Metodologia para Análise, Monitoramento e Gerenciamento da Geração Distribuída por Fontes Incentivadas” implantou, em 2019, sete estações solarimétricas em seis de campi da Universidade e que representam os diferentes microclimas encontrados no estado, incluindo três estações solarimétricas padrão SONDA, uma delas em Curitiba na sede Neoville.

Em sua grande maioria, as estações climatológicas instaladas pelo Brasil coletam apenas a radiação global horizontal, pois uma estação da rede SONDA, por exemplo, demanda custos elevados para sua implantação. Como forma de se conseguir obter valores das componentes da radiação solar, muitos estudiosos desenvolveram modelos matemáticos para estimar essas componentes como as irradiações difusa e direta em superfícies horizontais ou inclinadas na latitude do local, a partir de dados medidos em superfície da irradiância global horizontal. Conhecendo a importância da radiação solar em superfícies inclinadas para as mais diversas aplicações, que dependem diretamente da latitude local, faz-se necessário estudar os modelos que melhor estimam as componentes da cidade estudada.

Este trabalho tem por objetivo determinar a irradiação global no plano inclinado na latitude local a partir de dados medidos em superfície da irradiação global horizontal na cidade de Curitiba a partir de modelos consolidados propostos por Liu e Jordan (1963), modelo de Hay-and-Davies (1980), o modelo HDKR proposto por diversos autores que adicionaram frações da componente difusa, sendo eles: Hay-and Davies (1980), Klucher (1979) e Reindl (1990) e o modelo de Perez et al. (1990). Para definir qual modelo é o mais adequado foi realizada a comparação dos valores medidos e estimados através de indicadores estatísticos e realizada a análise comparativa dos resultados gerados.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A irradiação global no plano inclinado na latitude do local ( $I_t$ ) possui três importantes componentes de irradiação: a difusa ( $I_d$ ), a direta ( $I_b$ ) e a refletida pela superfície ( $I_r$ ). As componentes dependem do ângulo de inclinação da superfície em relação à superfície horizontal ( $\beta$ ), visto que este ângulo altera a parcela do hemisfério celeste e do solo visível pela superfície, além do ângulo de azimute e do dia do ano (Souza et al., 2020). É importante conhecer a quantidade de irradiação solar incidente no plano onde se possui painéis fotovoltaicos instalados para se realizar o dimensionamento correto de um sistema de geração fotovoltaica de forma a otimizar o sistema e estimar a quantidade de energia que pode ser gerada ao longo de um ano (Pereira et al., 2017).

A base de dados medidos em superfície utilizada neste estudo fornece valores das componentes global no plano horizontal e no plano inclinado no período de oito meses de dados válidos, de outubro de 2019 a maio de 2020. Os dados foram fornecidos a cada um minuto e tratados para a obtenção de dados horários.

### 3.1 Irradiação Global Horizontal ( $I$ ) e Global no Plano Inclinado Medidos em Superfície ( $I_T$ )

Os dados de irradiância global horizontal e global no plano inclinado medidos para validação e estimativa dos modelos foram obtidos da base de dados da Estação de Pesquisa Solar implantada pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná através do Laboratório de Energia Solar – LABENS – localizada no câmpus Curitiba, Sede Neoville, que possui latitude  $25^{\circ}30'26,71''S$ , longitude  $49^{\circ}19'06,96''O$  e altitude de 932 m.

Os dados foram medidos por piranômetros do modelo CMP10 da fabricante Kipp & Zonen, eles são piranômetros de termopilha padrão secundário cuja função é converter a energia térmica em energia elétrica. A Fig. 2 apresenta os piranômetros conforme instalados em uma bancada na estação solarimétrica padrão SONDA.



Fig. 2 Piranômetros CMP10 global horizontal e no plano inclinado na latitude (Acervo LABENS, 2020).

### 3.2 Irradiação Difusa – Modelos para Estimativa

A partir dos dados de irradiância global horizontal obtidos da estação SONDA instalada na UTFPR Campus Curitiba, sede Neoville, foi estimada a componente difusa ( $\frac{I_d}{I}$ ) a partir de modelos matemáticos estudados por Souza et al. (2020), os modelos escolhidos para este trabalho são eles Erbs et al. (1982) que pode ser calculado por (1) e Souza et al. (2020) que pode ser calculado utilizando (2).

#### Método de Erbs et al. (1982).

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

#### Método de Souza et al. (2020).

$$\frac{I_d}{I} = 0,914 + 0,970K_t - 3,985K_t^2 + 1,900K_t^3; \text{ para } 0 \leq K_t \leq 0,78 \quad (2)$$

Onde  $K_t$  é o índice de transmissividade definido como a razão entre a irradiação solar na superfície terrestre ( $I$ ) e a irradiação solar extraterrestre  $I_0$  (Querino et al. 2010),  $K_t$  é calculado utilizando (3).

$$K_t = \frac{I}{I_0} \quad (3)$$

### 3.2 Irradiação Direta ( $I_b$ )

Como a radiação global horizontal é a soma das componentes direta e difusa, com os dados medidos da irradiação global horizontal e os dados estimados da componente difusa, é possível estimar a fração direta da radiação solar através do cálculo apresentado em (4) (Pereira et al., 2017).

$$I_b = I - I_d \quad (4)$$

### 3.3 Métodos para Estimativa da Radiação Global no Plano Inclinado na Latitude ( $I_T$ )

Os modelos estudados neste trabalho são consolidados pela literatura internacional e foram sugeridos pelos autores Duffie & Beckman (2013). Equações (5)-(6), (8)-(9) apresentam os métodos utilizados.

#### Método Isotrópico - Liu e Jordan (1963)

O modelo difuso isotrópico foi proposto por Liu e Jordan (1963) e considera que a irradiação difusa é recebida uniformemente de todo o hemisfério celeste, não levando em conta distorções causadas por fatores atmosféricos, o método pode ser calculado por (5).

$$I_T = I_b R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (5)$$

Onde:  $R_b$  é o fator geométrico relacionado ao ângulo de incidência da radiação direta sobre a superfície;  $\rho_g$  é o albedo local e  $\beta$  é a inclinação do plano em graus.

#### Método Anisotrópico de Hay-and-Davies (1980).

O método de Hay-and-Davies para o cálculo da  $I_T$  não é muito mais complexo que o modelo isotrópico e leva a estimativas ligeiramente mais altas de radiação na superfície inclinada, este modelo é baseado na suposição de que toda a irradiação difusa pode ser representada por duas partes: a isotrópica e a circunsolar, toda da mesma direção que a radiação de feixe (Duffie & Beckman, 2013), o método pode ser calculado conforme apresentado em (6).

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (6)$$

Onde  $A_i$  é um índice de anisotropia que é uma função da transmitância da atmosfera para radiação direta e é calculada por (7).

$$A_i = \left( \frac{I_b}{I_0} \right) \quad (7)$$

#### Método Anisotrópico de HDKR.

Como o modelo de Hay-and-Davies não trata do clareamento do horizonte, Reindl et al. (1990) adicionou um termo de clareamento do horizonte, proposto por Kutcher (1979), ao modelo de Hay-and-Davies, modificando o modelo anisotrópico e transformado no referido modelo de HDKR

(Duffie & Beckman, 2013), que estima a componente global no plano inclinado na latitude conforme (8).

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[ 1 + f \operatorname{sen}^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (8)$$

Onde  $f$  é um fator de modulação que na forma do termo  $1 + f \operatorname{sen}^3 \left( \frac{\beta}{2} \right)$  explica a nebulosidade.

#### **Método Anisotrópico de Perez et al. (1990).**

Este modelo baseia-se em uma análise mais detalhada das três formas difusas componentes que pode ser calculada por (9).

$$I_T = I_b R_b + I_d (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_d F_1 \frac{a}{b} + I_d F_2 \operatorname{sen} \beta + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (9)$$

Onde:  $F_1$  e  $F_2$  são coeficientes que representam a contribuição da irradiação difusa circunsolar e a contribuição da irradiação difusa horizontal, respectivamente.  $a$  e  $b$  são termos que justificam os ângulos de incidência do disco de radiação circunsolar.

Todos os parâmetros utilizados pelos métodos podem ser encontrados em Duffie & Beckman (2013) e nos estudos dos autores referidos.

### 3.2 Validação das Estimativas dos Modelos

Segundo Lopes (2002), é necessário e importante acompanhar o desempenho dos modelos de previsão para que se possa confirmar suas validades e mantê-los atualizados. Existem diversas formas para comparação de resultados de modelos numéricos que possuem dados observados (Tiepolo et al, 2017). Neste trabalho foram utilizados parâmetros estatísticos utilizados por vários autores e alguns utilizados pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná para a validação dos dados estimados, são eles: o Erro Absoluto Médio Percentual (MAPE), o Coeficiente de Correlação de Pearson ( $r$ ), a Raiz do Erro Quadrático Médio relativo (rRMSE), o Erro Médio (Viés) e o Erro Médio relativo (rViés) (Tiepolo et al., 2017). As métricas utilizadas pelo Atlas também foram utilizadas pelos autores para a estimativa da irradiação difusa em outros estudos.

**MAPE.** É a média de todos os erros absolutos percentuais e indica o tamanho médio do erro, expresso como uma porcentagem do valor observado, independentemente do erro ser positivo ou negativo (Lopes, 2002) e é calculado conforme apresentado em (10).

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|X_t - \hat{X}_t|}{|X_t|} * 100 \quad (10)$$

Onde:  $t$  é o período,  $N$  é o número de períodos de previsão  $t$ ,  $X_t$  é a demanda real para o período  $t$  e  $\hat{X}_t$  é a previsão para o período  $t$ .

As definições dos demais índices estatísticos são definidos de acordo com a bibliografia apresentada por Tiepolo et al. (2017):

**Coeficiente de correlação de Pearson,  $r$ .** Medida adimensional de associação linear entre as estimativas e os dados medidos, variando de -1 a 1. A estimativa ideal é aquela que atinge o valor mais próximo de 1. Equação (11) indica o coeficiente de correlação de Pearson.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \bar{\phi}_i)(\phi_0 - \bar{\phi}_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \bar{\phi}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\phi_0 - \bar{\phi}_0)^2}} \quad (11)$$

Onde:  $\phi_i$  e  $\phi_0$  são dados estimados e dados observados enquanto  $\bar{\phi}_i$  e  $\bar{\phi}_0$  são suas respectivas médias.

**rRMSE.** Permite a noção do espalhamento entre os dados medidos em superfície e os estimados pelo modelo e, quanto menores forem os valores, melhor será o desempenho e está descrito em (12).

$$rRMSE = \frac{[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_0)^2]^{1/2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_0)} \quad (12)$$

Onde o desempenho de um modelo de estimativa de irradiação pode ser considerado excelente se  $rRMSE < 10\%$ ; bom se  $10\% \leq rRMSE \leq 20\%$ ; aceitável se  $20\% \leq rRMSE \leq 30\%$ ; e pobre se  $rRMSE \geq 30\%$ .

**Viés.** Indica a tendência do modelo em superestimar (valores positivos) ou subestimar (valores negativos) o comportamento de uma determinada variável, conforme apresenta (13).

$$Viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_0) \quad (13)$$

Onde:  $\phi_0$  é o valor observado da variável no  $i$ -ésimo instante do tempo e  $\phi_i$  é o valor da mesma variável produzida pelo modelo correspondente ao mesmo instante de tempo do observado e  $N$  é o número de amostras de tempo da série.

**Viés relativo.** Indica o erro médio do modelo em porcentagem sobre o valor da média, e é apresentado em (14).

$$r Viés = \left| 100 \cdot \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_0)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_0)} \right| \quad (14)$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para análise inicial, foi escolhido o MAPE como índice estatístico para verificar em qual mês houve o menor e o maior erro percentual dos dados estimados por cada um dos modelos em relação aos dados medidos. A Tabela 1 apresenta resultados do MAPE (em %) mensalmente no período analisado, utilizando a irradiação difusa estimada por Erbs et al. (1982).

Percebeu-se que para os modelos estimados através da difusa calculada por Erbs et al. (1982) o modelo de Liu e Jordan obteve melhor comportamento para o mês de janeiro de 2020, enquanto todos os outros modelos, de Hay-and-Davies, HDKR e Perez obtiveram os melhores resultados para o mês de outubro de 2019.

**Tabela 1. Erro Absoluto Médio Percentual (MAPE) Mensal por Modelo, em % - Difusa por Erbs et al. (1982)**

	Liu e Jordan	Hay-and-Davies	HDKR	Perez
Outubro 2019	6,98	6,97	7,01	7,27
Novembro 2019	8,67	8,36	8,44	9,09
Dezembro 2019	9,33	9,29	9,34	11,80
Janeiro 2020	6,89	7,01	7,03	7,68
Fevereiro 2020	8,86	8,79	8,82	9,27
Março 2020	7,44	7,33	7,31	10,58
Abril 2020	8,80	8,75	8,75	9,44
Mai 2020	32,08	56,54	56,45	30,34

A Fig 3 apresenta graficamente as curvas de irradiância global no plano inclinado na latitude utilizando o modelo de estimativa da irradiação difusa sugerida por Erbs et al. (1982) para o mês de outubro, que foi o mês onde obtiveram-se as estimativas para o plano inclinado na latitude com menores variações de MAPE.

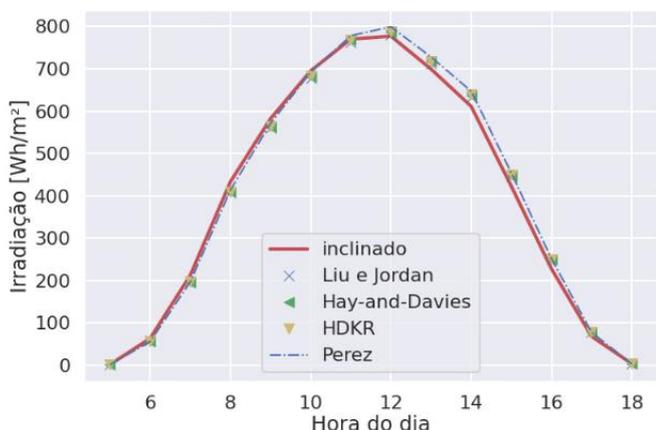


Fig. 3 Irradiância Global no Plano Inclinado do Mês de Outubro de 2019 – Difusa Irradiação por Erbs et al (1982).

A Tabela 2 apresenta resultados do MAPE (em %) mensalmente, utilizando a irradiação difusa estimada por Souza et al. (2020).

Percebeu-se que para os modelos estimados através da difusa calculada por Souza et al. (2020) todos os modelos de Liu e Jordan, Hay-and-Davies, HDKR e Perez obtiveram os melhores resultados para o mês de outubro de 2019.

A Fig 4 apresenta graficamente as curvas de irradiância global no plano inclinado na latitude utilizando o modelo de estimativa da irradiação difusa sugerida por Souza et al. (2020) para o mês de outubro, que foi o mês onde todas as estimativas para o plano inclinado na latitude obtiveram as menores variações de MAPE.

**Tabela 2. Erro Absoluto Médio Percentual (MAPE) Mensal por Modelo, em % - Difusa por Souza et al. (2020)**

	Liu e Jordan	Hay-and-Davies	HDKR	Perez
Outubro 2019	7,21	7,18	7,23	7,66
Novembro 2019	8,28	7,83	7,92	9,16
Dezembro 2019	22,94	23,11	23,15	22,05
Janeiro 2020	20,09	20,28	20,30	20,33
Fevereiro 2020	14,65	14,69	14,68	14,82
Março 2020	7,43	7,32	7,32	10,57
Abril 2020	23,00	22,74	22,70	23,76
Mai 2020	37,64	37,39	37,36	38,23

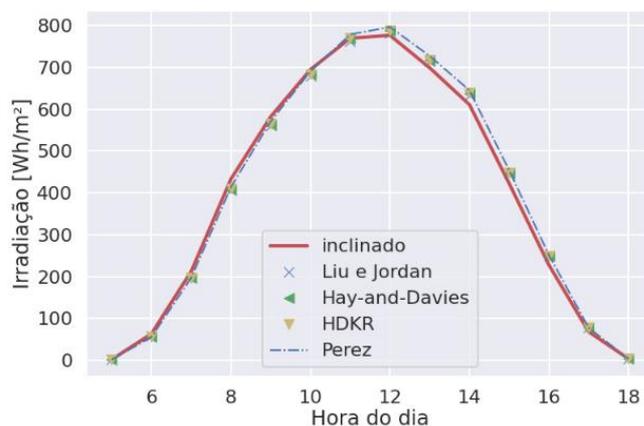


Fig. 4 Irradiância Global no Plano Inclinado do Mês de Outubro de 2019 – Difusa Irradiação por Souza et al (2020).

Os resultados no período analisado para os parâmetros estatísticos dos valores estimados de irradiação no plano inclinado pelos modelos e estimados com a irradiação difusa proposta por Erbs et al. (1982) com os medidos estão apresentados nos gráficos de dispersão das Figs. 5-8, apresentando os modelos de Liu e Jordan, Hay-and-Davies, HDKR e Perez, respectivamente.

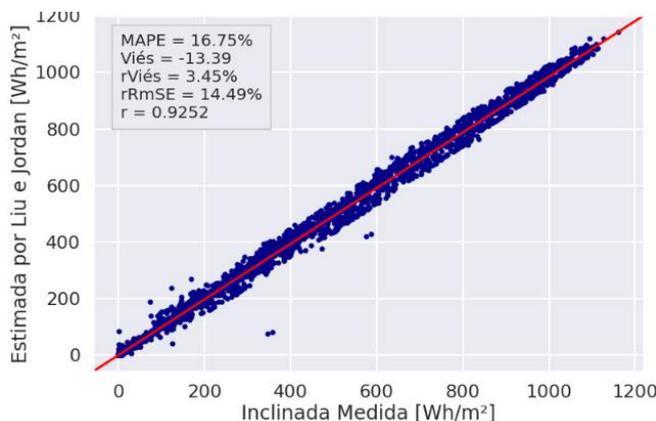


Fig. 5 Gráfico de Dispersão para a Irradiância Global Inclinada na Latitude Utilizando a Difusa por Erbs et al. (1982) – Modelo de Liu e Jordan.

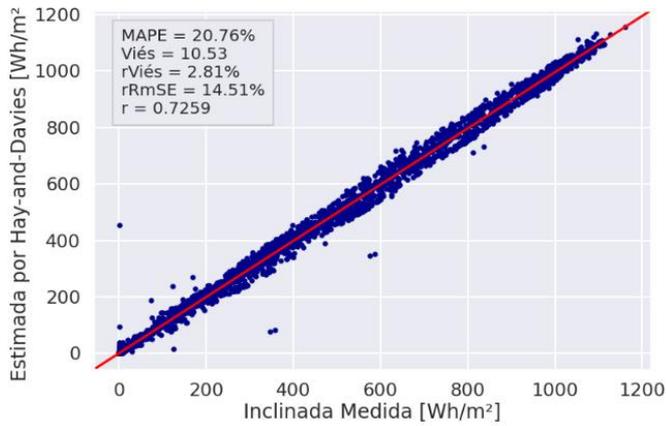


Fig. 6 Gráfico de Dispersão para a Irradiação Global Inclinada na Latitude Utilizando a Difusa por Erbs et al. (1982) – Modelo de Hay-and-Davies.

os modelos de Liu e Jordan, Hay-and-Davies, HDKR e Perez, respectivamente.

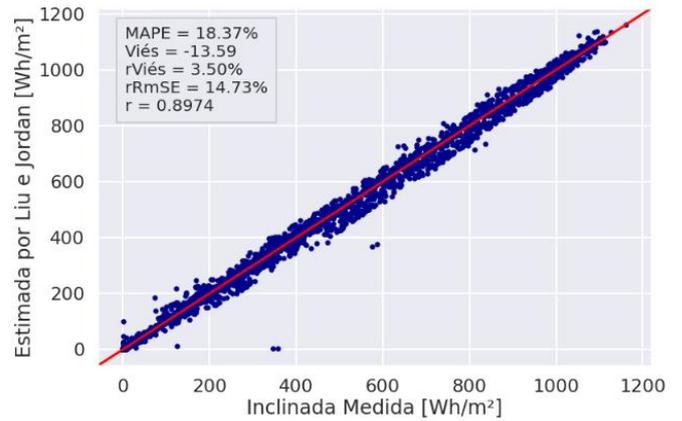


Fig. 9 Gráfico de Dispersão para a Irradiação Global Inclinada na Latitude Utilizando a Difusa por Souza et al. (2020) – Modelo de Liu e Jordan.

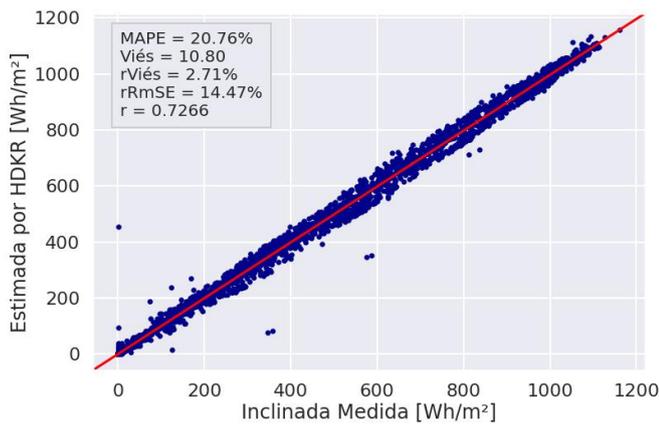


Fig. 7 Gráfico de Dispersão para a Irradiação Global Inclinada na Latitude Utilizando a Difusa por Erbs et al. (1982) – Modelo de HDKR.

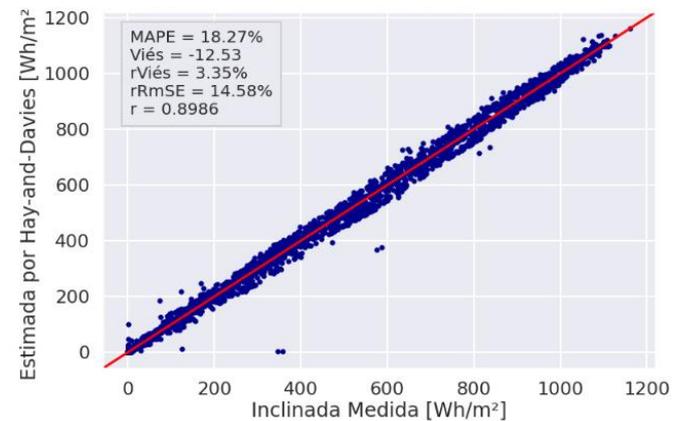


Fig. 10 Gráfico de Dispersão para a Irradiação Global Inclinada na Latitude Utilizando a Difusa por Souza et al. (2020) – Modelo de Hay-and-Davies.

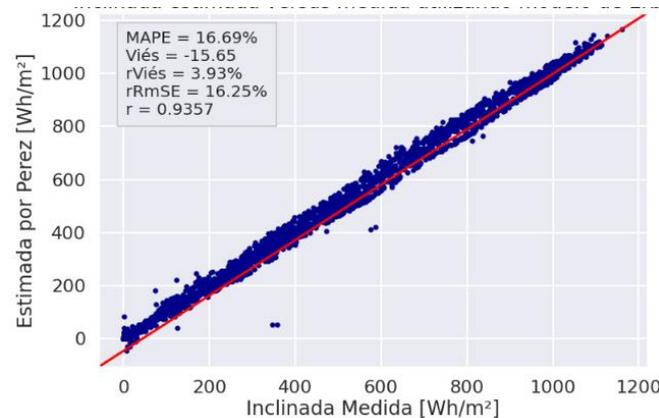


Fig. 8 Gráfico de Dispersão para a Irradiação Global Inclinada na Latitude Utilizando a Difusa por Erbs et al. (1982) – Modelo de Perez.

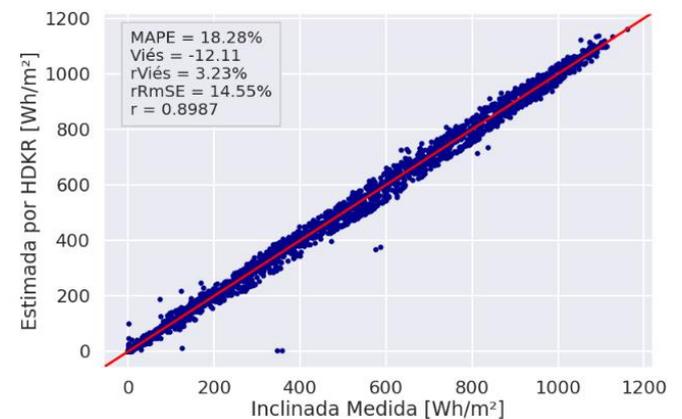


Fig. 11 Gráfico de Dispersão para a Irradiação Global Inclinada na Latitude Utilizando a Difusa por Souza et al. (2020) – Modelo de HDKR.

Os resultados no período analisado para os parâmetros estatísticos dos valores estimados de irradiação no plano inclinado pelos modelos e estimados com a irradiação difusa proposta por Souza et al. (2020) com os medidos está apresentada gráficos de dispersão nas Figs. 9-13, apresentando

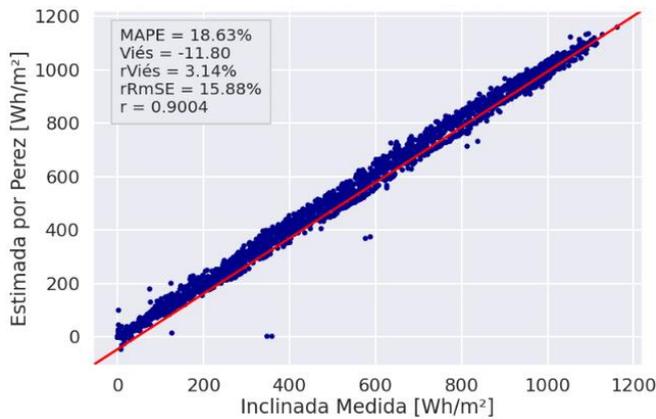


Fig. 12 Gráfico de Dispersão para a Irradiação Global Inclinação na Latitude Utilizando a Difusa por Souza et al. (2020) – Modelo de Perez.

A proximidade entre as métricas estatísticas e a comparação entre as dispersões dos dados calculados pelos modelos permitem concluir que os valores de estimados  $I_T$  pelos modelos estudados podem ser aplicados nas estimativas de irradiação global no plano inclinado para o local de estudo.

## 5. CONCLUSÕES

Para o período analisado de outubro de 2019 a maio de 2020, foram observados valores aceitáveis nos parâmetros estatísticos. Analisando os valores mensais apresentados na Tabela 1, notou-se que para as estimativas da irradiação global no plano inclinado na latitude para o modelo de Liu e Jordan observou-se em de janeiro de 2020 o menor MAPE, de 6,89 % , enquanto todos os outros modelos, Hay-and-Davies, HDKR e Perez obtiveram os melhores resultados para o mês de outubro de 2019 quando utilizado o modelos de estimativa de irradiação difusa proposto por Erbs et al. (1982). No pior cenário, observou-se que todos os métodos aplicados obtiveram grandes erros para o mês de maio de 2020, chegando a um MAPE de até 56,54% no modelo de Hay-and-Davies.

Quando analisadas as estimativas da irradiação global no plano inclinado na latitude a partir da irradiação difusa proposta por Souza et al. (2020), a Tabela 2 mostrou que todos os modelos de Liu e Jordan, Hay-and-Davies, HDKR e Perez obtiveram os melhores resultados no mês de outubro de 2019, com o menor MAPE de 7,18% para o métodos de HDKR. Enquanto os maiores erros encontrados, também foram identificados em maio de 2020 para todos os modelos, chegando a 37,64% para o método de Liu e Jordan.

Quando os valores de rRMSE são encontrados, percebe-se que para todos os casos os valores do Erro Quadrático Médio relativo foram inferiores a 20% o que pode concluir que são bons de acordo com o índice. O modelo de HDKR com a irradiação difusa estimada por Erbs et al. (1982) apresentou o menor rRMSE 14,47% enquanto o maior foi de Perez com rRMSE de 16,25%. Para a difusa calculada por Souza et al. (2020) o melhor modelo para irradiação inclinada na latitude também foi apresentado por HDKR, com rRMSE de 14,55%

enquanto o maior, também apresentado por Perez, foi um rRMSE de 15,88%.

Os valores dos parâmetros estatísticos mostram que os modelos aplicados para estimativas de irradiação global no plano inclinado para a cidade de Curitiba utilizando as estimativas da difusa sugeridas pelos autores podem ser aplicados com um certo nível de confiabilidade. Erros muito grandes de estimativas podem diminuir a confiabilidade dos sistemas, por este motivo é importante conhecer o melhor método a ser utilizado para determinado local de estudo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UTFPR pelo apoio e infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta pesquisa e a COPEL-Distribuição pelo apoio e financiamento dos recursos para realização deste projeto de P&D "ANEEL PD 2866-0464/2017 - Metodologia Para Análise, Monitoramento e Gerenciamento da GD por Fontes Incentivadas".

## REFERÊNCIAS

- Duffie, J. A., Beckman, W. A., (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons. 4th Edition.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética (2019). *Balanco Energético Nacional 2019*, 21. Rio de Janeiro.
- 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*, 28(4):293–302.
- Hay, J. E. and J. A. Davies, in *Proceedings of the First Canadian Solar Radiation Data Workshop* (J. E. Hay and T. K. Won, eds.), Ministry of Supply and Services, Toronto, Canada (1980). "Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface." 59.
- Klucher, T. M., *Solar Energy* (1979). "Evaluating Models to Predict Insolation on Tilted Surfaces." 23, 111.
- LABENS – Laboratório de Energia Solar (2020). Acervo de imagens do laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Liu, B. Y. H. and R. C. Jordan (1963), *Solar Energy*, 7, 53. "The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar Energy Collectors."
- Lopes, R.D. (2002). *Previsão de Autopeças: Estudo de Caso em uma Concessionária de Veículos*. Dissertação de Mestrado. UFSC. Paris Agreement. (2015). Paris Agreement | Climate Action. Disponível em: [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en).
- Pereira, E.B., Martins, F.R., Gonçalves, A.R., Costa, R.S., Lima, F.J.L., Rüther, R., Abreu, S.L., Tiepolo, G.M., Pereira, S.V., Souza, J.G. (2017). *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. 2ª ed. INPE, São José dos Campos.
- Perez, R., P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, and R. Stewart, *Solar Energy*, 44, 271 (1990). "Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance."
- Reindl, D. T., W. A. Beckman, and J. A. Duffie (1990). *Solar Energy*, "Evaluation of Hourly Tilted Surface Radiation Models." 45, 9.

- Scolar, J; Martins, D; Escobedo, J. F. (2004). Estimativa da Irradiação Total Sobre Uma Superfície Inclinada a Partir da Irradiação Global na Horizontal.
- Souza, M. B; Yang, R. L.; Tiepolo, G. M.; Urbanetz Jr, J; Freitas, D. V. Modelos para Estimativa da Radiação Difusa a partir da Radiação Global Horizontal para a Cidade de Curitiba/Pr. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2020.
- 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. (2017). Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná. 1a ed. UTFPR. Curitiba.