

DETERMINAÇÃO DA IRRADIAÇÃO DIFUSA A PARTIR DA IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL - ESTUDO PARA A CIDADE DE CURITIBA

Muriele Bester de Souza¹, Édwin Augusto Tonolo², Renata Lautert Yang³, Gerson Maximo Tiepolo⁴, Jair Urbanetz Junior⁵

¹UTFPR, Curitiba, Brasil, murielebester@gmail.com

²UTFPR, Curitiba, Brasil, edwintonolo@gmail.com

³UTFPR, Curitiba, Brasil, relautert@gmail.com

⁴UTFPR, Curitiba, Brasil, tiepolo@utfpr.edu.br

⁵UTFPR, Curitiba, Brasil, urbanetz@utfpr.edu.br

RESUMO:

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. Normalmente, estações solarimétricas ou meteorológicas não possuem sensores para medição da irradiação difusa, devido ao alto investimento e necessidade de manutenção e operação constantes. Este artigo apresenta métodos para a determinação da irradiação difusa a partir de dados medidos em superfície da irradiação global horizontal na cidade de Curitiba, obtidos por meio de piranômetros instalados na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) sede Centro e na estação Curitiba-A807 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). São apresentados dois modelos consolidados para a estimativa da irradiação difusa média diária mensal, a partir dos estudos de Liu e Jordan (1960) e de Page (1961). Finalmente, esses dados foram comparados com os apresentados pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, verificando-se as diferenças percentuais apresentadas. Neste estudo foi observado que o modelo elaborado por Page apresentou melhores resultados nas estimativas da radiação difusa quando comparado aos valores apresentados pelo Atlas do Paraná, com uma variação média de -1,39% e -1,55%, para dados do INMET e UTFPR respectivamente.

Palavras chave: Irradiação Difusa, estimativa, irradiação global, energia solar.

1. INTRODUÇÃO

A energia solar não é uma fonte renovável de energia, mas sim uma fonte inesgotável de obtenção de energia [1]. A publicação feita pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) do Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª edição (2017) mostra que o Brasil possui um grande potencial onde até mesmo no local menos ensolarado do Brasil é viável implantar sistemas de energia solar fotovoltaica.

Em dezembro de 2017, foi publicado o primeiro Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, cujo projeto foi resultado de uma parceria entre a UTFPR, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a Itaipu Binacional e o Parque Tecnológico Itaipu (PTI). Entretanto, durante o projeto, foi percebida uma dificuldade na validação dos dados estimados pelo

modelo BRASIL-SR com os dados coletados em superfície, visto que o estado do Paraná não possui uma rede solarimétrica própria e de alta confiabilidade, necessitando destas informações para o aprimoramento e desenvolvimento de novas pesquisas neste setor, sejam sistemas termosolares ou fotovoltaicos.

Cada sistema possui uma maneira de funcionamento: os térmicos dependem exclusivamente da irradiância solar direta, já os fotovoltaicos utilizam toda a irradiância disponível, seja ela em um plano inclinado fixo ou por meio de seguidores solares [2]. Na Figura 1 é apresentada uma representação básica dos componentes da radiação solar, de acordo com o Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná [3].

Segundo Pinho e Galdino [4] as componentes da radiação são descritas como:

Irradiância extraterrestre: irradiância solar que atinge o topo da camada atmosférica da Terra.

Irradiação direta: irradiação solar que incide diretamente sobre a superfície, sem sofrer qualquer influência.

Irradiação difusa: irradiação solar que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre.

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

Irradiação global: quantidade resultante da soma das irradiações solares direta, difusa e albedo.

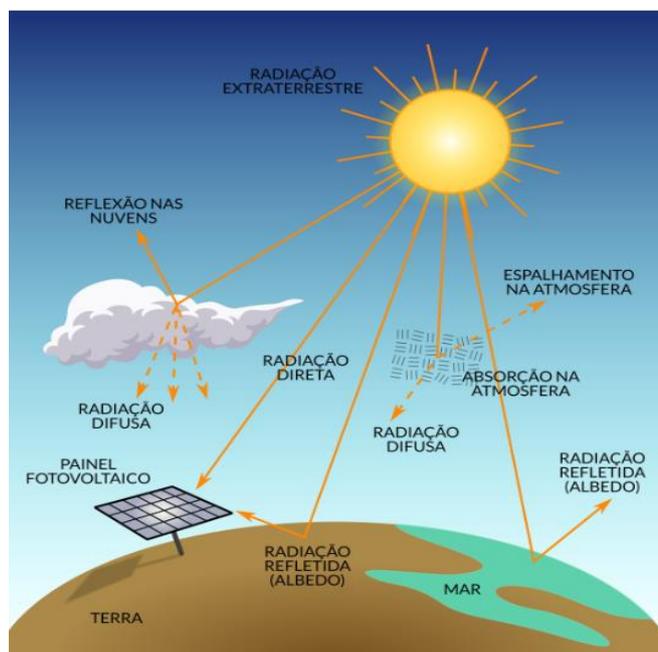


Figura 1 - Representação das Componentes da Radiação Solar

Fonte: Tiepolo *et al.*, 2017

Para o aproveitamento fotovoltaico, a irradiação de maior interesse é a irradiação global horizontal, que quantifica a radiação recebida por uma superfície plana horizontal. Em dias nublados, a principal parcela é a irradiação difusa horizontal, enquanto que em dias claros prevalece a irradiação direta [5].

2. OBJETIVO

Atualmente nas estações climatológicas pertencentes ao INMET são coletados apenas a

componente global horizontal. A precisão e qualidade dos dados de radiação solar coletados por um equipamento são muito importantes e dependem da forma de instalação, operação, manutenção recomendadas pelos fabricantes, e devem seguir as normas ISO (*International Organization for Standardization*) e WMO (*World Meteorological Organization*) que estabelecem classificações e especificações para a medição da irradiância solar [1].

Devido as diferentes características das componentes e a dificuldade de se obter dados medidos da fração difusa, este trabalho tem por objetivo determinar a irradiação difusa a partir de dados medidos em superfície da irradiação global horizontal na cidade de Curitiba, através dos modelos estudados por Liu e Jordan [6] e Page [7], métodos estes consolidados e muito utilizados por pesquisadores da área, e comparar os dados estimados por estes modelos com os dados apresentados pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná.

3. MÉTODOS

A radiação global foi monitorada por dois piranômetros termoeletrônicos KIPP&ZONEN - CMP3 Second Class [8], conforme Figura 2 e posicionados em um plano horizontal. Os dados obtidos são de 12 meses, a partir de junho de 2017 a maio de 2018 e foram retirados do piranômetro instalado na Estação Curitiba-A807, do INMET [9], Curitiba - PR, com latitude de 25°26.922' S e longitude de 49°13.836' W. O outro piranômetro está localizado na UTFPR, câmpus Curitiba sede Centro, localizada na Av. Sete de Setembro 3165, com latitude de 25°26.352' S e longitude de 49°16.176' W.



Figura 2 - Piranômetro CMP3

Fonte: Kipp&Zonen, 2018

Os dados coletados da componente global horizontal, tanto pela estação meteorológica, quanto pela UTFPR, são em irradiância solar (W/m^2), armazenados de hora em hora, logo, também são dados de irradiação solar horária (Wh/m^2). Para a estimativa da irradiação difusa são necessários premissas e cálculos apresentados nesta seção.

A irradiação solar extraterrestre em superfície horizontal é obtida, segundo Macagnan [10], pela Equação 1:

$$I_{on} = I_{sc} E_o \quad (1)$$

Onde:

I_{on} é a irradiância extraterrestre;

I_{sc} é a constante solar igual a $1367 W/m^2$;

E_o é o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, descrita na Equação 2:

$$E_o = I_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right) \quad (2)$$

Sendo "n" o número do dia no calendário Juliano, variando de 1 (1° de janeiro) até 365 (31 de dezembro).

Com a obtenção dos dados de irradiação solar na superfície terrestre através dos piranômetros do INMET e da UTFPR, e a partir do cálculo de irradiação extraterrestre, obtêm-se os valores do índice de transmissividade da atmosfera (K_t), o qual é definido como a razão entre a irradiação solar na superfície terrestre (H) e a irradiação solar que chega ao topo da atmosfera (H_o). Varia de acordo com a quantidade de nuvens e aerossóis na atmosfera, podendo haver aumento ou redução das componentes direta ou difusa, da radiação solar que atingem a superfície [11]. K_t está definido pela Equação 3:

$$K_t = \frac{H}{H_o} \quad (3)$$

Para calcular a irradiação extraterrestre horizontal diária média mensal, utiliza-se o dia médio do ano, que é o dia do ano para o qual a radiação extraterrestre diária é quase igual ao valor médio mensal. Observou-se que o 16° dia de cada mês pode levar a pequenos erros em H_o , principalmente para junho e dezembro, que são os solstícios. Os dias recomendados para cada mês são apresentados na Tabela 1. H_o pode ser estimada através da Equação 4:

$$H_o = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_o \left[\left(\frac{\pi}{180} \right) \omega s (\sin \delta \cdot \sin \varphi) + (\cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \omega s) \right] \quad (4)$$

Onde:

ω é o ângulo do nascimento do Sol, em graus, e pode ser obtido através da Equação 5:

$$\omega s = \cos^{-1}(-tg \varphi tg \delta) \quad (5)$$

δ é a declinação solar, em graus, e é calculada através da Equação 6:

$$\delta = 23,45^\circ \sin \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (6)$$

φ é a latitude local, em graus.

Tabela 1 - Dia médio padrão do mês

Mês	n para i:th Dia do Mês	Para o dia médio do mês		
		Data	n, dia do ano	δ , declinação (°)
Janeiro	i	17	17	-20,9
Fevereiro	31+i	16	47	-13
Março	59+i	16	75	-2,4
Abril	90+i	15	105	9,4
Mai	120+i	15	135	18,8
Junho	151+i	11	162	23,1
Julho	181+i	17	198	21,2
Agosto	212+i	16	228	13,5
Setembro	243+i	15	258	2,2
Outubro	273+i	15	288	-9,6
Novembro	304+i	14	318	-18,9
Dezembro	334+i	10	344	-23

Fonte: Elaborado com base em [10]

Após determinado o índice K_t , estima-se a variação da fração difusa diária K_d , que é a relação entre a irradiação difusa e a irradiação global horizontal em superfície e está definida pela Equação 7:

$$Kd = \frac{H_d}{H} \quad (7)$$

O primeiro método utilizado para estimar a irradiação solar difusa diária média mensal em superfície horizontal foi de Liu e Jordan [6] e está definido pela Equação 8 e tem como parâmetro o índice Kt.

$$\frac{H_d}{H} = 1,39 - 4,027Kt + 5,531Kt^2 - 3,108Kt^3 \quad (8)$$

Definida para $0,3 < Kt < 0,7$.

O segundo método utilizado para estimativa da irradiação solar difusa diária média mensal, foi de Page [7] e está definido pela Equação 9, também em função do índice Kt:

$$\frac{H_d}{H} = 1,00 - 1,13Kt \quad (9)$$

4. RESULTADOS

Através dos dados obtidos pelos piranômetros do INMET e da UTFPR, no período de 12 meses (junho de 2017 a maio de 2018) pode-se constatar que esses valores, comparados com o Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, apresentaram valores próximos ao do Atlas, o qual apresenta estimativas da radiação solar tendo como base 17 anos de dados satelitais (1999 a 2015).

As Tabelas 2 e 3 apresentam os meses do ano analisado, os valores calculados dos índices de transmissividade (Kt) e da fração difusa (Kd) para o INMET e a UTFPR.

Também foram apresentados os dados de irradiação global horizontal medida e de irradiação difusa horizontal estimada de acordo com os métodos de Liu - Jordan e de Page, respectivamente. Por fim, apresenta-se a variação percentual entre os valores de irradiação difusa estimada pelos modelos e os apresentados pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná.

Os índices Kt e Kd são valores adimensionais, pois representam a fração das componentes que chegam em superfície, sendo as irradiações global e difusa representadas em W.h/m².dia.

Os métodos para determinação da componente de irradiação difusa escolhidos de Liu e Jordan (Tabela 2) e de Page (Tabela 3) apresentaram dados de irradiação difusa dentro do esperado quando comparados com os apresentados pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, onde se assume que os modelos são viáveis para estimativa da mesma.

Tabela 2 - Comparação dos dados apresentados pelo Atlas de Energia Solar do Paraná com os obtidos pela Estação INMET e UTFPR, com Kd calculado pelo método de Liu e Jordan

Mês	Ano	Kt INMET	kd INMET	Kt UTFPR	kd UTFPR	Global INMET Wh/m ² .dia	Global UTFPR Wh/m ² .dia	Global Atlas Wh/m ² .dia	Difusa INMET calculado Wh/m ² .dia	Difusa UTFPR calculado Wh/m ² .dia	Difusa Atlas Wh/m ² .dia	Varição Percentual INMET-Atlas	Varição Percentual UTFPR-Atlas
Jun.	2017	0,491	0,378	0,505	0,367	2900	2979	2755	1096	1093	1268	-13,55%	-13,80%
Jul.	2017	0,554	0,328	0,590	0,301	3430	3654	2903	1126	1100	1301	-13,45%	-15,43%
Ago.	2017	0,450	0,414	0,480	0,387	3340	3561	3884	1383	1380	1466	-5,63%	-5,90%
Set.	2017	0,532	0,345	0,476	0,391	4830	4320	3844	1665	1689	1898	-12,27%	-11,01%
Out.	2017	0,379	0,489	0,397	0,469	4010	4200	4348	1962	1969	2344	-16,28%	-15,98%
Nov.	2017	0,476	0,391	0,473	0,394	5510	5480	5232	2156	2157	2638	-18,25%	-18,23%
Dez.	2017	0,396	0,470	0,396	0,470	4740	4740	5558	2227	2227	2792	-20,24%	-20,24%
Jan.	2018	0,410	0,455	0,418	0,446	4850	4950	5258	2205	2207	2670	-17,42%	-17,35%
Fev.	2018	0,452	0,413	0,434	0,430	5000	4810	5187	2066	2066	2469	-16,33%	-16,31%
Mar.	2018	0,428	0,436	0,434	0,430	4200	4260	4551	1830	1831	2197	-16,68%	-16,67%
Abr.	2018	0,574	0,313	0,570	0,316	4660	4630	3778	1458	1462	1828	-20,22%	-20,03%
Mai.	2018	0,530	0,347	0,541	0,338	3510	3580	3031	1217	1211	1458	-16,56%	-16,91%
MÉDIA		0,47	0,40	0,48	0,39	4248	4264	4194	1699	1699	2027	-15,57%	-15,66%

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 3 - Comparação dos dados apresentados pelo Atlas de Energia Solar do Paraná com os obtidos pela Estação INMET e UTFPR, com Kd calculado pelo método de Page

Mês	Ano	Kt INMET	kd INMET	Kt UTFPR	kd UTFPR	Global INMET Wh/m ² .dia	Global UTFPR Wh/m ² .dia	Global Atlas Wh/m ² .dia	Difusa INMET calculado Wh/m ² .dia	Difusa UTFPR calculado Wh/m ² .dia	Difusa Atlas Wh/m ² .dia	Variação Percentual INMET-Atlas	Variação Percentual UTFPR-Atlas
Jun.	2017	0,491	0,445	0,505	0,430	2900	2979	2755	1290	1280	1268	1,74%	0,95%
Jul.	2017	0,554	0,374	0,590	0,333	3430	3654	2903	1283	1218	1301	-1,35%	-6,38%
Ago.	2017	0,450	0,491	0,480	0,457	3340	3561	3884	1640	1628	1466	11,85%	11,07%
Set.	2017	0,532	0,398	0,476	0,462	4830	4320	3844	1924	1995	1898	1,37%	5,13%
Out.	2017	0,379	0,572	0,397	0,552	4010	4200	4348	2294	2317	2344	-2,14%	-1,14%
Nov.	2017	0,476	0,462	0,473	0,465	5510	5480	5232	2548	2550	2638	-3,42%	-3,33%
Dez.	2017	0,396	0,553	0,396	0,553	4740	4740	5558	2620	2620	2792	-6,17%	-6,17%
Jan.	2018	0,410	0,537	0,418	0,527	4850	4950	5258	2604	2610	2670	-2,48%	-2,24%
Fev.	2018	0,452	0,490	0,434	0,509	5000	4810	5187	2448	2449	2469	-0,83%	-0,82%
Mar.	2018	0,428	0,516	0,434	0,509	4200	4260	4551	2168	2170	2197	-1,32%	-1,25%
Abr.	2018	0,574	0,351	0,570	0,355	4660	4630	3778	1637	1646	1828	-10,46%	-9,98%
Mai.	2018	0,530	0,401	0,541	0,389	3510	3580	3031	1408	1393	1458	-3,45%	-4,45%
MÉDIA		0,47	0,47	0,48	0,46	4248	4264	4194	1989	1990	2027	-1,39%	-1,55%

Fonte: Elaborado pelos autores

5. DISCUSSÃO

Verificou-se que a variação média da irradiação difusa obtida pelo método de Liu e Jordan para a UTFPR em relação ao Atlas é de -16%, mesmo percentual encontrado entre os valores obtidos para o INMET em relação ao Atlas. Isto mostra que os dados obtidos pelos locais estudados são bastante parecidos e possuem uma variação média considerável em relação aos dados do Atlas, que foi a referência utilizada.

Entretanto, para o método de Page, a variação média da irradiação difusa apresentada entre os valores obtidos para a UTFPR em relação ao Atlas foi de -1,55%, enquanto para o INMET a variação foi de -1,39%. Estes resultados mostram que os métodos estudados apresentaram valores muito próximos aos encontrados no Atlas no período analisado.

Estudos como o de Crotti e Rampinelli [13] mostram que quanto menor o valor do índice Kt, maior o valor do índice Kd, o que pode ser observado no Gráfico 1 e Gráfico 2. Isso mostra a convergência dos estudos para diferentes locais analisados, comprovando a validação dos métodos utilizados.

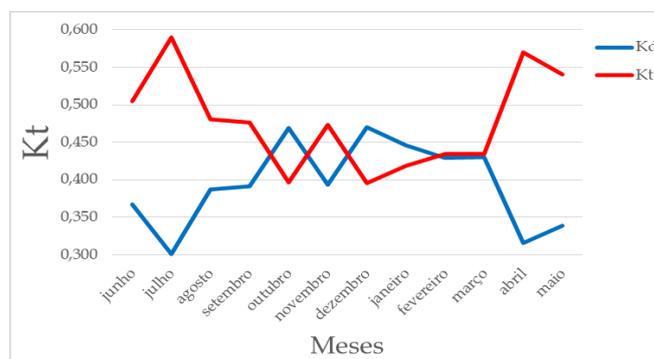


Gráfico 1 - Comparação entre Kt e Kd (Liu e Jordan)

Fonte: Elaborado pelos autores

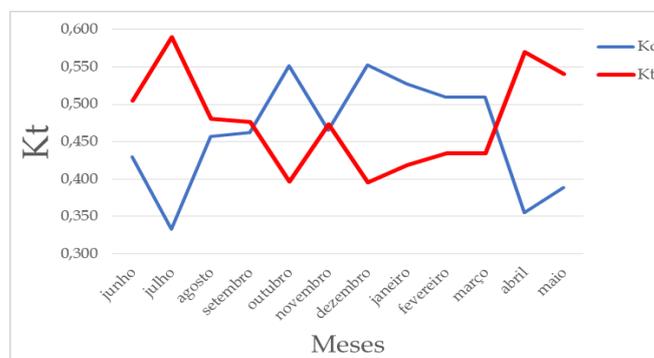


Gráfico 2 - Comparação entre Kt e Kd (Page)

Fonte: Elaborado pelos autores

6. CONCLUSÃO

O estudo deste trabalho apresentou análises para modelos de estimativa de irradiação difusa diária média através da escolha dos modelos de Liu e Jordan e de Page. Com os resultados apresentados nas Tabelas 2 e 3 verificou-se menor variação entre os dados quando obtidos pelo método de Page. Isso não significa que o método de Liu e Jordan seja menos confiável, pois se deve levar em conta que o período de estudo é curto em relação aos valores apresentados no Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná no qual se utilizou um histórico de dados compreendidos entre 1999 e 2015.

Pode-se, também, através das comparações observar que os dados medidos pela Estação do INMET-Curitiba e pela UTFPR da irradiação global horizontal são muito próximos.

Constatou-se que nos períodos compreendidos entre abril e agosto (estações de outono e inverno) a parcela de irradiação difusa apresentou ser menor que nos outros meses do ano, caracterizados por uma menor nebulosidade e dias mais ensolarados em relação aos demais períodos do ano. Essa informação é confirmada pelos mapas apresentados no Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, onde são mostradas as médias diárias sazonais de irradiação difusa.

Por fim, para se conhecer qual destes modelos apresenta melhor estimativa da irradiação difusa, seria ideal que se obtivesse os valores medidos desta componente, o que se pretende realizar numa próxima etapa desta pesquisa.

7. 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 deste projeto de P&D "PD 2866-0464/2017 - METODOLOGIA PARA ANÁLISE, MONITORAMENTO E GERENCIAMENTO DA GD POR FONTES INCENTIVADAS".

8. REFERÊNCIAS

[1] PEREIRA, E., Martins, F., Gonçalves, A., Costa, R., Lima, F., Rütther, R., Abreu, S., Tiepolo, G., Pereira, S. e Souza, J. (2017). Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2ª ed. [ebook]

São José dos Campos: INPE. Disponível em: http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf

- [2] SOUZA, G. K.; MACAGNAN M. H. Comparação de modelos de radiação difusa horária a partir de dados medidos pela rede sonda em algumas cidades do Brasil. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018.
- [3] 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.
- [4] PINHO, João T.; GALDINO, Marco A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2014.
- [5] EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica. Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Rios de Janeiro, 2012. Disponível em: http://www.cogen.com.br/content/upload/1/documentos/Solar/Solar_COGEN/NT_EnergiaSolar_2012.pdf >. [Acesso em julho 2018]
- [6] LIU, B.Y.H., JORDAN, R.C. The interrelationship and characteristic distribution of direta, difuse and total solar radiation. Solar Energy, v.4, pp.1-19, 1960.
- [7] PAGE, J. K. The estimation of monthly mean values os 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,Paper no 598,Vol4, pp. 378390, 1961.
- [8] KIPP&ZONEN. Kipp & Zonen. Holanda. [online] Disponível em: <http://www.kippzonen.com/>. [Acesso em julho 2018].
- [9] INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Data Base. 2018.
- [10] MACGNAN, H.M. Introdução à radiação solar. São Leopoldo, 2010.
- [11] 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.
- [12] KLEIN, S. A. Calculation of montlhly average insolation on tilted surfaces. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53706, U.S.A, 1976. Solar Energy, vol 19, pp. 325-329. Pergamon Press 1977.
- [13] CROTTI, P.; RAMPINELLI, G. A. Estimativa das Componentes Direta e Difusa da Radiação Solar em Superfície Horizontal para Araranguá/Sc a partir de Redes Meteorológicas. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018.