

Análise e Estimativa da Irradiação Direta Normal a Partir das Irradiações Global Horizontal e Difusa para o Estado do Paraná

Muriele Bester de Souza¹

Nicolas Moreira Branco¹

Gerson Máximo Tiepolo¹

Jair Urbanetz Junior¹

Renata Lautert Yang¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

Este estudo compara modelos que estimam a irradiação direta normal a partir da difusa e da global horizontal. São utilizados dados de estações solarimétricas dos padrões SONDA e EPE no período de janeiro a junho de 2020. As estações EPE não possuem sensores para a coleta das componentes difusa e direta normal da radiação solar, com isso estimou-se também a partição difusa a partir da radiação global horizontal pelo modelo de Erbs et al. Os dados foram comparados com apresentados pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná. O modelo proposto para estimar a direta normal teve resultados satisfatórios para os diversos casos apresentados no estudo, tendo seu maior erro relativo em 15% para os dados validados.

Palavras-chave: Irradiação Solar, Estimativa, Irradiação Direta Normal

ABSTRACT

This paper compares models that estimate direct normal radiation from diffuse. Data from SONDA and EPE stations from January to June 2020 were used. The EPE stations do not have sensors that measure direct normal radiation, diffuse radiation, or global radiation on tilted plane, so the diffuse radiation was also estimated from the global radiation using the Erbs et al. model. Data from Atlas of Solar Energy of the State of Paraná was used to compare the results. The studied model to estimate the direct

normal radiation was precise enough as an estimation for the multiple cases analyzed, being that the greatest relative error found was around 15%.

Keywords: Solar Irradiation, Estimative, Direct Normal Irradiance

1. INTRODUÇÃO

A fonte primária entre todos os tipos de energias renováveis conhecidas que atinge a superfície da Terra é a proveniente do fluxo da radiação solar (LOPEZ et al., 2000). Antes de atingir à superfície terrestre, a radiação solar passa por processos de espalhamento e absorção após se propagar na atmosfera, onde são observadas as componentes da radiação solar: a radiação extraterrestre, a radiação direta, a radiação solar difusa e a radiação solar global que é a soma das radiações difusa e direta (VALIATI & RICIERI, 2005). A Figura 1 apresenta a representação das componentes da radiação solar.

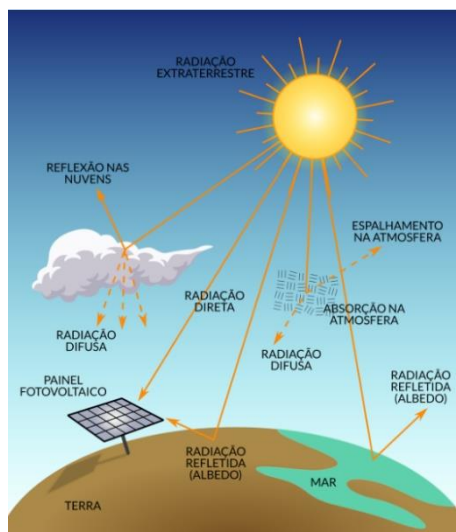


Figura 1 – Componentes da Radiação Solar. (Tiepolo et al., 2017)

O conhecimento da radiação solar e suas componentes são importantes para o aprimoramento e desenvolvimento de novas pesquisas no setor solar fotovoltaico, como em projetos de sistemas termosolares, que dependem exclusivamente da irradiância solar direta, ou fotovoltaicos, que utilizam toda a irradiância solar disponível no plano inclinado fixo ou por meio de seguidores solares (SOUZA et al., 2018; MACAGNAN, 2010).

Para os sistemas térmicos, a única componente da radiação solar passível de ser concentrada é a irradiância direta normal, fazendo-se necessário obter um estudo e conhecimento acurado para o planejamento e operação eficiente desses projetos. Esta componente pode ser obtida por meio de um pireliômetro acoplado a um rastreador solar, ou através de medidas de irradiância global e difusa ou por estimativas através do uso de modelos de estimativa a partir de dados satelitais (PORFÍRIO & CEBALLOS, 2013).

2. JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

No estado do Paraná ao final de 2017, foi publicado o Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, onde, durante sua elaboração, foi percebida uma certa dificuldade em validar os dados estimados pelo modelo BRASIL-SR devido ao déficit de dados medidos em superfície no estado, visto que o Paraná não possuía na época uma rede solarimétrica própria e de alta confiabilidade (SOUZA et al., 2018). No mesmo ano foi contemplado o Projeto P&D ANEEL/COPEL Distribuição – PD 2866-0464/2017 – Metodologia para Análise, Monitoramento e Gerenciamento da Geração Distribuída por Fontes Incentivadas proposto pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Curitiba, onde foram implantadas três Estações Solarimétricas padrão SONDA e quatro Estações Solarimétricas padrão EPE (Empresa de Pesquisa Energética), distribuídas em seis campi da UTFPR e que representam os diferentes microclimas do estado (LABENS, 2019).

Devido as diferentes características das componentes e a dificuldade de se obter dados medidos da fração direta normal, este trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia para estimativa da irradiação direta normal a partir de dados medidos em superfície das irradiações global horizontal e difusa obtidos por meio de piranômetros instalados na UTFPR das cidades de Campo Mourão, Curitiba e Medianeira que possuem estações solarimétricas padrão SONDA e comparar com a direta normal medida por um pireliômetro existente nestas mesmas estações para consolidação das estimativas.

Foi estimada, também, a irradiação direta normal para as cidades de Cornélio Procopio, Curitiba, Pato Branco e Ponta Grossa onde possuem estações solarimétricas padrão EPE instaladas nos campi da UTFPR, a partir de dados medidos em superfície

da irradiação global horizontal por um piranômetro e valores estimados de irradiação difusa através do modelo consolidado e apresentado por Erbs et al. (1982).

As análises dos dados obtidos são apresentadas por campus da UTFPR onde os sistemas estão implantados, confrontando os dados de irradiação diária média mensal medidos pelas estações SONDA e EPE com os dados obtidos em cada município pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná (2017), a fim de comparar e verificar os desvios percentuais existentes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A base de dados foi obtida das estações solarimétricas localizadas em seis campi da UTFPR. As estações padrão SONDA estão implantadas nas cidades de Campo Mourão (latitude $-24,0613^{\circ}$ e longitude $-52,3846^{\circ}$), Curitiba (latitude $-25,5073^{\circ}$ e longitude $-49,3187^{\circ}$) e Medianeira (latitude $-25,2997^{\circ}$ e longitude $-54,1145^{\circ}$). As estações padrão EPE estão implantadas nas cidades de Cornélio Procopio (latitude $-23,1857^{\circ}$ e longitude $-50,6567^{\circ}$), Curitiba (latitude $-25,5073^{\circ}$ e longitude $-49,3187^{\circ}$), Pato Branco (latitude $-26,1968^{\circ}$ e longitude $-52,6876^{\circ}$) e Ponta Grossa (latitude $-25,0526^{\circ}$ e longitude $-50,1303^{\circ}$). O período analisado é de 6 meses, compreendido entre os meses de janeiro a junho de 2020.

A radiação global foi monitorada por piranômetros termoelétricos KIPP&ZONEN – CMP 10 Secondary Class instalados nas estações SONDA, Figura 2(a), e KIPP&ZONEN – CMP 6 First Class instalados nas estações EPE, Figura 2(b), posicionados em um plano horizontal.

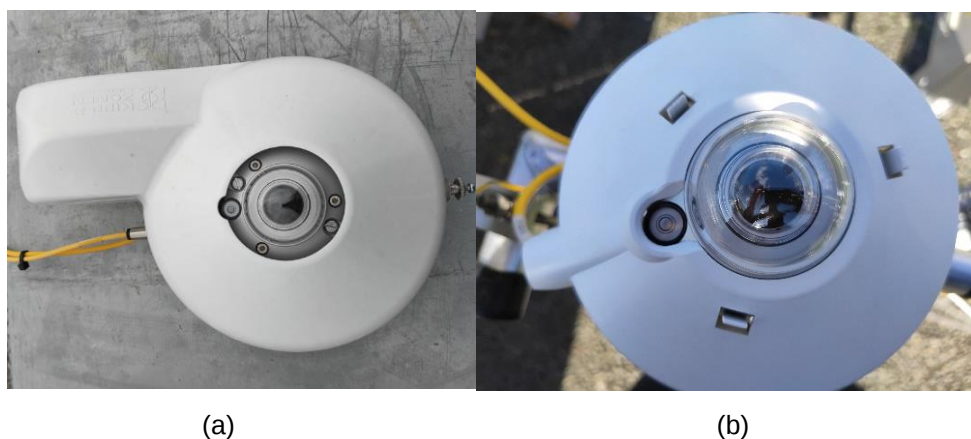


Figura 2 – Piranômetros Radiação Global Horizontal (a) CMP 10 e (b) CMP 6. (Acervo LABENS, 2019)

A radiação difusa foi monitorada por piranômetros termoelétricos KIPP&ZONEN – CMP 10 Secondary Class, conforme Figura 3(a), instalados em um rastreador solar e sombreados por esferas de sombreamento, pertencentes as estações SONDA. A radiação direta normal foi monitorada por pireliômetros KIPP&ZONEN – CHP 1 acoplados a um rastreador solar e instalados nas estações SONDA, conforme Figura 3(b).

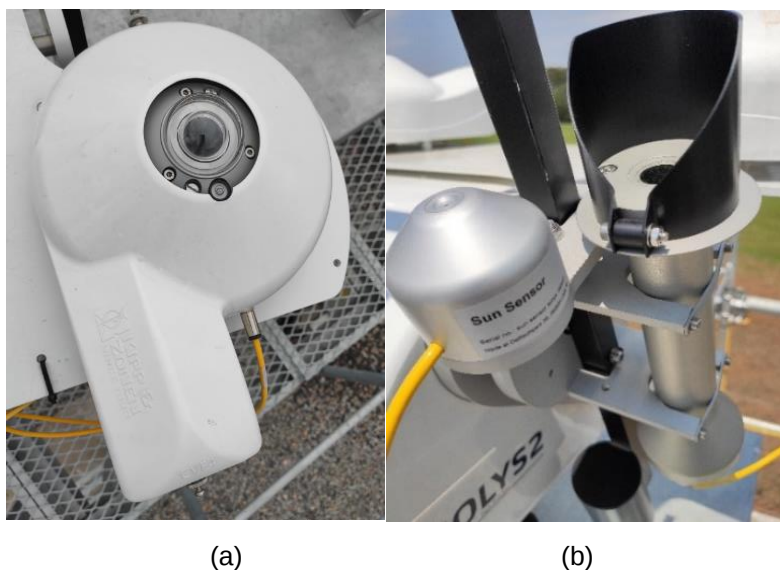


Figura 3 – (a) Piranômetro Radiação Difusa CMP 10 e (b) Pireliômetro Direta Normal CHP 1. (Acervo LABENS)

3.1 Modelo para Estimativa da Irradiação Difusa (I_d)

A irradiação difusa foi estimada através do método proposto por Erbs et al. (1982) que faz a divisão da curva em três equações: reta, equação de quarta ordem e constante para valores altos de K_t . O modelo está apresentado na Equação 1.

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

Onde: K_t é o índice de transmissividade, razão entre a irradiância global e extraterrestre e $(\frac{I_d}{I})$ é a fração difusa, razão entre a irradiação difusa e a global.

3.2 Estimativa da Irradiação Direta Normal (I_N)

Como descrito na sessão 1, a irradiação global horizontal é a soma das irradiações direta (I_b) e difusa (I_d), conforme Equação 2.

$$I_G = I_d + I_b \quad (2)$$

Onde a irradiação direta pode ser determinada como o produto da irradiação direta normal (I_N) e o cosseno do ângulo zenital solar (θ_z), mostrada na Equação 3.

$$I_b = I_N \cos(\theta_z) \quad (3)$$

A partir desses parâmetros obtém-se a parcela da componente direta normal através da Equação 4.

$$I_N = \frac{(I_G - I_d)}{\cos(\theta_z)} \quad (4)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados obtidos pelas estações pode-se constatar que, em determinados meses o comportamento da radiação solar é semelhante ao apresentado pelo Atlas enquanto em outros períodos há variação significativa. Foram escolhidas algumas estações para apresentação dos dados em gráficos, de maneira geral, o comportamento foi semelhante em todas as cidades estudadas.

A Figura 4(a) mostra a comparação entre os valores de irradiação global horizontal medidos pela estação SONDA de Campo Mourão em 2020 e o erro relativo em comparação ao agregado histórico do Atlas. Já a Figura 4(b) demonstra os valores medidos de irradiação global horizontal nas estações SONDA e EPE em Curitiba.

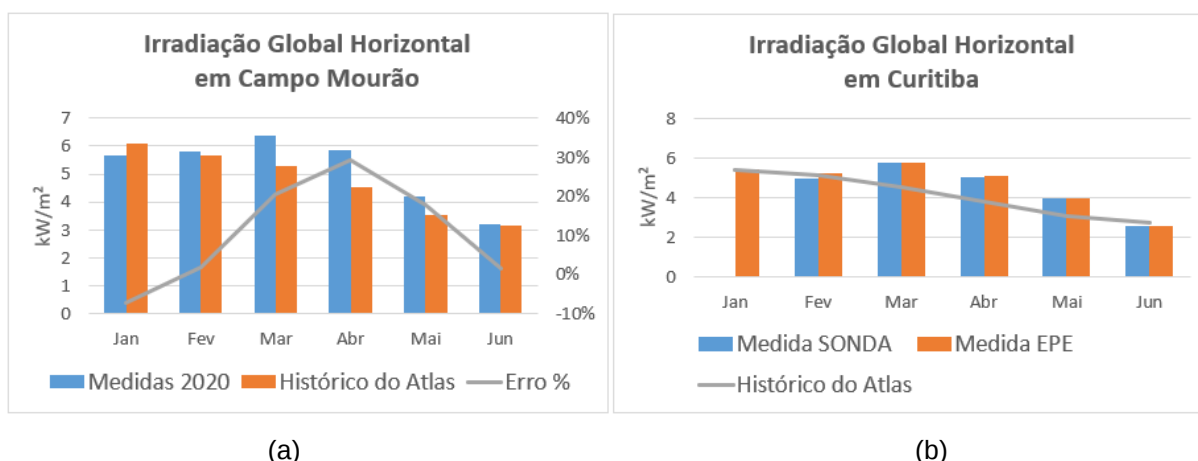
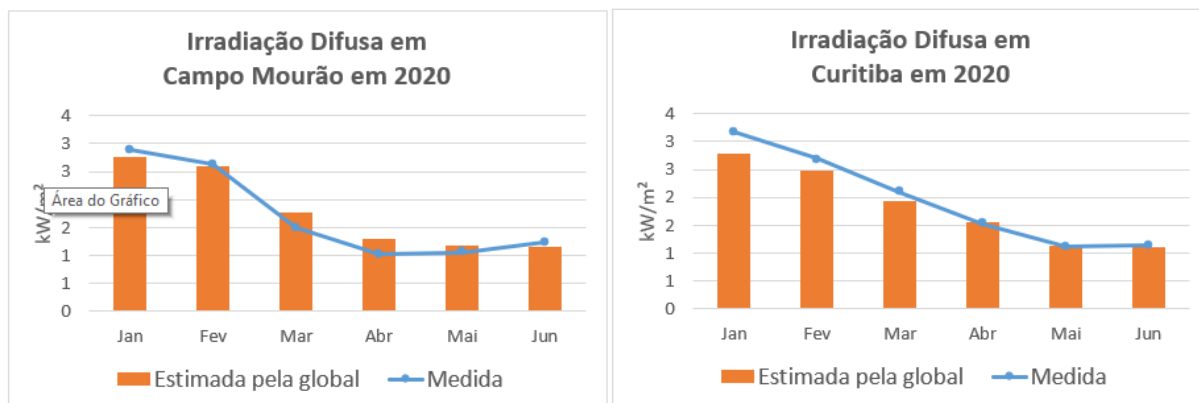


Figura 4 – (a) Irradiação Global Horizontal em Campo Mourão; (b) Irradiação Global Horizontal em Curitiba. (Elaborado pelos Autores, 2020)

Os dados de irradiação difusa obtiveram resultados satisfatórios quanto aos estimados. Respectivamente, a Figura 5(a) e Figura 5(b) comparam a irradiação difusa estimada pela global com o valor medido para Campo Mourão e Curitiba.

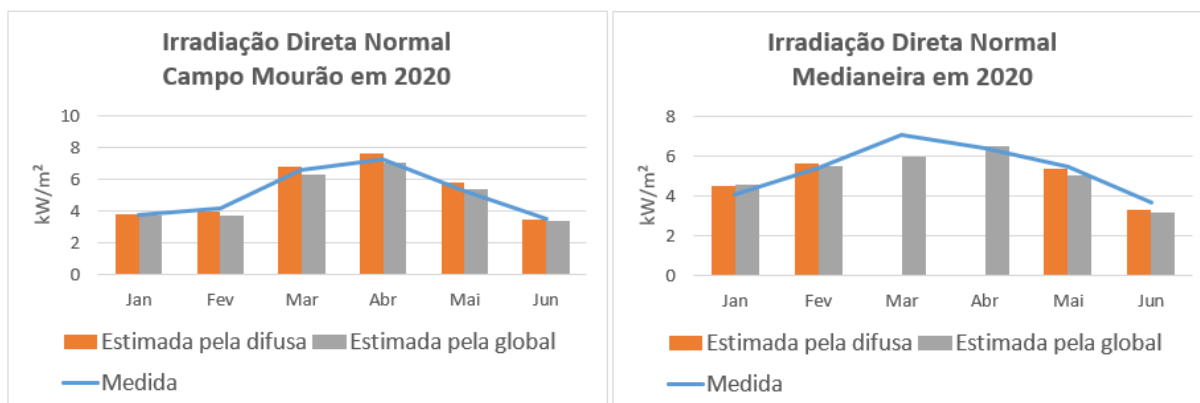


(a)

(b)

Figura 5 – (a) Irradiação Difusa Estimada e Medida em Campo Mourão; (b) Irradiação Difusa Estimada e Medida em Curitiba. (Elaborado pelos autores, 2020)

De maneira similar, a Figura 6(a) e a Figura 6(b) comparam a irradiação direta normal medida e estimada, tanto pela difusa medida tanto quanto pela difusa estimada pela global para Campo Mourão e Medianeira, respectivamente.



(a)

(b)

Figura 6 – (a) Irradiação Direta Normal Medida e Estimada em Campo Mourão; (b) Irradiação Direta Normal Medida e Estimada em Medianeira. (Elaborado pelos Autores, 2020)

A Figura 7 mostra a comparação entre a irradiação difusa medida e difusa estimada pelas estações padrão SONDA e EPE em Curitiba, devido ao fato de serem duas estações de diferentes configurações instaladas no mesmo local. Assim, pode-se

analisar e validar a estimativa de uma mesma componente em estações com sensores de padrões diferentes.

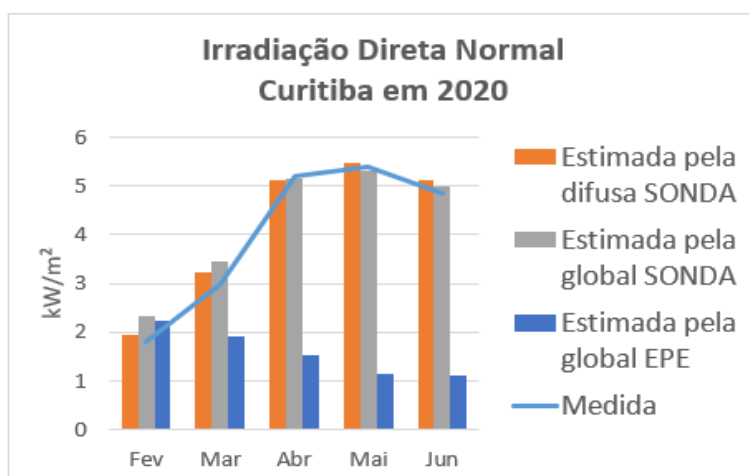


Figura 7 – Irradiação Direta Normal Medida pelas Estações SONDA e EPE em Curitiba. (Elaborado pelos Autores, 2020)

Conforme proposto, foram estimados dados de irradiação direta normal para todas as estações. A Tabela 1 apresenta os valores estimados para as estações padrão EPE, nesse caso estimou-se a difusa a partir da global horizontal medida e então a direta normal em função da difusa estimada conforme proposto na Equação 4.

Tabela 1 – Estimativas da Irradiação Direta Normal para as estações padrão EPE.

Mês	EPE			
	DNI Estimada Cornélio Procópio	DNI Estimada Curitiba	DNI Estimada Pato Branco	DNI Estimada Ponta Grossa
Jan	-	3.61	3.89	3.16
Fev	-	3.39	5.52	3.69
Mar	6.42	5.25	6.80	5.24
Abr	6.94	5.41	6.93	5.80
Mai	5.55	5.02	4.96	5.03
Jun	4.23	2.88	3.02	3.28

(Elaborado pelos Autores, 2020)

Os resultados das estações padrão SONDA de Curitiba, Campo Mourão e Medianeira estão apresentados na Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4, respectivamente. Em Curitiba, o *datalogger* travou e a coleta de vários dias foram prejudicados em janeiro.

Tabela 2 – Estimativas da Irradiação Direta Normal e Comparação com o Atlas para Curitiba.

SONDA CURITIBA							
Mês	Medida	Calculada a partir da Difusa Medida	Variação %	Calculada a partir da Difusa Estimada	Variação %	Atlas	Variação %
Jan	1.80	1.94	8%	2.34	30%	3.53	96%
Fev	2.98	3.23	9%	3.44	15%	3.63	22%
Mar	5.20	5.11	-2%	5.17	-1%	3.31	-36%
Abr	5.41	5.48	1%	5.32	-2%	3.14	-42%
Mai	4.86	5.14	6%	4.98	2%	2.91	-40%
Jun	2.66	2.88	8%	2.83	6%	2.90	9%

(Elaborado pelos Autores, 2020)

Tabela 3 - Estimativas da Irradiação Direta Normal e Comparação com o Atlas para Campo Mourão

SONDA CAMPO MOURÃO							
Mês	Medida	Calculada a partir da Difusa Medida	Variação %	Calculada a partir da Difusa Estimada	Variação %	Atlas	Variação %
Jan	3.71	3.81	6%	3.71	4%	5.09	42%
Fev	4.20	3.95	-1%	3.73	-7%	4.71	18%
Mar	6.58	6.81	4%	6.27	-5%	4.88	-26%
Abr	7.25	7.67	6%	7.08	-2%	4.86	-33%
Mai	5.28	5.77	9%	5.39	2%	4.11	-22%
Jun	3.48	3.45	-1%	3.39	-2%	3.83	10%

(Elaborado pelos Autores, 2020)

Em Medianeira, o rastreador solar estava desalinhado no período de 11 de março a 21 de abril de 2020, deixando este período sem dados de irradiância direta normal e difusa, o que impossibilitou os cálculos da irradiação direta normal a partir da difusa medida. Apenas a global horizontal estava disponível neste período, portanto foi calculada para os meses de março e abril apenas a irradiação direta normal a partir da difusa estimada pelo modelo.

Tabela 4 - Estimativas da Irradiação Direta Normal e Comparação com o Atlas para Medianeira

SONDA MEDIANEIRA							
Mês	Medida	Calculada a partir da Difusa Medida	Variação %	Calculada a partir da Difusa Estimada	Variação %	Atlas	Variação %
Jan	4.05	4.52	11%	4.54	12%	5.79	43%
Fev	5.38	5.62	4%	5.50	2%	4.96	-8%
Mar	-	-	-	5.99	-	5.02	-19%
Abr	-	-	-	6.49	-	4.44	46%
Mai	5.49	5.35	-2%	5.02	-9%	3.56	-35%
Jun	3.64	3.27	-10%	3.14	-14%	3.26	-10%

(Elaborado pelos Autores, 2020)

Com estes resultados notou-se que as variações percentuais variam entre os dados medidos pelas estações e o Atlas de acordo com as condições climáticas de um determinado período.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um método alternativo de estimativa da irradiação direta normal (I_N) a partir das irradiações global horizontal (I_g) medida e difusa (I_d) medida e estimada para o estado do Paraná. No primeiro caso, quando se calcula a irradiação direta normal a partir das irradiações global horizontal e difusa medidas, encontrou-se variações entre -1% e 11% em relação aos dados medidos pelas estações SONDA. Enquanto a irradiação direta normal estimada a partir da global horizontal medida e difusa estimada por Erbs et al. (1982) variam de -14% a 15%.

Os dados mensais das componentes da irradiância foram comparados com os apresentados pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná (2017). Exceto pelo mês de janeiro para a Estação SONDA de Curitiba que teve problemas e apresentou variação percentual da irradiação direta normal de 96% em relação ao Atlas, a maior variação foi de 43% para Medianeira no mês de fevereiro e a menor também foi para a cidade com 8% no mês de fevereiro. O que se deve levar em consideração nestes casos é que o Atlas possui estudo com base em 134.966 imagens do satélite GOES entre o período de 1999 e 2015 (TIEPOLO et al., 2017), são 17 anos de dados históricos enquanto a estação apresenta valores de um mês específico.

Analisando a cidade de Curitiba, que possui duas estações padrões SONDA e EPE próximas, na Figura 7 observou-se que os dados estimados para irradiação direta normal encontrados através do modelo de difusa proposto por Erbs et al. (1982) e empregadas na Equação 4 mostram que a metodologia pode ser aplicada para os diversos locais no estado do Paraná.

6. 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 BIBLIOGRÁFICAS

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; 28(4):293–302, 1982.

LABENS – Laboratório de Energia Solar, *"Projetos"*, UTFPR, 2019. Disponível em: <<https://labens.ct.utfpr.edu.br/categoria/projetos/>>.

LOPEZ, G.; RUBIO, M. A., BATLLES, F. J., *"Estimation of hourly direct normal from measured global solar irradiance in Spain"*, Renewable Energy, v. 21, p. 171-86, 2000.

MACGNAN, H.M., *"Introdução à radiação solar"*, São Leopoldo, 2010.

PORFÍRIO, A. C. S., CEBALLOS, J. C., *"Um método de estimativa de irradiação solar direta normal a partir de imagens de satélite geoestacionário: resultados preliminares"*, 2013.

SOUZA, M. B., TONOLO, E. A., YANG, R. L., TIEPOLO, G. M., URBANETZ JR., J., *"Determinação da Irradiação Difusa a partir da Irradiação Global Horizontal – Estudo Para a Cidade de Curitiba"*, Smart Energy, 2018.

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 ed., Curitiba: UTFPR, 2017.

VALIATI, Melania I., RICIERI, Reinaldo P., *"Estimativa da Irradiação solar Global com Partição Mensal e Sazonal para a Região de Cascavel – PR"*, Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.1, p.76-85, jan. /abr. 2005.