

MODELOS PARA ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO DIFUSA A PARTIR DA RADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL PARA A CIDADE DE CURITIBA/PR

Muriele Bester de Souza – murielebester@gmail.com

Gerson Máximo Tiepolo – tiepolo@utfpr.edu.br

Jair Urbanetz Junior – urbanetz@utfpr.edu.br

Renata Lautert Yang – relautert@gmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia

Diego Vitoriano Freitas – vitorianofreitas@gmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

1.1. Recursos solares e meteorologia da radiação solar

Resumo. Neste trabalho são estudados modelos para a estimativa da irradiação difusa a partir de dados medidos em superfície da irradiação global horizontal e fornecidos pela estação Curitiba da rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) para a cidade de Curitiba/PR. Em um primeiro momento foram utilizados modelos matemáticos consolidados propostos por Liu e Jordan (1960), Page (1961), Orgill e Hollands (1977), Erbs et al. (1982), Ricieri et al. (2002) e Escobedo et al. (2004), depois foram formuladas quatro equações especificamente elaboradas para a cidade de Curitiba, a fim de comparar com os modelos existentes. Indicadores estatísticos foram utilizados para definir qual o melhor modelo para o local de estudo. Os dois melhores modelos, apresentados pela bibliografia e equacionados pelos autores, respectivamente, foram de Erbs et al. (1982) e o Modelo 3 dos autores. A equação proposta por este trabalho é o método Souza et al. (2019): $Id/I = 0,914 + 0,970Kt - 3,985Kt^2 + 1,900Kt^3$; para $0 \leq Kt \leq 0,78$. A estimativa da irradiação global no plano inclinado, a partir dos modelos escolhidos para fração difusa, apresentaram rRMSE menores que 10%, o que considera o desempenho dos modelos como excelentes.

Palavras-chave: Energia Solar, Irradiação Difusa, Estimativa

1. INTRODUÇÃO

As rápidas mudanças nas normas da sociedade tais como o aumento da conscientização sobre as mudanças climáticas, a aceleração da produção da energia descentralizada e a convergência de novas tecnologias e acumulação exponencial de dados estão acelerando o ritmo da transição energética global (World Energy Council, 2019). Além desses fatores, o crescimento na demanda por eletricidade e a dificuldade na expansão de fontes hidrelétricas e termelétricas a combustíveis fósseis, por exemplo, têm incitado a busca por fontes de energias sustentáveis e renováveis de energia, onde a fonte solar fotovoltaica tem apresentado grande aumento na competitividade da tecnologia em função do excelente potencial fotovoltaico encontrado no Brasil (MME, 2017).

Considerada uma fonte inesgotável de energia na escala de tempo, a energia solar é uma das fontes de energia mais promissora e desafiadora para o milênio (Pereira et al., 2017). De acordo com o REN21 (2019), a demanda por energia solar fotovoltaica está se espalhando e se expandindo à medida que se torna a opção mais competitiva para a geração de eletricidade em um número crescente de mercados. O relatório do Balanço Energético Nacional 2019 mostra que no ano de 2018 a micro e mini geração distribuída atingiu 828,1 GWh com uma capacidade instalada de 562,3 MW, dando destaque para a fonte solar fotovoltaica, com 526 GWh e 562 MW de geração e potência instalada respectivamente no Brasil (EPE, 2019). Isso representou 63,5% da participação da fonte solar na geração distribuída do país, mostrando o significativo avanço na utilização da fotovoltaica, fato esse que motiva ainda mais os pesquisadores da área de energia solar a buscarem pelo aprimoramento e desenvolvimento de novas pesquisas neste setor.

É conhecido que o Brasil possui um excelente potencial fotovoltaico e isso pode ser comprovado na publicação do Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª edição (2017) onde mostra que mesmo em locais menos ensolarados do país é viável implantar sistemas de energia solar fotovoltaica, sejam sistemas termosolares ou fotovoltaicos (Pereira et al., 2017). Também em 2017, o primeiro Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná foi publicado e durante seu processo de elaboração foram percebidas dificuldades na validação dos dados estimados pelo modelo BRASIL-SR com os dados coletados em superfície, devido ao fato do estado do Paraná não possuir uma rede solarimétrica própria e de confiabilidade elevada, dados estes de extrema importância para o aperfeiçoamento na implantação de sistemas termosolares e fotovoltaicos (Souza et al., 2018).

De toda energia fornecida pelo Sol, o que chega na superfície terrestre é uma pequena parcela devido à distância que existe entre o Sol e a Terra, sendo que a radiação é constituída por duas componentes: a radiação direta, que chega à superfície sem sofrer desvios ou espalhamentos (componente utilizada em sistemas térmicos, por exemplo) e a radiação difusa, que provém de todas as direções devido ao espalhamento ocorrido na atmosfera para fora do feixe direto por moléculas, aerossóis e nuvens (Tiepolo et al., 2017). A produção de energia através de módulos fotovoltaicos depende da

energia contida na luz solar e da fração de radiação que incide perpendicularmente ao módulo. Essa fração depende do ângulo entre o módulo e o sol que impacta na radiação solar incidente em uma superfície. Para otimização de projetos ao longo de um ano o ângulo de inclinação deve ser igual à latitude do local (Honsberg e Bowden, 2019).

De acordo com Tiepolo *et al.* (2017), a radiação que chega à superfície terrestre em dias totalmente nublados é 100% difusa enquanto que mesmo em dias de céu claro sem nuvens, a radiação predominante é a direta e em torno de 20% da radiação difusa. A Fig. 1 representa a radiação solar e suas componentes.

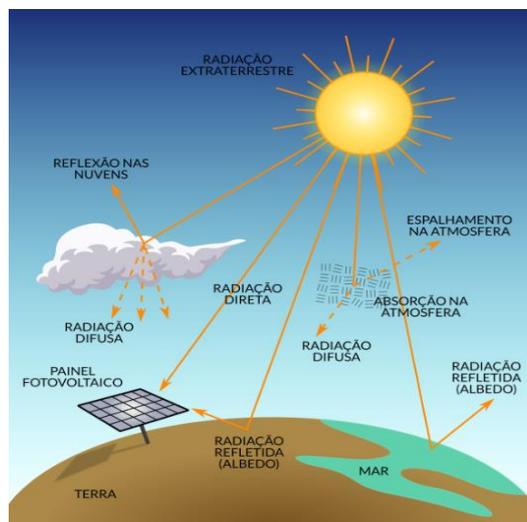


Figura 1 - Representação das Componentes da Radiação Solar

De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia solar 2ª ed. (2017) e baseado na nomenclatura de Duffie e Beckman (2013) as componentes da radiação solar podem ser descritas como:

Irradiância extraterrestre: taxa de energia incidente por unidade de área em um plano horizontal imaginário situado no topo da atmosfera.

Irradiância global horizontal: taxa de energia total por unidade de área incidente numa superfície horizontal. A irradiância global é dada pela soma das irradiâncias direta e difusa.

Irradiância direta normal: também conhecida como DNI, é a taxa de energia por unidade de área proveniente diretamente do Sol que incide perpendicularmente à superfície.

Irradiância direta: é a taxa de energia por unidade de área do feixe solar direto numa superfície horizontal.

Irradiância difusa: taxa de energia incidente sobre uma superfície horizontal por unidade de área, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos (moléculas, material particulado, nuvens, etc.).

Irradiação refletida (albedo): irradiação refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, terrenos rochosos, etc.).

2. OBJETIVOS

No Brasil, com exceção das estações da rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais), projeto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) que possuem sensores para determinar as radiações global horizontal, direta normal, difusa além de outros dados solarimétricos, meteorológicos e anemométricos (SONDA, 2019), a maioria das estações climatológicas coletam apenas a radiação global horizontal, isso devido ao elevado investimento na implementação de sensores para medição das outras componentes da radiação solar que necessitam de dispositivos para acompanhar o movimento do Sol. Porém, com os dados da radiação global horizontal medidos em superfície pode-se estimar a componente difusa através de modelos matemáticos. Com os dados de radiação global horizontal medidos e da radiação difusa estimada, se pode calcular as demais componentes, tanto para superfícies horizontais como para superfícies inclinadas na latitude do local de estudo.

Um fator muito importante para a estimativa das componentes da radiação solar é que elas são afetadas diretamente pela latitude do local, e isso leva os pesquisadores da área a estudar e elaborar um modelo mais preciso para a região de estudo. Este trabalho tem por objetivo determinar a irradiação difusa a partir de dados medidos em superfície da irradiação global horizontal na cidade de Curitiba, primeiramente através de modelos consolidados propostos por Liu e Jordan (1960), Page (1961), Orgill e Hollands (1977), Erbs *et al.* (1982), Ricieri *et al.* (2002) e Escobedo *et al.* (2004), e depois apresentar a formulação de quatro equações especificamente elaboradas para a cidade de Curitiba e compará-las com estes modelos. Para definir qual modelo é o mais adequado foi realizada a comparação dos valores medidos e estimados através de indicadores estatísticos e, com os resultados apresentados, foi escolhido o modelo que melhor representa os dados medidos. Após estimada a radiação difusa e escolhidos os dois melhores modelos, um consolidado e outro proposto pelos autores, foi utilizado o Modelo Isotrópico apresentado por Liu e Jordan (1963) para estimativa da irradiação global no plano inclinado com o intuito de demonstrar a aplicação das equações adotadas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração dos modelos de estimativa da irradiação difusa e comparação com os modelos já consolidados foram obtidos dados de irradiância global horizontal e difusa obtidas da base de dados da Estação Curitiba (CTB) pertencente a rede SONDA, localizada na cidade de Curitiba no Estado do Paraná-BR, que possui latitude 25° 29' 43,60" S, longitude 49° 19' 52,35" O e altitude de 891 m (SONDA, 2019). A base de dados fornece os valores das componentes global no plano horizontal, direta normal e difusa para o período de um ano e dois meses de dados válidos, de outubro de 2014 a novembro de 2015. Foi utilizado o período de dados compreendidos em um ano (out. de 2014 a set. de 2015) para a análise da regressão e elaboração das equações matemáticas e os outros dois meses (out. e nov. de 2015) para validação dos dados. Os dados foram fornecidos a cada um minuto e tratados para a obtenção de dados horários.

A componente difusa foi estimada a partir da global horizontal pela relação entre o índice de transmissividade, razão entre a irradiação global e extraterrestre, e a fração difusa, razão entre a irradiação difusa e a global, sendo que:

Irradiação Extraterrestre. A irradiação solar extraterrestre (I_0) em superfície horizontal é obtida, segundo Macagnan (2010), pela Eq. (1):

$$I_0 = \frac{12}{\pi} I_{SC} E_0 [\cos\delta \cos\phi (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + (\omega_2 - \omega_1) \sin\delta \sin\phi] \quad (1)$$

Onde: I_{SC} é a constante solar igual a 1366 W/m² (NREL, 2019); E_0 é o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre; δ é a declinação solar, em graus; ϕ é a latitude do local, em graus; ω_2 e ω_1 são os ângulos horários no início e no final do intervalo de tempo, dados em graus (onde $\omega_1 < \omega_2$).

Índice de Transmissividade. Com os dados de irradiação global medidos em superfície terrestre e após calcular a irradiação extraterrestre, consegue-se calcular o índice de transmissividade da atmosfera (K_t). K_t é definido como a razão entre a irradiação solar na superfície terrestre (I) e I_0 (Querino et al. 2010) e está definido pela Eq. (2):

$$K_t = \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

Fração Difusa. Estima-se a variação da fração difusa diária (K_d) como a relação entre a irradiação difusa (I_d) e a irradiação global horizontal em superfície horizontal e está definida pela Eq. (3):

$$K_d = \frac{I_d}{I} \quad (3)$$

Foram aplicados filtros de qualidade aos dados da base para aumentar a confiabilidade e reduzir os erros dos valores estimados. Os filtros utilizados, descritos por Filho e Gerônimo (2018), foram para selecionar pontos com ângulo de altitude solar maior que dez graus e fração difusa entre zero e 1,1. Esses filtros permitiram remover do conjunto de pontos utilizados aqueles que estavam fora do período diurno, assim como dados anômalos e inconsistentes que eventualmente são registrados quando o sol se encontra próximo ao horizonte. Os dados filtrados foram integrados em valores horários, resultando em 3378 pontos válidos para o ano analisado (out.de 2014 a set. de 2015). Para cada hora foram calculadas a fração difusa K_d e o índice de transmissividade K_t , cuja distribuição está apresentada na Fig. 1.

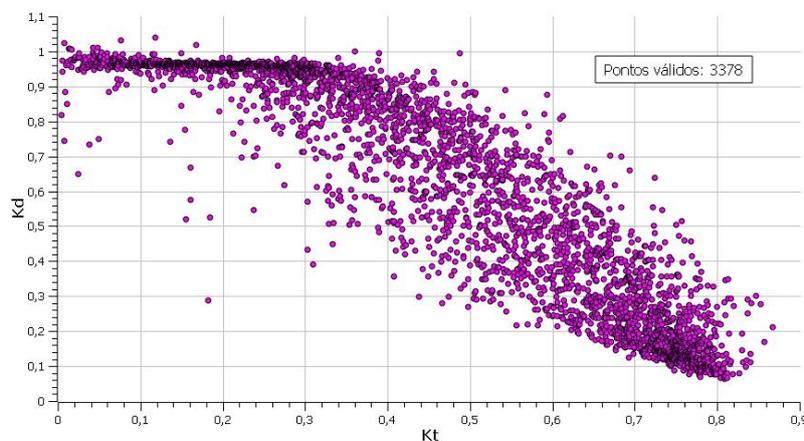


Figura 1 - Distribuição da fração difusa (K_d) em função do índice de transmissividade (K_t).

Utilizando a referência do trabalho realizado por Orgill e Hollands (1977), os pontos válidos foram organizados em intervalos de K_t . em cada intervalo foi feita uma média aritmética entre os valores de K_d , que foram plotados no ponto

médio do intervalo. Foram testados diversos tamanhos de intervalos: os maiores resultavam em poucos pontos na curva, enquanto os menores resultavam em poucos pontos válidos em cada intervalo, tornando a média calculada menos significativa. Desta forma foi adotado um tamanho de intervalo de 0,05 que se mostrou ideal para a quantidade de pontos válidos utilizados. A Fig. 2 apresenta o gráfico de $K_d \times K_t$ obtido após a organização dos pontos válidos, tornando mais clara a visualização da curva característica entre esses dois parâmetros.

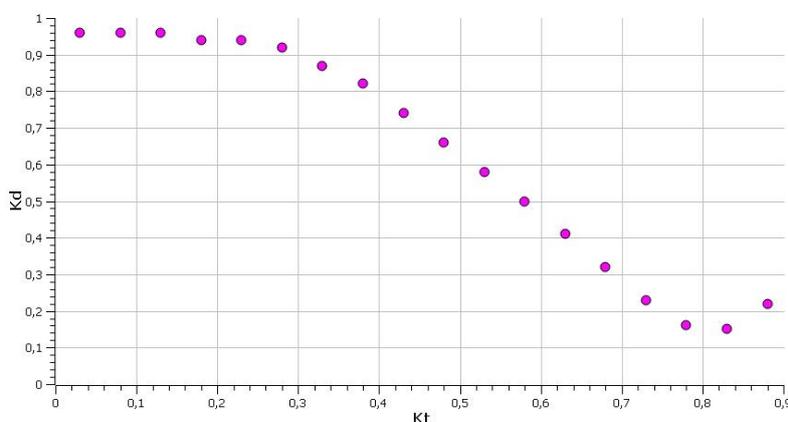


Figura 2 – Distribuição dos valores médios de K_d em intervalos de K_t de 0,05.

Com os pontos apresentados na Fig. 2 foram traçados gráficos e propostos equacionamentos seguindo o trabalho realizado por diversos autores da literatura. Os novos modelos propostos e os utilizados como referência foram testados com os dados de dois meses de dados (outubro e novembro de 2015) e comparados através de métricas estatísticas. Foram utilizados um total de 629 pontos válidos para esses equacionamentos. Em seguida foram obtidos dados iniciais da irradiância global horizontal e irradiância global no plano inclinado na latitude da estação SONDA recentemente implantada na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), câmpus Curitiba, sede Neville, localizado na cidade de Curitiba no Estado do Paraná-BR, que possui latitude $25^\circ 30' 26''$ S, longitude $49^\circ 19' 07''$ O e altitude de 932 m. Estavam disponíveis dados para o período compreendido entre os dias 26 de setembro e 26 de novembro de 2019. Os dados filtrados foram integrados em valores horários, resultando em 868 pontos válidos para o período analisado.

Os dados de irradiação global horizontal foram utilizados para estimar a irradiação difusa pelo modelo proposto pelos autores que obteve o melhor desempenho estatístico e pelo modelo de melhor classificação entre os consolidados, seguindo o mesmo critério. As irradiações difusa estimada e global horizontal medida foram aplicadas na estimativa da irradiação no plano inclinado na latitude (I_γ) pelo modelo isotrópico proposto por Liu e Jordan (1963). Por fim, a irradiação global no plano inclinado na latitude estimada foi comparada com a medida índices estatísticos já apresentados.

3.1 Métodos para Estimativa da Radiação Difusa

Os modelos escolhidos para o presente estudo são apresentados nas Eq. (4) – (9). Cada autor propõe uma maneira diferente de equacionar a curva característica. Alguns autores estimam a fração da irradiação solar difusa diária média mensal ($\frac{H_d}{H}$) enquanto outros realizam estimativas da fração da irradiação solar difusa horária ($\frac{I_d}{I}$).

Método de Liu e Jordan (1960). Uma equação de terceira ordem válida para todo o intervalo de K_t .

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

Método de Page (1961). Equação linear válida para todo o intervalo de K_t .

$$\frac{H_d}{H} = 1,00 - 1,13K_t \quad (5)$$

Método de Orgill e Hollands (1977). Divisão da curva em três equações: duas retas e um valor constante para valores altos de K_t .

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,249K_t; & \text{para } 0 \leq K_t < 0,35 \\ 1,557 - 1,84K_t; & \text{para } 0,35 \leq K_t \leq 0,75 \\ 0,177; & \text{para } K_t > 0,75 \end{cases} \quad (6)$$

Método de Erbs et al. (1982). Divisão da curva em três equações: reta, equação de quarta ordem e constante para valores altos de K_t .

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,09K_t; \text{ para } 0,22 \leq K_t \\ 0,9511 - 0,1604K_t + 4,388K_t^2 - 16,638K_t^3 + 12,336K_t^4; \text{ para } 0,22 < K_t \leq 0,80 \\ 0,165; \text{ para } K_t > 0,80 \end{cases} \quad (7)$$

Método de Ricieri et al. (2002). Uma única equação de quarta ordem válida para todo o intervalo de K_t .

$$K_d = 1,083 - 1,067K_t + 4,078K_t^2 - 11,736K_t^3 + 7,722K_t^4 \quad (8)$$

Método de Escobedo et al. (2004). Uma única equação de quarta ordem válida para todo o intervalo de K_t .

$$K_d = 1,00 - 0,05K_t - 0,06K_t^2 - 5,14K_t^3 + 4,04K_t^4 \quad (9)$$

3.2 Modelo Isotrópico para Estimativa da Radiação no Plano Inclinado

A irradiação global no plano inclinado na latitude (I_T) possui três contribuições de irradiação importantes: direta (I_b), difusa (I_d) e a refletida pela superfície (I). As componentes dependem do ângulo de inclinação da superfície em relação à superfície horizontal (β), 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. O modelo isotrópico proposto por Liu e Jordan e apresentado na Eq. (10) considera que a irradiação difusa é recebida uniformemente de todo o hemisfério celeste, não levando em conta distorções causadas por fatores atmosféricos.

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (10)$$

Onde: R_b é o fator geométrico relacionado ao ângulo de incidência da radiação direta sobre a superfície; ρ_g é o albedo local.

3.3 Processo de Validação das Estimativas dos Modelos

Neste trabalho foram utilizadas as métricas estatísticas sugeridas e empregadas no Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná para a validação dos dados estimados: o Erro Médio ($Viés$), o Erro Médio relativo ($rViés$), a Raiz do Erro Quadrático Médio relativo ($rRMSE$) e o Coeficiente de Correlação (r) (Tiepolo *et al.*, 2017).

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

$Viés$. Indica a tendência do modelo em superestimar (valores positivos) ou subestimar (valores negativos) o comportamento de uma determinada variável, conforme descrito na Eq. (11).

$$Viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_0) \quad (11)$$

Onde: ϕ_0 é o valor observado da variável no i -ésimo instante do tempo e ϕ_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 na Eq. (12).

$$r Viés = \left| 100 \cdot \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_0)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \phi_0} \right| \quad (12)$$

$rRMSE$. 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 na Eq. (13).

$$rRMSE = \frac{[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_0)^2]^{1/2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \phi_0} \quad (13)$$

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 $rRMSE \geq 30\%$.

Coefficiente 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. A Eq. (14) indica o coeficiente de correlação de Pearson.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \bar{\phi}_i)(\phi_0 - \bar{\phi}_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \bar{\phi}_i)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (\phi_0 - \bar{\phi}_0)^2}} \quad (14)$$

Onde: ϕ_i e ϕ_0 são dados estimados e dados observados enquanto $\bar{\phi}_i$ e $\bar{\phi}_0$ são suas respectivas médias.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os modelos elaborados pelos autores a partir dos dados de $K_d \times K_t$ foram baseados nos métodos estudados e apresentados na Seção 3 deste trabalho. A escolha dos métodos que serviram de base para o equacionamento proposto por este trabalho foi realizada a partir de estudos prévios sobre o comportamento dos dados locais.

Para uma análise inicial foram traçadas as equações de referência contra os pontos calculados, conforme apresentado na Fig. 3. Pode-se perceber que os modelos de Page e de Liu e Jordan ficaram muito distantes da curva ideal, o que provavelmente ocorreu por terem sido elaborados para dados diários médios mensais. O modelo de Page, por se tratar de uma única reta, não foi utilizado na etapa seguinte. Já o de Liu e Jordan não apresentou resultados convergentes, mas ainda assim foi utilizado como base para um dos modelos propostos por se tratar de uma equação de terceira ordem. Graficamente as equações de Ricieri *et al.* e Escobedo *et al.*, ambas de quarta ordem, ficaram muito próximas entre si.

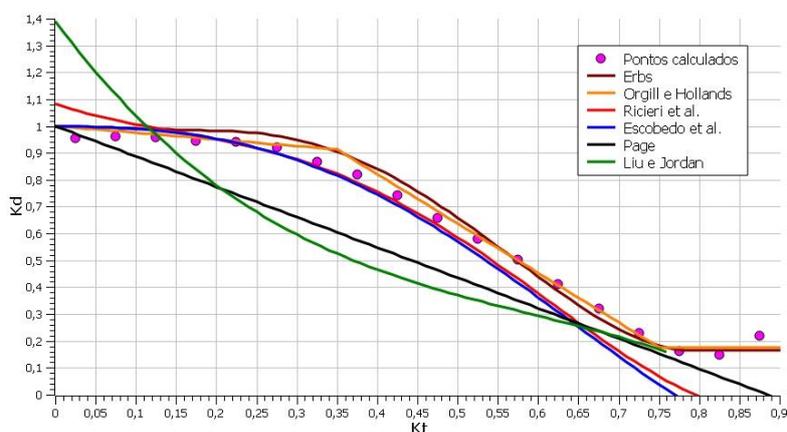


Figura 3 – Comparação entre as equações de referência e os pontos calculados.

Com base nos modelos selecionados pela análise dos gráficos apresentados na Fig. 3 foram equacionados quatro modelos matemáticos:

Modelo 1. Baseado no método Orgill e Hollands (1977). O modelo proposto 1 está apresentado na Eq. (15).

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 0,981 - 0,229Kt; & \text{para } 0 \leq Kt < 0,33 \\ 1,454 - 1,657Kt; & \text{para } 0,33 \leq Kt \leq 0,78 \\ 0,163; & \text{para } Kt > 0,78 \end{cases} \quad (15)$$

Modelo 2. Baseado no método Erbs *et al.* (1982). O modelo proposto 2 está apresentado na Eq. (16).

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 0,967 - 0,09Kt; & \text{para } Kt \leq 0,23 \\ 0,606 + 3,445Kt - 10,441Kt^2 + 8,424Kt^3 - 2,104Kt^4; & \text{para } 0,23 < Kt \leq 0,78 \\ 0,163; & \text{para } Kt > 0,78 \end{cases} \quad (16)$$

Modelo 3. Baseado no método Liu e Jordan (1960). O modelo proposto 3 está apresentado na Eq. (17).

$$\frac{I_d}{I} = 0,914 + 0,970Kt - 3,985Kt^2 + 1,900Kt^3; \text{ para } 0 \leq Kt \leq 0,78 \quad (17)$$

Modelo 4. Equação polinomial de 4º grau. O modelo proposto 4 está apresentado na Eq. (18).

$$\frac{I_d}{I} = 0,955 + 0,033Kt + 1,095Kt^2 - 7,790Kt^3 + 5,981Kt^4; \text{ para } 0,03 \leq Kt \leq 0,78 \quad (18)$$

A Fig. 4 apresenta o gráfico relacionando os modelos propostos com os pontos calculados. Visualmente as curvas possuem um ajuste muito melhor que aquelas geradas pelos modelos de referência. Apesar disso, isso não significa que os novos modelos necessariamente são mais adequados, visto que na prática as equações podem ser aplicadas com uma quantidade muito diferente de dados do que os disponíveis para o cálculo dos pontos utilizados no equacionamento.

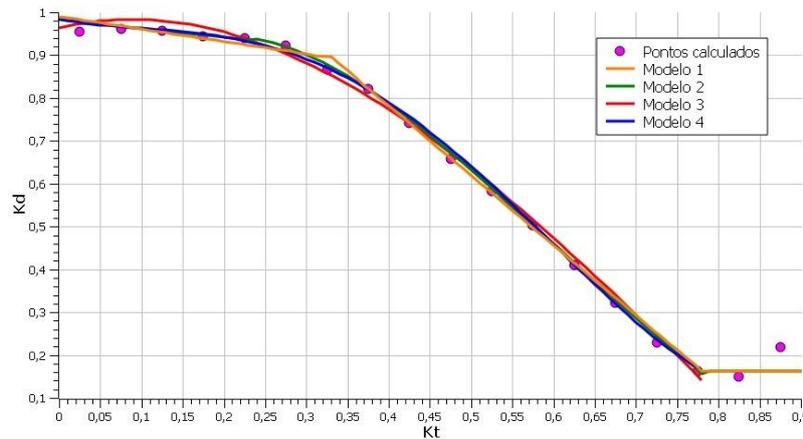


Figura 4 – Comparação entre os modelos propostos e os pontos calculados.

Por esta razão foram utilizados os dados dos meses de outubro e novembro de 2015 para a validação das equações via as métricas estatísticas apresentadas na seção 3.2. Para todos os modelos a irradiação difusa horária foi estimada a partir da global horizontal e comparada com a irradiação difusa medida. Os valores dos índices estatísticos calculados para os modelos estão apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 - Índices estatísticos para validação dos modelos de irradiação difusa.

MODELO	VIÉS	rVIÉS	rRMSE	r
Modelo 1	-8,82	4,13	19,91	0,954
Modelo 2	-8,12	3,80	19,72	0,954
Modelo 3	-8,09	3,79	19,51	0,956
Modelo 4	-8,74	4,09	19,83	0,954
Erbs <i>et al.</i>	-5,44	2,55	20,21	0,949
Escobedo <i>et al.</i>	-29,73	13,97	32,73	0,884
Liu e Jordan	-68,20	31,84	48,13	0,918
O&H	-5,69	2,67	20,30	0,948
Page	-59,85	28,04	41,11	0,945
Ricieri <i>et al.</i>	-25,61	12,00	29,85	0,903

Pelo Viés nota-se que todos os modelos têm, na média, a tendência de subestimar a irradiação difusa. Já o rViés, que mostra o erro percentual, indica que os novos modelos propostos desviaram menos em relação aos dados, com exceção do modelo de Orgill e Hollands e Erbs *et al.* O coeficiente de Pearson mostra uma correlação muito similar entre os dados medidos e estimados para todos os modelos, exceto para o modelo proposto por Escobedo *et al.*, que ficou abaixo de 0,9. Como parâmetro principal de comparação foi utilizado o rRMSE e os modelos ordenados são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2 – Modelos ordenados pelo rRMSE.

CLASSIFICAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MODELO	Modelo 3	Modelo 2	Modelo 4	Modelo 1	Erbs <i>et al.</i>	O&H	Ricieri <i>et al.</i>	Escobedo <i>et al.</i>	Page	Liu e Jordan

Nenhum modelo obteve um desempenho excelente, ou seja, com $rRMSE < 10\%$, porém todos os novos modelos propostos podem ser considerados bons ($10\% \leq rRMSE \leq 20\%$), enquanto os demais estão na faixa do aceitável ($20\% \leq rRMSE \leq 30\%$) ao pobre ($rRMSE \geq 30\%$). É importante ressaltar que isso apenas significa que os demais modelos não são adequados aos dados locais, visto que no geral as variáveis meteorológicas não são levadas em consideração nestes equacionamentos. Outro ponto importante é que havia apenas dois meses de dados disponíveis para a validação das

equações, enquanto o ideal é que fosse utilizado pelo menos um ano de dados válidos. Na Fig. 5 (a) e (b) são apresentados os gráficos de dispersão e o resumo das métricas estatísticas do modelo melhor classificado entre os propostos pelos autores (modelo 3) e o de melhor classificação entre os modelos consolidados (Erbs *et al.*). Ambos apresentam estimativas consistentes para baixos valores de irradiação difusa, e uma maior dispersão para valores elevados.

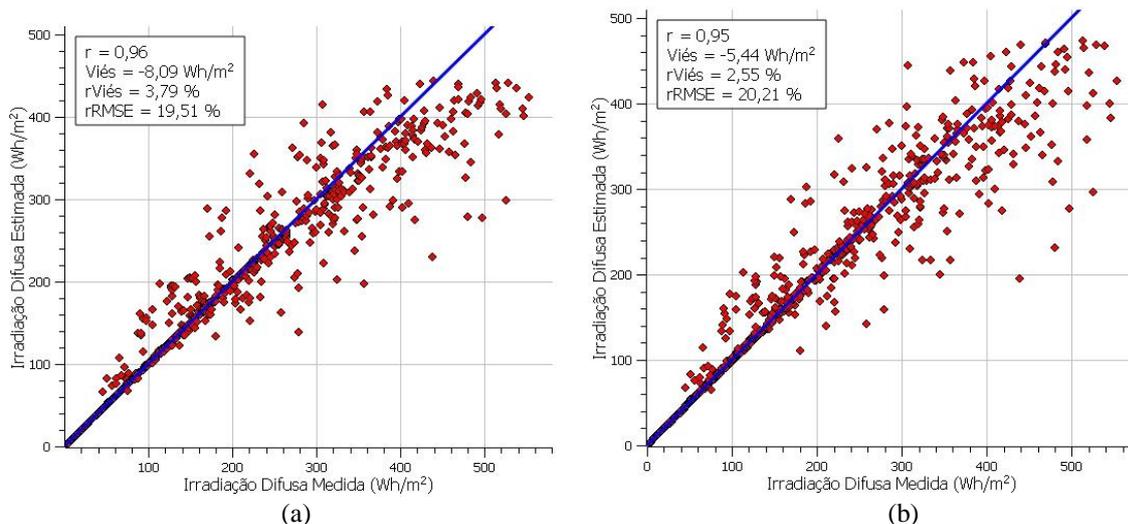


Figura 5 – Gráficos de dispersão para a irradiação difusa utilizando o Modelo 3 (a) e o modelo de Erbs *et al.* (b).

A comparação das métricas estatísticas dos modelos propostos com os modelos já consolidados mostra que as novas equações são válidas para estimar a irradiação difusa horária a partir da global horizontal na região metropolitana de Curitiba, e que a utilização de dados locais para o equacionamento é mais relevante na qualidade dos resultados de irradiação estimada do que o modelo matemático das equações.

Com os dados obtidos da estação SONDA instalada na UTFPR – câmpus Neville – foi estimada a irradiação difusa pelo Modelo 3 e pelo modelo de Erbs *et al.* A partir desses resultados foi estimada a irradiação no plano inclinado na latitude, considerando uma inclinação de 25° e supondo um albedo de 0,15, já que informações precisas desta variável não estavam disponíveis. A comparação dos valores estimados pelos dois modelos com os medidos está apresentada na Tab. 3 e pelos gráficos de dispersão na Fig. 6 (a) e (b).

Tabela 3 - Índices estatísticos para a irradiação no plano inclinado na latitude.

MODELO	VIÉS	rVIÉS	rRMSE	r
Modelo 3	2,33	0,61	5,28	0,998
Erbs <i>et al.</i>	2,38	0,62	5,27	0,998

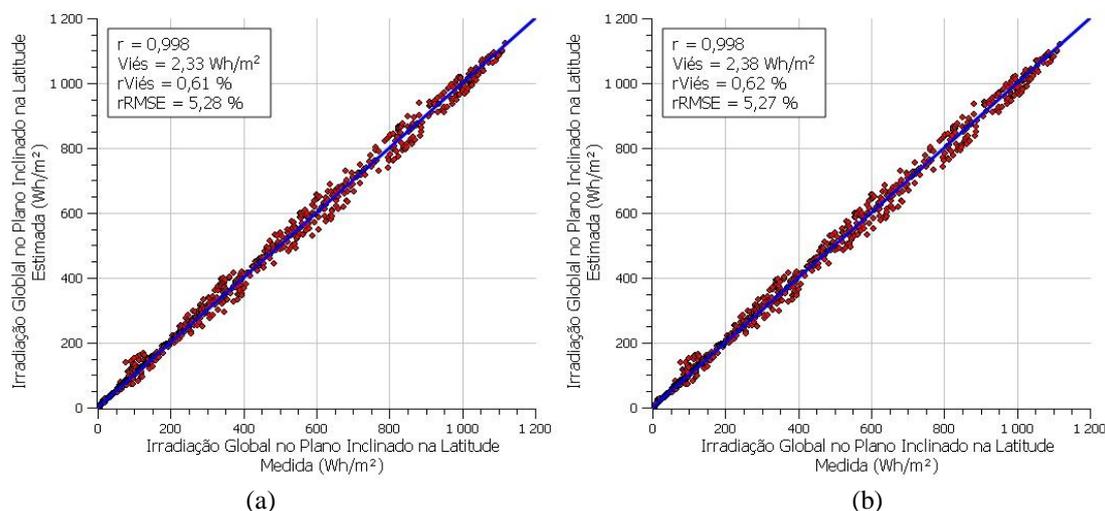


Figura 6 – Gráficos de dispersão para a irradiação global no plano inclinado na latitude utilizando o Modelo 3 (a) e o modelo de Erbs *et al.* (b).

A proximidade entre as métricas estatísticas e a comparação entre as dispersões dos dados calculados pelos dois modelos permitem concluir que os valores de I_d estimados pelo Modelo 3 podem ser aplicados na estimativa de I_T levando a resultados similares aos obtidos por modelos já consolidados como o de Erbs *et al.*

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As correlações entre $K_d \times K_t$ obtidas para a cidade de Curitiba através dos dados fornecidos pela rede SONDA mostrou que a curva de distribuição obtida (Fig.1) se comportou conforme o esperado e apresentado pela bibliografia. A partir dos dados filtrados, obteve-se a curva para equacionamento dos modelos.

Os métodos escolhidos como base para este estudo foram modelos consolidados e muito utilizados por pesquisadores da área, dentre eles o modelo que apresentou melhores resultados para a região de Curitiba foi o proposto por Erbs *et al.* (1982) com os melhores resultados entre os modelos existentes para todos os índices estatísticos: Viés de -5,44; rViés de 2,55% apresentando o menor valor entre os modelos existentes; o rRMSE foi de 20,21% onde segundo a bibliografia apresenta ser aceitável, quase bom e coeficiente de Pearson $r = 0,949$, valor muito próximo de 1, indicando uma ótima estimativa.

Dentre os modelos propostos pelos autores para estimativa da irradiação difusa para a cidade de Curitiba, o que mostrou melhor comportamento e resultados foi o Modelo 3, onde os índices estatísticos resultantes foram: Viés de -8,09; rViés de 3,79% apresentando o menor valor entre os modelos propostos; o rRMSE foi de 19,51% onde segundo a bibliografia apresenta ser bom e coeficiente de Pearson $r = 0,956$, valor muito próximo de 1, indicando uma ótima estimativa. Para os modelos propostos, as diferenças estatísticas entre eles foram muito pequenas pois utilizaram dados da região de estudo, isso implica em uma convergência dos resultados.

A Tab. 2 mostrou que todos os modelos propostos pelos autores neste trabalho se comportaram melhor para a cidade de Curitiba, isso já era esperado pois leva em consideração a latitude do local onde os dados foram obtidos. Apesar da classificação apresentada ter mostrado que os métodos dos outros autores não são os melhores para este estudo, apenas indica que para a cidade de Curitiba eles não são os melhores por não considerarem as variáveis meteorológicas locais. Da mesma forma, os modelos propostos neste artigo provavelmente apresentarão resultados inferiores se utilizados em outras localidades.

Na Fig. 3 o modelo de Liu e Jordan apresentou a curva de dispersão com resultados muito divergentes da equação de referência, porém, o modelo com melhores resultados apresentado pelos autores foi o Modelo 3 cuja base de referência foi o equacionamento de 3ª ordem sugerido por Liu e Jordan. Estes resultados comprovam a importância de utilizar dados locais e realizar estudos específicos para as coordenadas desejadas, obtendo, assim, resultados mais próximos do esperado para aquela região.

O Modelo 3 foi escolhido pelos autores e a equação proposta por este trabalho é o método Souza *et al.* (2019):

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

O resultado obtido pela estimativa da irradiação global no plano inclinado na latitude mostra que o modelo Souza *et al.* (2019) pode ser aplicado da mesma maneira que um modelo consolidado como o de Erbs *et al.*, por exemplo. Conforme apresentado na Tab. 3, os modelos apresentaram rRMSE de 5,28% para o modelo de Souza *et al.* e de 5,27% para o modelo de Erbs *et al.*, que, de acordo as métricas estatísticas são considerados modelos de estimativa de irradiação excelentes. Deve-se levar em consideração que o período analisado é muito curto pois foram utilizados os dados iniciais obtidos pela Estação SONDA implantada na sede Neville do campus Curitiba da UTFPR, portanto, as análises continuarão de acordo com os dados fornecidos ao longo do tempo para obtenção de um resultado mais consolidado.

Este estudo realizado é muito importante quanto a questão de estimativa da radiação solar das demais componentes em função da radiação global horizontal medida. No estado do Paraná atualmente estão sendo implantadas três estações solarimétricas padrão SONDA e quatro estações padrão EPE (Empresa de Pesquisa Energética) em seis campus da UTFPR, espacialmente distribuídas, cujo objetivo principal é o de criar uma rede de dados solarimétricos de alta qualidade no estado. Através dos dados medidos em superfície por estas estações, será possível validar o modelo proposto por este trabalho, assim como determinar um modelo que melhor represente as condições existentes no Paraná.

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

- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2013. Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional, BEN 2019, Relatório Final. Ano base: 2018. Ministério de Minas e Energia, Brasília, Distrito Federal, 2019.
- 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.
- Escobedo, J. F.; Dal Pai, A.; Oliveira, A. P.; Soares, J. Radiações Global, Direta e Difusa: II – Modelos de Estimativa Diários, 2004.
- Filho, M. H. O. P.; Gerônimo, C. A. O. Desenvolvimento de Modelos de Correlação e Ajuste da Radiação Difusa para o Agreste Pernambucano. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018.
- Honsberg, C.; Bowden, S. Solar Radiation on a Tilted Surface, PV Education.org. Disponível em: <<https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-radiation-on-a-tilted-surface>>. Acesso: 26 nov. 2019.
- Liu B.Y.H.; Jordan R.C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Solar Energy. 1960; 4(3):1–19.
- Liu, B. Y. H.; Jordan, R. C. The long term average performance flat plate solar energy collectors. Solar Energy, v. 7, p. 53-74, 1963.
- Macagnan, H.M. Introdução à radiação solar. São Leopoldo, 2010.
- MME, Ministério de Minas e Energia. Resenha Energética Brasileira 2018. Ano Base 2017. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético – Departamento de Informações e Estudo Energéticos, 2018.
- NREL. “Glossary of Solar Radiation Resource Terms: National Renewable Energy Laboratory”, 2017. Disponível em: <http://rredc.nrel.gov/solar/glossary/gloss_s.html>. Acesso em: 25 nov. 2019.
- Orgill J.F., Hollands K.G.T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. Solar Energy. 1977;19(4):357–359.
- 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.
- Pereira, E., Martins, F., Gonçalves, A., Costa, R., Lima, F., Rüther, R., Abreu, S., Tiepolo, G., Pereira, S. e Souza, J. (2017). Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2ª ed. São José dos Campos: INPE.
- Querino, C. A. S.; Moura, M. A. L.; Silva Querino, J. K. A.; Filho, A. O. M. Estudo da Radiação Solar Global e do Índice de Transmissividade (Kt), Externo e Interno, em uma floresta de mangue em Alagoas – Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, v.26, n.2, 204 – 294, 2011.
- Ricieri, R. P.; Koehler, K.; Calorina Koehler, A.; Souza, S. N. M. Modelos de Estimativa da Radiação Difusa Diária em Cascavel, 2002.
- REN21- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (2018), Renewables 2019 Global Status Report, REN21 Secretariat, Paris, França.
- SONDA. Estação de Curitiba – Dados Ambientais. Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/curitiba.html>>. Acesso em: 09 set. 2019.
- 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, 2018b, Vol. 5, pp. 184-190.
- 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.
- World energy Council – World Energy Scenarios | 2019: Exploring Innovation Pathways to 2040. pg 12.

MODELS FOR DIFFUSED RADIATION ESTIMATION FROM HORIZONTAL GLOBAL RADIATION FOR CURITIBA / PR

Abstract. In this paper, models for the estimation of diffuse irradiation are studied from data measured in horizontal global irradiation surface and application by the Curitiba station of the SONDA (National System of Environmental Data Organization) network for the city of Curitiba / PR. At first, consolidated mathematical models proposed by Liu and Jordan (1960), Page (1961), Orgill and Hollands (1977), Erbs et al. (1982), Ricieri et al. (2002) and Escobedo et al. (2004), afterwards four specific equations were elaborated for the city of Curitiba, an end of comparison with the existing models. Statistical indicators were used to define the best model for the study site. The two best models, presented by the bibliography and equated by the authors, respectively, were from Erbs et al. (1982) and Model 3 of the authors. Statistical indexes for the model by Erbs et al. were Viés of -5.44; rViés of 2.55%; rRMSE of 20.21% and Pearson's coefficient $r = 0.949$. Model 3 obtained Viés of -8.09; rViés of 3.79%; rRMSE of 19.51% and Pearson's coefficient $r = 0.956$. An equation presented by this work is the Souza et al. (2019): $I_d / I = 0.914 + 0.970K_t - 3.985K_t^2 + 1.900K_t^3$; to $0 \leq K_t \leq 0.78$. The estimation of global irradiation in the inclined plane, based on the models chosen for diffuse fraction, presented rRMSE lower than 10%, which considers the models performance as excellent.

Key words: Solar Energy, Diffuse Irradiation, Estimate