

Artigo

Estudo do Comportamento de Painei Fotovoltaico em Diferentes Condições de Irradiação e Altura Pluviométrica em Curitiba

Nicole Polityto Cremasco¹

<https://orcid.org/0000-0003-0986-8765>

Jorge Assade Leludak¹

<https://orcid.org/0000-0003-3755-7737>

Jair Urbanetz Junior¹

<https://orcid.org/0000-0001-9355-1730>

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

Associate Editor:

Received: YYYY.MM.DD; Accepted: YYYY.MM.DD.

* Correspondência:

nicnicolecrem@gmail.com; Tel.: +55-41-997464124 (N.P.C.)

assade@utfpr.edu.br; Tel.: +55-41-991025958(J.A.L.)

urbanetz@utfpr.edu.br; Tel.: +55-41-998335729 (J.U.J.)

HIGHLIGHTS

- Produtividade horária e diária de painel fotovoltaico.
- Comportamento de painel fotovoltaico sob diferentes condições de irradiação.
- Comportamento de painel fotovoltaico sob diferentes condições de precipitação.

Resumo: Em um cenário de aumento da demanda de energia elétrica e da emissão de gases poluentes tóxicos por meio das fontes de geração de energia provenientes de combustíveis fósseis, a energia solar fotovoltaica pode ser uma solução para a busca por fontes menos ambientalmente danosas. O Brasil possui altos valores de irradiação, uma das principais características para uma boa produção fotovoltaica, todavia existe a necessidade de estudar a produtividade dos painéis fotovoltaicos em diferentes condições meteorológicas. Sendo assim, este artigo é um estudo de cinco dias com diferentes condições de irradiação e chuva para a análise da influência da nebulosidade e da chuva

na geração, horária e diária, e na produtividade de um painel fotovoltaico instalado em Curitiba. Como resultado, os dias com menores valores de irradiação apresentaram menores valores de geração e rendimento, porém a influência da chuva esteve mais relacionada à sua distribuição durante o dia do que à sua intensidade.

Palavras-chave: YIELD, geração fotovoltaica, influência da irradiação e chuva

INTRODUÇÃO

Dois problemas sérios relacionados à geração de energia elétrica são o aumento da demanda em um cenário de super exploração de recursos fósseis e os problemas relacionados às emissões de combustíveis fósseis. Sobre o primeiro problema, há expectativa de aumento de 56% da demanda mundial entre 2010 e 2040, o que poderá causar o aumento do custo da energia e, conseqüentemente, limitará a disponibilidade dela. Sobre o segundo problema, há a emissão, na maioria, de gases poluentes perigosos, compostos por 43% de óxidos de enxofre, 61% de óxidos de nitrogênio e 43% de material particulado fino pelos combustíveis fósseis. Nesse contexto, existe a necessidade de encontrar outras fontes de geração de energia elétrica que sejam ecologicamente corretas, como as fontes renováveis: eólica, solar, hidrelétrica [1].

Em 2018, a representatividade das fontes renováveis foi equivalente a 25,8% do valor total de utilização de eletricidade. Há aumento da utilização destas fontes de geração de energia, como no caso dos sistemas fotovoltaicos, que aumentaram sua potência instalada entre 2017 a 2018 em mais de 98GW, sendo que a capacidade instalada total no final de 2018 era de 402GW [2].

O princípio de funcionamento desta fonte de geração de energia se deve à conversão da energia solar em energia elétrica, que ocorre pelo processo fotovoltaico [3]. Portanto, como o Brasil possui altos valores de irradiação, possui grande potencial de geração de energia por meio da energia fotovoltaica, assim como o Paraná, que possui valores de irradiação mais altos do que os encontrados na Alemanha [4].

Todavia, há variação da energia produzida de acordo com as condições externas com as quais o sistema fotovoltaico interage, sendo duas delas a nebulosidade e a chuva, que podem causar redução na irradiação e, conseqüentemente, na geração de energia. Um estudo relativo à produtividade e desempenho de sistemas fotovoltaicos em Curitiba levando em consideração a irradiação foi realizado por [5] e um estudo a respeito da influência da nebulosidade e chuva na irradiação em Belém foi realizada por [6]. Todavia não há estudos a respeito da influência da chuva juntamente à irradiação em painéis fotovoltaicos instalados em Curitiba.

Sendo assim, este artigo é um estudo da produtividade e da geração de um painel fotovoltaico instalado em Curitiba, em cinco diferentes condições de irradiação e precipitação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Um painel fotovoltaico de tecnologia policristalina, com potência instalada de 2,10 kWp, instalado no Escritório Verde da UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná) foi o objeto de estudo deste artigo.

Para a realização dos cálculos de índice de mérito e da análise da influência da irradiação e da altura pluviométrica na geração fotovoltaica, foram selecionados cinco dias de outubro de 2018, com diferentes características meteorológicas. O estudo levou em consideração as condições horárias e diárias, separadamente.

Para a classificação dos dias selecionados utilizou-se a média diária de dados, da altura pluviométrica de Curitiba entre 1999 e 2018, provenientes de [7]. Estes valores podem ser observados pela tabela 1.

Tabela 1. Altura de precipitação diária em Curitiba

Ano	Média Diária de Altura Pluviométrica em Outubro
1999	3,8
2000	5,3
2001	6,98
2002	3,89
2003	2,6
2004	4,9
2005	5,42
2006	1,28
2007	3,85
2008	6,3
2009	4,71
2010	4,98
2011	6,37
2012	4,89
2013	3,13
2014	3,77
2015	7,96
2016	5,55
2017	7,05
2018	7,18
Média	4,99

De acordo com a média dos valores da tabela 1, a classificação foi realizada da seguinte forma:

- Um dia sem chuva: 1º de outubro;
- Dois dias com valores de altura de precipitação inferiores à média: dias 2 e 7 de outubro;
- Dois dias com valores de altura de precipitação superiores à média: dias 3 e 6 de outubro;

Os valores diários e horários de precipitação foram retirados de [8], enquanto os valores de irradiação foram obtidos por meio de um piranômetro instalado na UTFPR, modelo CMP 03, da marca *Kipp&Zonen*, por meio de um datalogger CR1000 do fabricante *Campbell Scientific*.

Os valores de irradiação eram apresentados por minuto, sendo assim todos os valores durante uma mesma hora foram somados para obtenção dos valores de irradiação horária que foram utilizados para o comparativo e os gráficos.

O cálculo de produtividade foi realizado tanto para as condições horárias quanto para as diárias por meio da equação 1.

$$YIELD = \frac{En}{P} \quad (1)$$

Sendo que YIELD representa a produtividade, P a potência instalada (kWp), e En a energia gerada(kWh), no caso da análise diária a energia produzida durante o dia inteiro foi considerada, enquanto no caso da análise horária a energia produzida durante a hora estudada foi considerada.

No caso da análise horária foram elaborados gráficos para a visualização da geração durante as horas com irradiação do dia levando em consideração também a condição de chuva.

RESULTADOS

A divisão dos resultados foi realizada de acordo com o período de análise, diário e horário, conforme as seções a seguir.

Análise Diária

Os valores de YIELD diário relacionados às condições de irradiação e precipitação de cada dia são representados por meio da tabela 2.

Tabela 2. YIELD diário nos dias selecionados

Dia	Irradiação Diária (kWh/m²)	Geração (kWh)	Precipitação (mm)	YIELD (kWh/kWp)
01/10/2018	5,9	9	0	4,28
02/10/2018	2,24	4	2	1,91
03/10/2018	2,21	3	17,2	1,43
06/10/2018	1,18	1	0,2	0,48
07/10/2018	1,46	1	7	0,48

Análise Horária

Para a realização do estudo, as duas aplicações dos valores de irradiação horária, precipitação e geração foram o cálculo do YIELD horário e a comparação das curvas de geração do sistema fotovoltaico do Escritório Verde sob diferentes condições meteorológicas horárias, de acordo com os valores de irradiação e chuva.

O primeiro dia analisado foi primeiro de outubro, um dia sem chuva e com índices altos de irradiação. A tabela 3 e figura 1 representam as condições deste dia.

Tabela 3. Condições Meteorológicas e YIELD em 1 de outubro

Hora	Irradiação Horária(kWh/m²)	Geração(kWh)	Chuva(mm)	YIELD(kWh/kWp)
08:00	0,436536667	0	0	
09:00	0,548121667	1	0	0,48
10:00	0,554801667	1	0	0,48

11:00	0,82946	1	0	0,48
12:00	0,882021667	2	0	0,95
13:00	0,889191667	1	0	0,48
14:00	0,698056667	1	0	0,48
15:00	0,419405	1	0	0,48
16:00	0,259013667	0	0	
17:00	0,078663	0	0	
18:00	0,002661867	0	0	

134

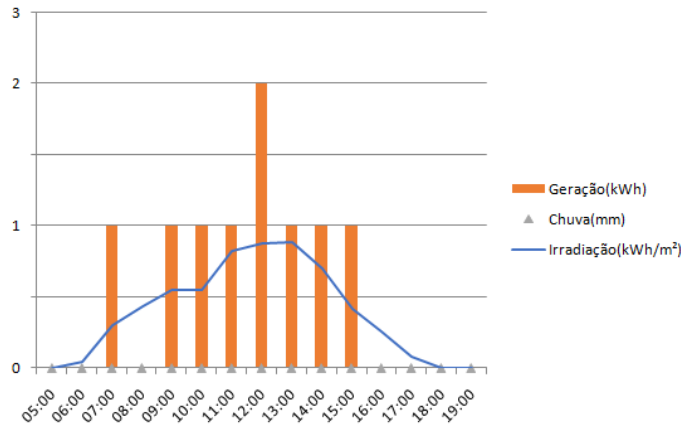


Figura 1. Geração Horária e condições meteorológicas em 1 de outubro

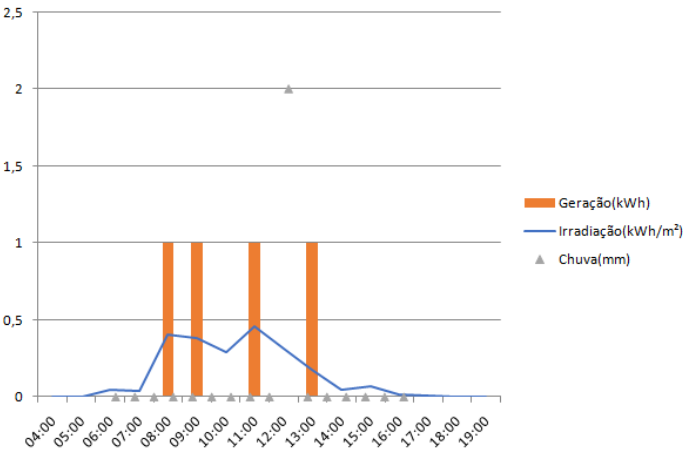
O segundo dia estudado foi 2 de outubro, um dia com chuva em uma hora específica do dia, conforme ilustrado na tabela 4 e na figura 2.

157

Tabela 4. Condições Meteorológicas e YIELD em 2 de outubro

Hora	Irradiação Horária(kWh/m²)	Geração(kWh)	Chuva(mm)	YIELD(kWh/kWp)
08:00	0,404495	1	0	0,48
09:00	0,38201	1	0	0,48
10:00	0,291101667	0	0	
11:00	0,454833333	1	0	0,48
12:00	0,311083333	0	0	
13:00	0,170681333	1	2	0,48
14:00	0,0466545	0	0	
15:00	0,069574167	0	0	
16:00	0,0160583	0	0	
17:00	0,009857983	0	0	

158



159
160

Figura 2. Geração Horária e condições meteorológicas em 2 de outubro

161
162

O terceiro dia analisado foi 3 de outubro, um dia com altos valores de precipitação em dois horários específicos do dia, conforme ilustrado na tabela 5 e na figura 3.

163
164
165

Tabela 5. Condições Meteorológicas e YIELD em 3 de outubro

Hora	Irradiação Horária(kWh/m²)	Geração(kWh)	Chuva(mm)	YIELD(kWh/kWp)
08:00	0,327983333	0	0	
09:00	0,204631	1	0	0,48
10:00	0,0287303	0	0	
11:00	0,023069017	0	0	
12:00	0,11879345	0	0	
13:00	0,421915	0	0	
14:00	0,108785833	1	0	0,48
15:00	0,393527333	0	0	
16:00	0,343611667	1	0	0,48
17:00	0,079432333	0	8,6	
18:00	0,003549833	0	8,6	

166

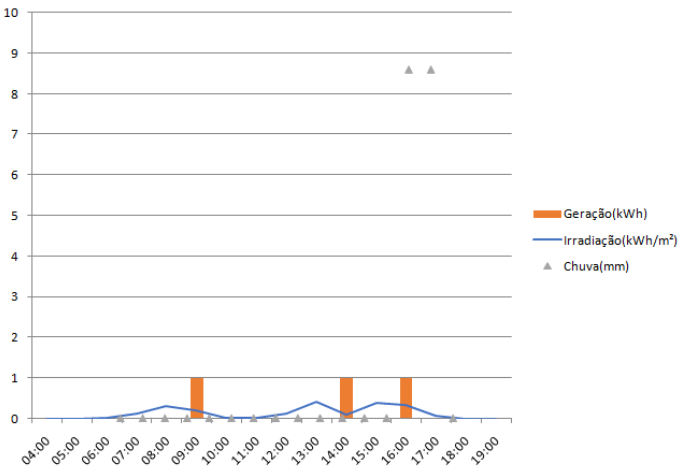


Figura 3. Geração Horária e condições meteorológicas em 3 de outubro

O quarto dia selecionado foi 6 de outubro, um dia com pequena quantidade de altura de pluviométrica no final do dia, conforme ilustrado na tabela 6 e na figura 4.

Tabela 6. Condições Meteorológicas e YIELD em 6 de outubro

Hora	Irradiação Horária(kWh/m²)	Geração(kWh)	Chuva(mm)	YIELD(kWh/kWp)
08:00	0,189605	0	0	0,48
09:00	0,26909	0	0	
10:00	0,1970255	1	0	
11:00	0,088864833	0	0	
12:00	0,0705105	0	0	
13:00	0,046897	0	0	
14:00	0,073335167	0	0	
15:00	0,048691167	0	0	
16:00	0,0580115	0	0	
17:00	0,0409985	0	0	
18:00	0,0016662	0	0,2	

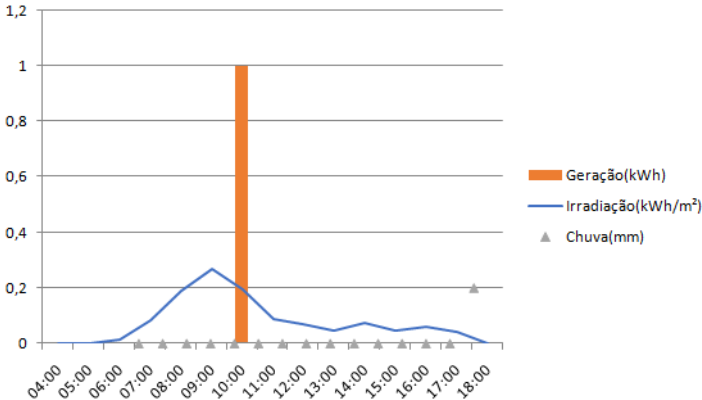


Figura 4. Geração Horária e condições meteorológicas em 6 de outubro

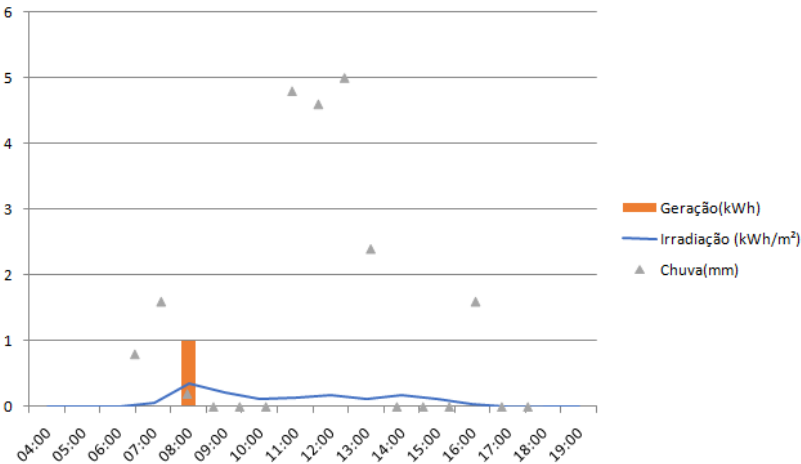
O quinto dia estudado foi 7 de outubro, um dia com baixos valores de irradiação e chuva bem distribuída durante o dia, conforme ilustrado na tabela 7 e na figura 5.

179
180

Tabela 7. Condições Meteorológicas e YIELD em 7 de outubro

Hora	Irradiação Horária(kWh/m²)	Geração(kWh)	Chuva(mm)	YIELD(kWh/kWp)
08:00	0,34258	1	0	0,48
09:00	0,208038333	0	0	
10:00	0,113558333	0	4,8	
11:00	0,1251685	0	4,6	
12:00	0,172283333	0	5	
13:00	0,112120667	0	2,4	
14:00	0,171166667	0	0	
15:00	0,110708333	0	0	
16:00	0,0304705	0	0	
17:00	0,00690215	0	1,6	
18:00	0,0008651	0	0	

181



182
183
184

Figura 5. Geração Horária e condições meteorológicas em 7 de outubro

185 **DISCUSSÃO**

186 A geração dos painéis fotovoltaicos foi relacionada às condições de irradiação e chuva.
187 A relação entre as duas condições meteorológicas na maior parte dos dias foi inversa, pois
188 houve redução da irradiação nos períodos chuvosos, fenômeno que pode ser associado ao
189 fato de que durante períodos de altos valores de precipitação podem ocorrer aumento da
190 quantidade de nuvens no céu, e consequente bloqueio da irradiação direta.

191 A análise de cada um dos dias estudados foi dividida em diferentes seções.

192
193 **01 de Outubro de 2018**

194 Os resultados obtidos ilustraram altas irradiações e baixos valores de chuva, em
195 decorrência disto houve considerável geração de energia elétrica durante o dia, assim como
196 altos valores de produtividade horária e diária. Como o esperado, este dia obteve valores
197 de geração superiores aos outros dias, sendo que o segundo dia com maior valor foi

equivalente a 37% dele e os dois dias com menores valores obtiveram valores equivalentes a 11% dele.

Os horários entre 11h e 13h obtiveram maiores valores de irradiação que a maioria dos dias analisados, sendo que a geração deste período foi superior à total diária dos outros dias estudados. Além disto, a produtividade horária obtida às 12h foi a maior encontrada de todos os dias e a produtividade diária obtida também foi superior a todas as outras encontradas durante o estudo. Com relação a diferença entre a geração dos horários entre 11h e 12h e entre 12h e 13h, houve diferença de mais de 1 °C de temperatura máxima de uma faixa de horário para a outra segundo dados de [8]. Como a temperatura é um fator meteorológico cujo aumento causa redução no desempenho do sistema e consequente redução da produção, houve diferença de 1kWh entre a energia gerada no período entre 11h e 12h e o período entre 12h e 13h.

Como o registro de geração do inversor ocorre a cada 1kWp gerado, no horário entre 08h e 09h não foi registrada geração por conta do fato de que a geração foi inferior a 1kWp.

02 de Outubro de 2018

A precipitação deste dia se concentrou em somente um horário do dia, no qual também houve geração. Tal situação pode ser explicada pelo valor da precipitação e também pelo fato de que os valores de geração do inversor são salvos em números naturais, sem decimais, o que significa que a geração do horário anterior pode ter contribuído de forma considerável para a geração de 1 kWh durante o horário de chuva. Além disto, a concentração da maior parte dos horários de geração foi nos horários com maiores valores de irradiação, que variaram entre 0,38kWh/m² e 0,45kWh/m².

Foi o segundo dia estudado com maiores valores YIELD, sendo o dia com presença de precipitação com maiores valores, e com YIELD 33,33% superior terceiro dia com maior geração.

03 de Outubro de 2018

O dia 03 obteve baixos valores de irradiação, o que pode caracterizar um dia nublado, e com alta concentração de chuva no final no dia, horários em que não houve geração, sendo que a mudança do valor de irradiação das 16h para as 17h (horário de chuva) foi considerável. Além disto, a produtividade diária obtida foi inferior ao dia 02 em decorrência da menor geração, de 1 kWh a menos.

06 de Outubro de 2018

Apesar da concentração de chuva somente no final do dia, houve grande redução nos valores de irradiação a partir do meio dia, o que pode caracterizar aumento de nebulosidade neste período. Por conta dos baixos valores de irradiação, houve somente geração de 1 kWh durante este dia, que ocorreu às 10h, segundo horário com maior irradiação do dia, posterior ao com maior valor, sendo eles respectivamente 0,197 kWh/m² e 0,27kWh/m².

O valor diário de produtividade deste dia foi um dos dois menores valores encontrados nos dias analisados, mesmo com o fato de que a precipitação foi inferior à média de altura pluviométrica usada como parâmetro. A situação pode ser explicada pelos baixos valores de irradiação durante o dia.

07 de Outubro de 2018

O dia 07 obteve um dos dois menores valores diários de produtividade, por conta do fato de que obteve geração de somente 1 kWh, que ocorreu durante o horário com maior valor de irradiação do dia, com 0,342 kWh/m², sendo nele houve ausência de chuva. Além disto, a partir das 09h foram encontrados valores de irradiação inferiores a 0,2 kWh/m² e valores de precipitação superiores a 2 mm durante o período das 10h às 13h. Mesmo após o período de chuva não houve aumento significativo dos valores de irradiação, o que fez com que não houvesse mais geração durante este dia.

CONCLUSÃO

Este artigo realizou o estudo da influência da irradiação e da precipitação na produtividade de um painel fotovoltaico instalado em Curitiba durante cinco dias de agosto de 2018.

Conforme esperado, os dias com maiores valores de irradiação diária obtiveram maiores valores de geração de energia por meio do painel fotovoltaico estudado, assim como maiores valores de produtividade nele. O primeiro dia de outubro obteve a maior geração dado ao alto valor de irradiação diária, enquanto o sexto dia de outubro obteve um dos menores valores de geração, dado ao fato de que a irradiação foi a menor dentre os dias estudados.

Com relação a influência da precipitação, nos horários em que ocorreu chuva a geração do painel fotovoltaico foi menor por conta do fato de que nestes momentos houve redução significativa de irradiação. Sendo assim, foi possível observar que a redução diária da geração relacionada a precipitação foi mais significativa quando ela se estendia por mais horários do dia do que pela intensidade da chuva.

Financiamento: Este estudo foi financiado por COPEL- Distribuição, por meio do projeto P&D da ANEEL "ANEEL PD 2866-0464/2017 - Metodologia Para Análise, Monitoramento e Gerenciamento da GD por Fontes Incentivadas"

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

Conflito de Interesse: Os Autores declaram que não há conflitos de interesse.

REFERÊNCIAS

1. Jha, A.; Tripathy, P.P.; Heat transfer modeling and performance evaluation of photovoltaic system in different seasonal and climatic conditions. *Renewable Energy* **2019**, Volume 135, pp- 856-865, ISSN 0960-1481, DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.032>>
2. REN21; Market and Industry Trends. *Renewable 2019- Global Status Report*, REN21 Secretariat: France, 2019, Volume 1, pp-94-98, ISBN <978-3-9818911-7-1>
3. Ruther, R.; . *Edifícios Solares Fotovoltaicos*. 1 ed.; LABSOLAR, UFSC.; Florianópolis, Brasil, 2004; Volume 1, pp- 08-11.

4. Mariano, J. D.; Análise do Potencial da Geração de Energia Fotovoltaica para Redução dos Picos de Demanda e Contribuição Energética nas Edificações da UTFPR em Curitiba. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
5. Silveira, C. O., Tonolo, E. A., Krasnhak, L. B., Urbantez, J.; Avaliação do Desempenho e Estudo da Viabilidade Econômica da Geração Distribuída por Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. XVII Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído, Foz do Iguaçu, Brasil, 2018.
6. Campos, M. A., Alcantara, L. D. S.; Interpretação dos Efeitos de Tempo Nublado e Chuvoso Sobre a Radiação Solar em Belém/PA Para Uso em Sistemas Fotovoltaicos. *Revista Brasileira de Meteorologia* **2016**, Volume 31, pp. 570-579, DOI: < <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786312314b20150065>>
7. Instituto de Águas Paraná. Disponível online: <http://www.aguasparana.pr.gov.br/pagina-264.html> (acessado em 09/09/2019)
8. INMET- Estações Convencionais. Disponível online: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas> (acessado em 09/09/2019).



© 2018 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).