

Article

# Estimativa de Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede em diferentes regiões no Paraná

Camila de Oliveira Silveira<sup>1\*</sup>

<https://orcid.org/0000-0002-6391-5211>

Jair Urbanetz Junior<sup>1\*</sup>

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

<sup>1</sup>LABENS, PPGSE, UTFPR, Curitiba, Brasil

Associate Editor:

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

\* [camila.osilveira@hotmail.com](mailto:camila.osilveira@hotmail.com); Tel.: +55-41-999726294 (C.O.S.)  
[urbanetz@utfpr.edu.br](mailto:urbanetz@utfpr.edu.br); Tel.: +55-41-998335729 (J.U.J.)

## HIGHLIGHTS

- A geração de energia solar fotovoltaica é proporcional à irradiação solar na localidade onde o sistema se encontra instalado.
- Os índices de mérito podem oscilar dependendo da estação do ano.
- O desempenho de um sistema fotovoltaico varia de acordo com a tecnologia de célula fotovoltaica utilizada.

**Resumo:** Os processos de instalação e comissionamento de plantas fotovoltaicas estão atrelados à expectativa de geração de energia e ao desempenho do sistema por meio dos índices de mérito. A viabilidade do projeto pode ser confirmada quando os resultados desses índices são satisfatórios e correspondem com médias obtidas de pesquisas já consolidadas. Em 2019 foram instalados sistemas fotovoltaicos em seis câmpus distintos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná nas cidades de Curitiba, Campo Mourão, Cornélio Procopio, Medianeira, Pato Branco e Ponta Grossa. Este estudo apresenta expectativas de geração e desempenho coerentes à de estudos anteriores e irá contribuir para o avanço científico sobre o comportamento de sistemas com diferentes tecnologias localizados em regiões distintas no estado.

**Palavras-chave:** sistemas fotovoltaicos; geração de energia fotovoltaica; células fotovoltaicas; índices de mérito.

## INTRODUÇÃO

Em função do grande aproveitamento do potencial solar para geração de eletricidade e a crescente expansão da indústria fotovoltaica no mercado mundial, o dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR) depende do conhecimento das características das células fotovoltaicas, possibilitando o comissionamento e a detecção de erros a fim de aumentar a confiabilidade do sistema [1].

Os índices de eficiência de conversão de energia de uma célula fotovoltaica têm grande relevância em análises de desempenho de um SFVCR. Entretanto as perdas que ocorrem durante este processo de conversão, especialmente as causadas por temperatura, impactam significativamente nos resultados obtidos. Os módulos de silício cristalino estão sujeitos a apresentar um menor desempenho quando expostos a uma temperatura ambiente superior à 25 °C, entretanto, as tecnologias de filmes finos são menos suscetíveis a esta situação [2].

Neste contexto, a geração de energia de um SFVCR está intimamente relacionada às condições de instalação do sistema, capacidade instalada e tecnologia por qual os módulos fotovoltaicos são compostos. Em parceria com a Companhia Paranaense de Energia (COPEL), o Laboratório de Energia Solar (LABENS) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) foi incumbido de projetar e analisar o desempenho de sistemas fotovoltaicos implantados em seis câmpus da UTFPR, permitindo determinar as suas respectivas funcionalidades e comparar o comportamento das tecnologias instaladas. Nesta primeira análise, será feita uma estimativa do potencial fotovoltaico por meio de índices de mérito.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Cada sistema fotovoltaico é composto por quatro tecnologias de células fotovoltaicas, a saber: silício monocristalino (m-Si); silício policristalino (p-Si); disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS); e telureto de cádmio (CdTe). As potências instaladas de cada tecnologia estão definidas na Tabela 1, resultando em um total 13,1 kWp de potência para o sistema.

**Tabela 1.** Potência instalada de cada tecnologia.

|                    | <b>Tecnologia</b> | <b>Potência instalada</b> |
|--------------------|-------------------|---------------------------|
| Silício cristalino | m-Si              | 5,11 kWp                  |
|                    | p-Si              | 4,69 kWp                  |
| Filmes Finos       | CIGS              | 1,68 kWp                  |
|                    | CdTe              | 1,53 kWp                  |

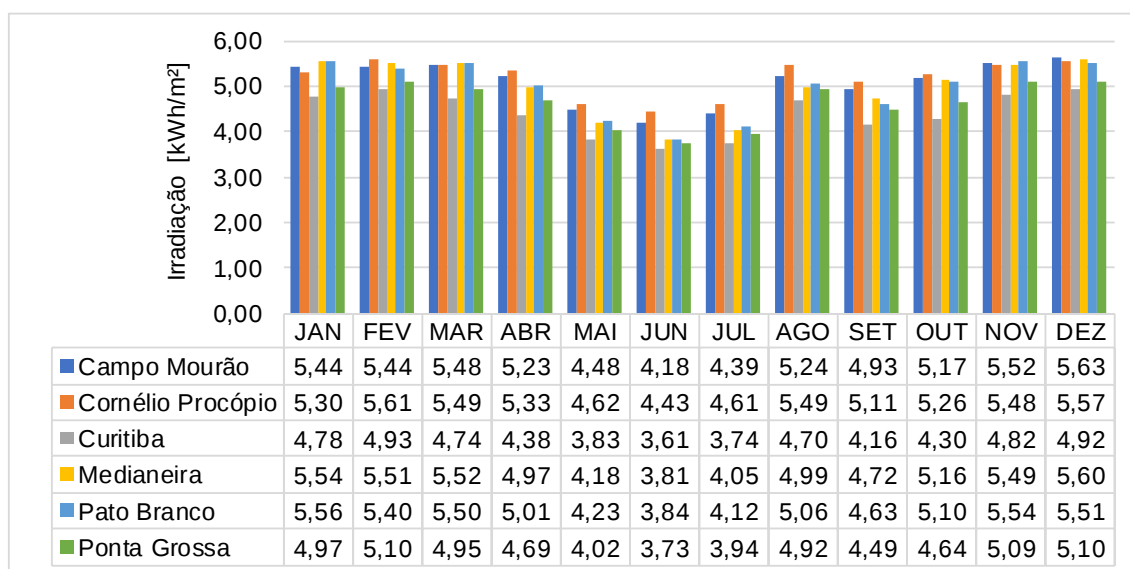
Os SFVCR foram instalados seguindo as condições ótimas descritas em [3], com os módulos fotovoltaicos orientados ao norte geográfico e ângulo de inclinação correspondente à latitude da localidade de instalação, cujos valores estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Latitude das cidades onde estão instalados os SFVCR.

| <b>Cidade</b>     | <b>Latitude</b> |
|-------------------|-----------------|
| Campo Mourão      | 24,06° S        |
| Cornélio Procópio | 23,19° S        |
| Curitiba          | 25,44° S        |
| Medianeira        | 25,30° S        |
| Pato Branco       | 26,20° S        |
| Ponta Grossa      | 25,05° S        |

Nesta primeira análise, será realizada uma expectativa de desempenho dos SFVCR utilizando-se de estudos desenvolvidos por [4] de outro sistema que se encontra em operação desde 29 de fevereiro de 2016 na UTFPR Câmpus Curitiba – Sede Neville. Com potência instalada total de 10,2 kWp, o sistema é constituído por 34 módulos de silício policristalino de 300 Wp. Instalado na cobertura da edificação e ocupando uma área de aproximadamente 68 m<sup>2</sup>, este foi o segundo SFVCR implantado na UTFPR Câmpus Curitiba. Os painéis foram instalados com as condições ótimas, orientados para o norte geográfico com desvio azimutal de 0° e com inclinação igual a 25°, cujo valor representa a latitude da cidade de Curitiba [5].

Para realizar a análise de desempenho dos SFVCR, é necessário realizar a aquisição de dados de irradiação disponível no local. Nesta análise inicial, será utilizado o Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná [2] por meio do mapa interativo disponibilizado gratuitamente em seu portal, o qual contém dados históricos de irradiação das cidades onde foram instalados os SFVCR. Os valores de irradiação no plano inclinado da latitude que serão considerados para os câmpus de Campo Mourão, Cornélio Procópio, Curitiba, Medianeira, Pato Branco e Ponta Grossa estão apresentados no Gráfico 1.



**Gráfico 1.** Irradiação média mensal no plano inclinado da latitude.

Concomitante à aquisição de dados de irradiação, é necessário coletar os dados de geração de energia dos SFVCR para realizar a análise de desempenho. Neste estudo, a geração de energia será estimada por meio da Equação 1,

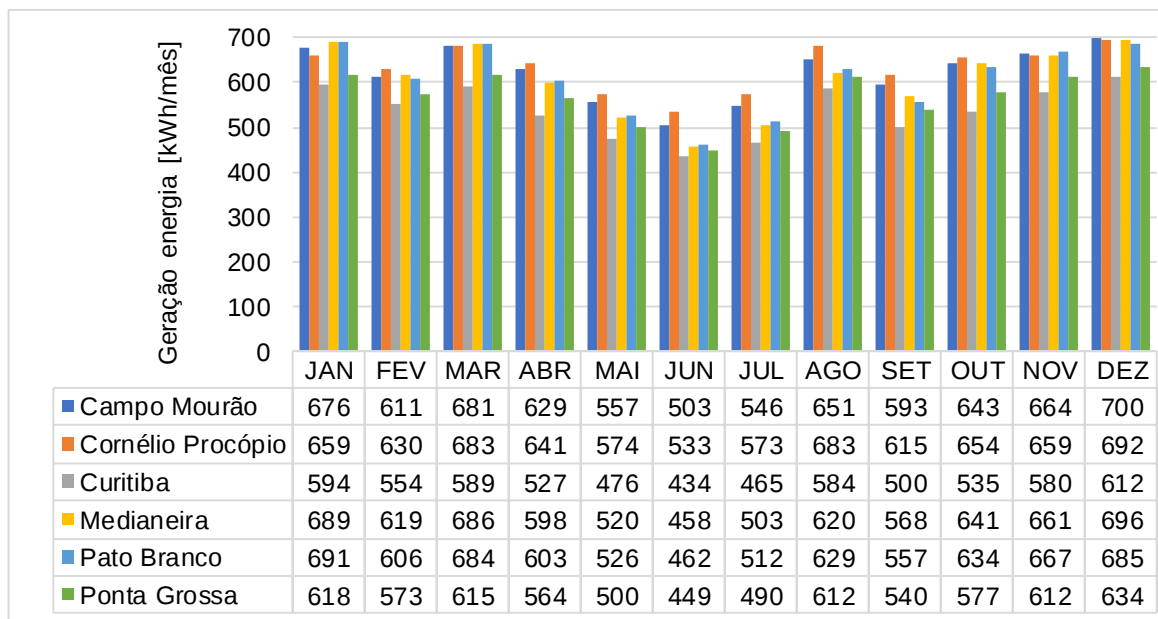
$$E = \frac{P_{FV} \cdot H_{tot} \cdot PR}{G} \quad (1)$$

onde:

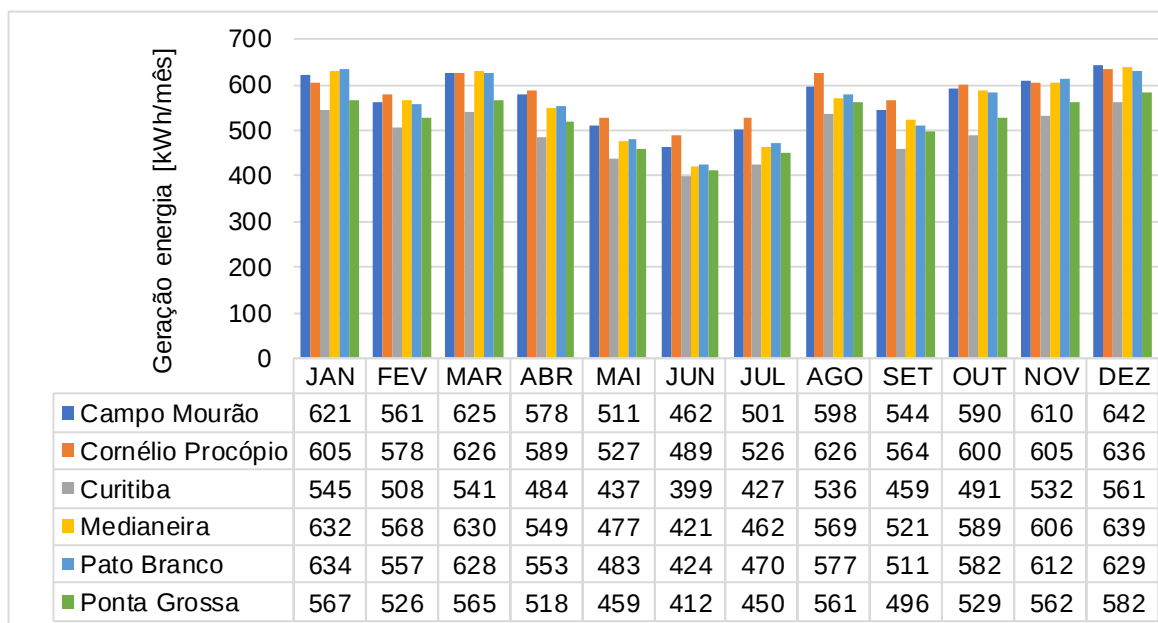
- E = energia gerada [kWh];
- $P_{FV}$  = potência instalada do SFVCR [kWp];
- $H_{tot}$  = irradiação total em um dia [kWh/m<sup>2</sup>];
- PR = *performance ratio* ou taxa de desempenho;
- G = irradiância solar de 1 kWp/m<sup>2</sup>.

De acordo com [4], a taxa de desempenho média do SFVCR em operação na Sede Neville é de 78,48%, cujo valor foi adotado como referência para a análise de estimativa de geração de energia nesta análise. Os Gráficos 2-5 apresentam a previsão mensal de

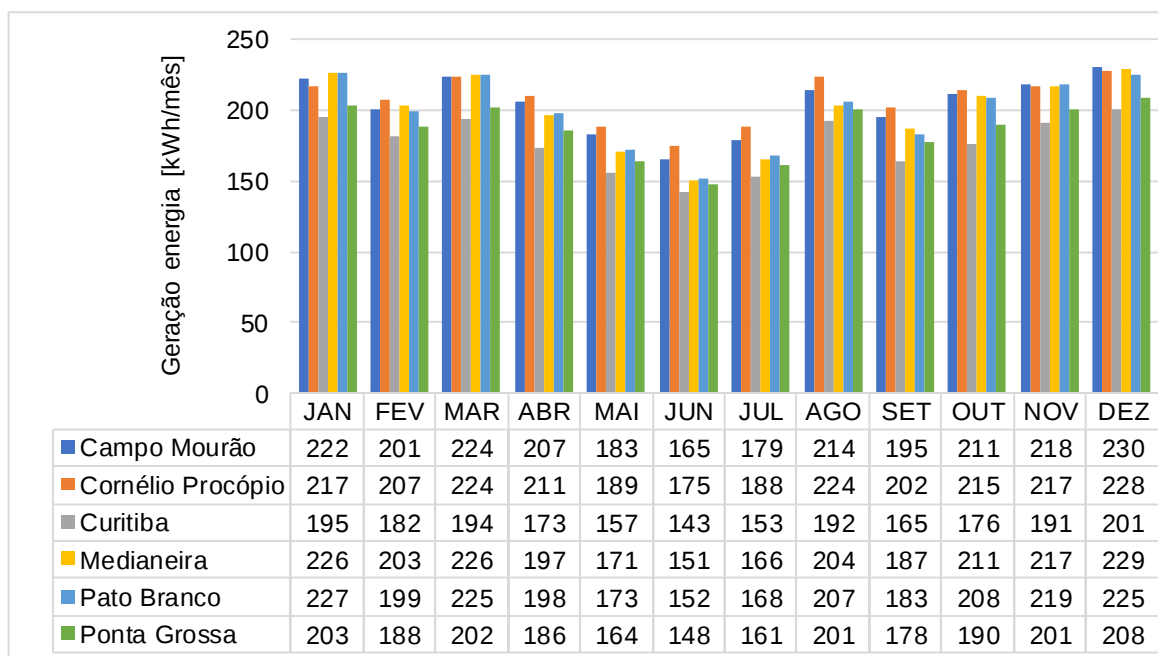
energia gerada de acordo com os índices de irradiação de cada localidade para as tecnologias de m-Si, p-Si, CIGS e CdTe, nesta ordem.



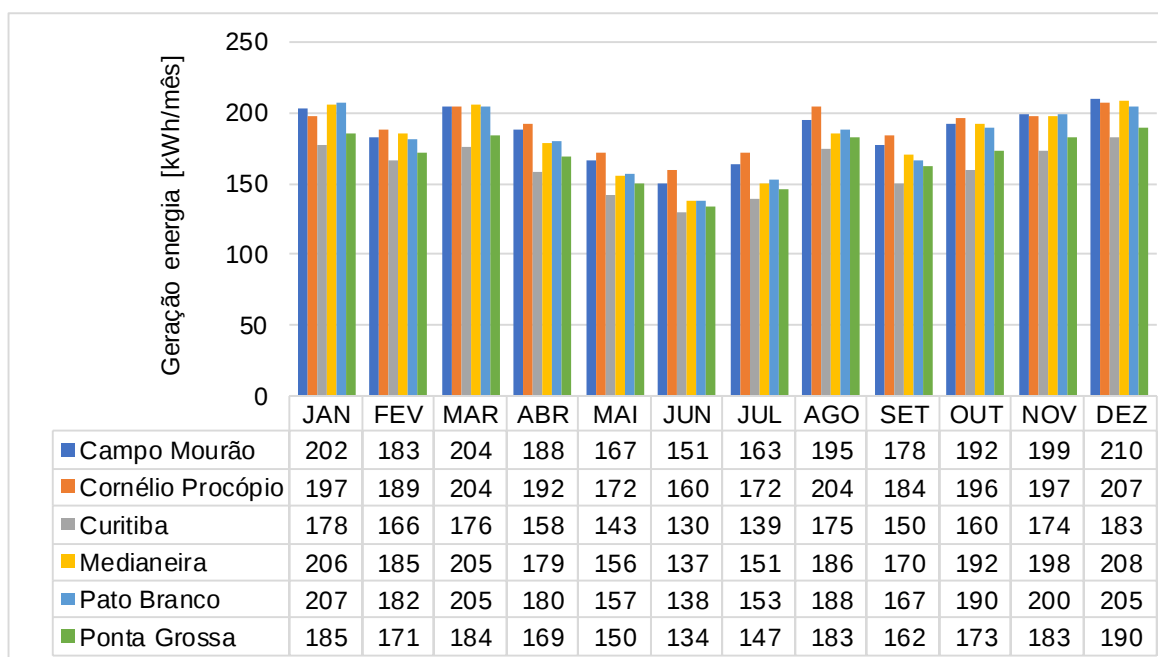
**Gráfico 2.** Geração de energia estimada para a tecnologia de m-Si.



**Gráfico 3.** Geração de energia estimada para a tecnologia de p-Si.



**Gráfico 4.** Geração de energia estimada para a tecnologia de CIGS.



**Gráfico 5.** Geração de energia estimada para a tecnologia de CdTe.

A partir das considerações adotadas e dos cálculos para estimar os valores mensais de geração de energia elétrica de cada tecnologia nos seis campus, é possível obter a partir dos índices de mérito, o desempenho esperado dos SFVCR instalados na universidade.

Os índices considerados nesta análise classificam-se em: Fator de Capacidade, Produtividade e Taxa de Desempenho e podem ser calculados conforme as Equações 2-4, respectivamente.

$$\text{Fator de Capacidade} = \frac{\text{energia gerada}}{\text{potência nominal} \cdot \text{tempo}} \quad (2)$$

$$\text{Produtividade} = \frac{\text{energia gerada}}{\text{potência instalada}} \quad (3)$$

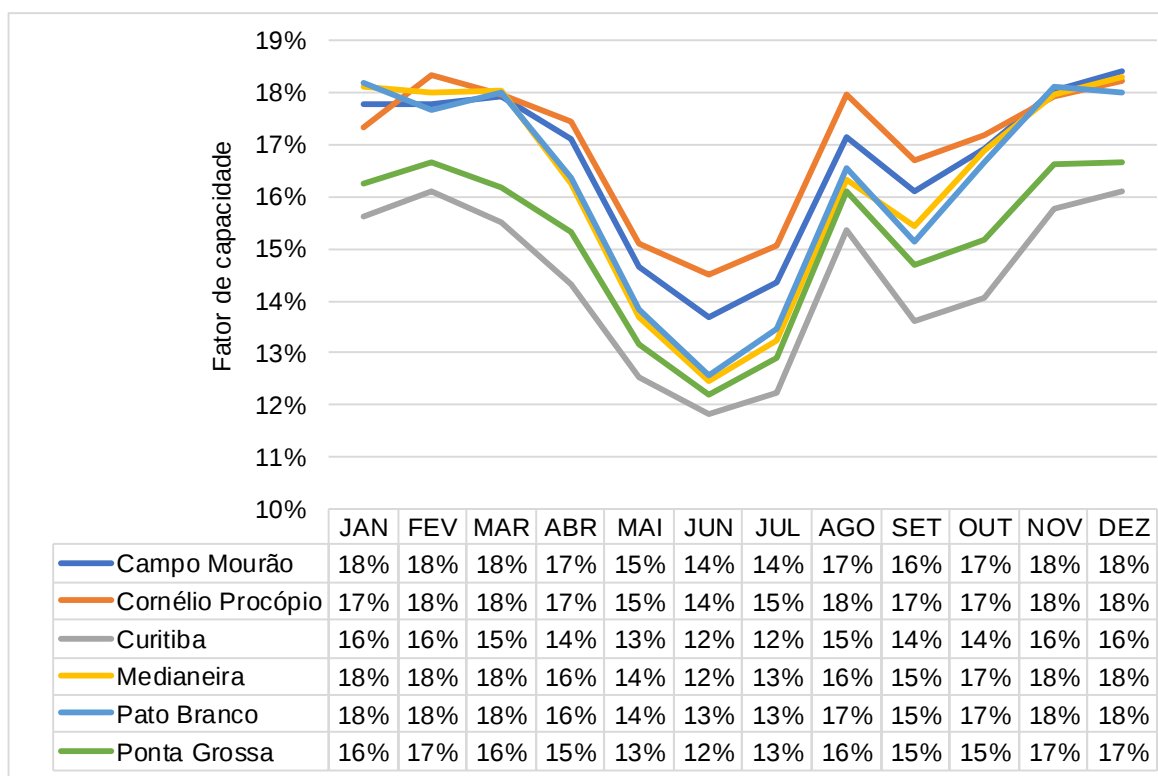
$$\text{Taxa de Desempenho} = \frac{\text{produtividade}}{\text{irradiação}/1000} \quad (4)$$

O fator de capacidade permite avaliar a quantidade de energia que o sistema poderia gerar caso operasse com a sua potência nominal de forma contínua. Já a produtividade revela, de forma normalizada, a real produção de energia elétrica do sistema. Por fim, a taxa de desempenho determina o percentual de conversão de energia solar em energia elétrica, já considerando as perdas ocorridas neste processo [6].

## RESULTADOS

Com os índices de irradiação estabelecidos e a previsão de geração de energia calculada, foi possível estimar os índices de mérito para analisar o desempenho dos SFVCR nos seis câmpus da UTFPR. É válido ressaltar que a taxa de desempenho não foi estimada, visto que envolve diversas perdas devido à sombreamento, sujidade, inversor, temperatura, entre outros fatores que não foram mensurados e não serão avaliados nesta análise da pesquisa. A taxa de desempenho de 78,48% atribuída na metodologia serviu de base para estimar os fatores de capacidade e as produtividades dos SFVCR em questão.

As estimativas da análise mensal e da média anual dos fatores de capacidade dos SFVCR estão representadas no Gráfico 6 e na Tabela 3, respectivamente.

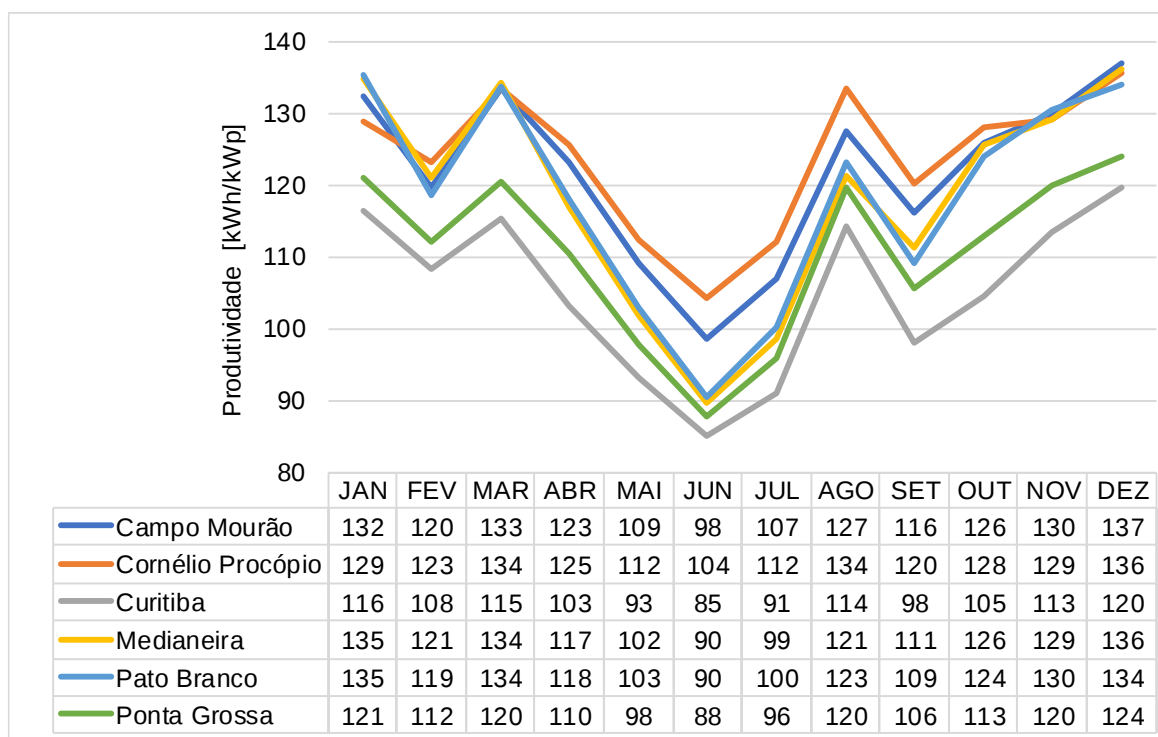


**Gráfico 6.** Estimativa da média mensal dos fatores de capacidade.

**Tabela 3.** Estimativa da média anual dos fatores de capacidade.

| <b>Campo Mourão</b> | <b>Cornélio Procópio</b> | <b>Curitiba</b> | <b>Medianeira</b> | <b>Pato Branco</b> | <b>Ponta Grossa</b> |
|---------------------|--------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| 17%                 | 17%                      | 14%             | 16%               | 16%                | 15%                 |

As estimativas da análise mensal e do total anual das produtividades dos SFVCR estão representadas no Gráfico 7 e na Tabela 4, respectivamente.

**Gráfico 7.** Estimativa das produtividades médias mensais.**Tabela 4.** Estimativa das produtividades anuais (kWh/kWp).

| <b>Campo Mourão</b> | <b>Cornélio Procópio</b> | <b>Curitiba</b> | <b>Medianeira</b> | <b>Pato Branco</b> | <b>Ponta Grossa</b> |
|---------------------|--------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| 1.459               | 1.487                    | 1.262           | 1.421             | 1.420              | 1.328               |

Esta análise de desempenho não considerou os índices de mérito de cada tecnologia, isto é, o SFVCR foi avaliado como um todo. Ao atribuir um valor fixo para a taxa de desempenho, os coeficientes de temperatura em relação à potência nominal das diferentes tecnologias de células apresentados na Tabela 5 [7-10] foram desprezados.

**Tabela 5.** Coeficiente da temperatura em relação à potência nominal da célula fotovoltaica.

| <b>m-Si</b> | <b>p-Si</b> | <b>CIGS</b> | <b>CdTe</b> |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| -0,39%/°C   | -0,40%/°C   | -0,32%/°C   | -0,25%/°C   |

Também é válido mencionar que as perdas associadas à porcentagem de 78,48% não devem ser as mesmas para os seis SFVCR em operação. Para uma análise mais profunda, seria necessário estimar a taxa de desempenho de cada SFVCR estudado.

## DISCUSSÃO

Em uma análise mensal, o fator de capacidade apresenta uma variação estimada em 12% a 18%, além da predominância de níveis mais altos em meses de verão devido ao maior nível de irradiação solar nesta época do ano. Em uma análise anual, a menor média calculada corresponde à cidade de Curitiba, a qual apresentou fator de capacidade semelhante ao de estudos de [4], equivalente à 13,92%. Este fato evidencia que a previsão dos fatores de capacidade para as demais cidades pode ser considerada adequada.

A previsão da produtividade anual estimou valores ligeiramente superiores aos apresentados por [2]. Além disso, há uma diferença de aproximadamente 38 kWh/kWp entre a produtividade prevista e a produtividade calculada por [4] em Curitiba. Em uma análise mensal, a redução deste índice acontece à medida que se aproximam os meses de inverno, sobretudo em junho, devido aos menores índices de irradiação no local. Os picos apresentados no mês de agosto tanto para o fator de capacidade quanto para a produtividade ressaltam que os parâmetros de irradiação e de geração de energia estão atrelados, pois ambos apresentaram uma elevação nesta época.

Ao contrário dos fatores de capacidade e das produtividades, as taxas de desempenho devem ser maiores em meses de inverno, em que a incidência solar é menor. Este fato também deve estar relacionado com a diminuição da temperatura ambiente e das células fotovoltaicas nesta época, ocorrendo menores perdas de eficiência por temperatura.

Em relação ao desempenho de cada tecnologia, as potências instaladas de m-Si e p-Si são cerca de três vezes maiores quando comparada às outras tecnologias e, conseqüentemente, a estimativa de produção de energia apresentou resultados superiores principalmente em janeiro, mês de maior incidência solar. As perdas ocorridas por temperatura em células de m-Si são elevadas nesse tipo de tecnologia ( $-0,39\%/^{\circ}\text{C}$ , conforme Tabela 5). Por outro lado, as células de filmes finos, mais especificamente as de CdTe, apresentaram as menores perdas quando comparada as demais tecnologias ( $-0,25\%/^{\circ}\text{C}$ , conforme Tabela 5). Este cenário evidencia que apesar do CdTe apresentar a menor previsão de geração de energia devido à menor potência instalada, esta tecnologia poderá apresentar resultados superiores de desempenho, seguido da tecnologia de CIGS, m-Si e p-Si.

## CONCLUSÃO

A coleta de dados de irradiação do Atlas de Energia Solar do Paraná possibilitou o cálculo da expectativa de geração de energia dos SFVCR, bem como seus respectivos desempenhos. Evidenciou-se a viabilidade da estimativa de desempenho do SFVCR em estudo neste trabalho, uma vez que os índices previstos estão próximos dos valores reais de outro sistema que opera com características semelhantes.

Em uma análise futura, será possível confrontar os resultados estimados com os obtidos, além de estabelecer os índices de mérito para cada tecnologia presente no sistema fotovoltaico em diferentes regiões do Paraná, visto que todos os parâmetros serão medidos em tempo real.

**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

1. Zilles, R.; Macêdo, W. N.; Galhardo, M. A. B.; Oliveira, S. H. F. *Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica*, 1 ed.; Oficina de Textos: São Paulo, 2012.
2. Tiepolo, G.; Pereira, E.; Urbanetz Junior, J.; Pereira, S.; Gonçalves, A.; Lima, F.; Costa, R.; Alves, A. *Atlas de energia solar do Estado do Paraná*, 1 ed.; Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: São José dos Campos, Brasil, 2017; pp. 10-84.
3. Pinho, J. T.; Galdino, M. A. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*, 1 ed.; CEPTEL/CRESESB: Rio de Janeiro, 2014.
4. Silveira, C. O.; Tonolo, E. A.; Krasnhak, L. B.; Urbanetz Junior, J. Acompanhamento de desempenho e contribuição da capacidade instalada de SFVCR frente ao panorama nacional. In: *XXII Congresso Brasileiro de Automática*, **2018**, 01-08.
5. Urbanetz Junior, J.; Tiepolo G. M.; Casagrande Junior, E. F.; Tonin F. S.; Mariano, J. D. Geração distribuída fotovoltaica: o caso dos sistemas fotovoltaicos da UTFPR em Curitiba. *X CBPE 2016*, 01-13.
6. Benedito, R. S. Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório. Mestrado em Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
7. Hanwha Q CELLS. Módulo Solar Q.Antum, 2018. Disponível em: <[https://www.q-cells.com/dam/jcr:bc0a8e73-6ef6-4e27-8992-a51364025156/Hanwha\\_Q\\_CELLS\\_Data\\_sheet\\_QPEAK\\_L-G5.0.G\\_355-370\\_2018-06\\_Rev02\\_AU.pdf](https://www.q-cells.com/dam/jcr:bc0a8e73-6ef6-4e27-8992-a51364025156/Hanwha_Q_CELLS_Data_sheet_QPEAK_L-G5.0.G_355-370_2018-06_Rev02_AU.pdf)>. Acesso em: 14 set. 2019.
8. Hanwha Q CELLS. Módulo Solar Q.Antum, 2018. Disponível em: <[https://www.q-cells.com/dam/jcr:f391e618-7f78-4d84-a071-d59b76897025/Hanwha\\_Q\\_CELLS\\_Data\\_sheet\\_QPOWER\\_L-G5\\_315-335\\_Global\\_2017-08\\_Rev02\\_EN.pdf](https://www.q-cells.com/dam/jcr:f391e618-7f78-4d84-a071-d59b76897025/Hanwha_Q_CELLS_Data_sheet_QPOWER_L-G5_315-335_Global_2017-08_Rev02_EN.pdf)>. Acesso em: 14 set. 2019.
9. Solibro GMBH. CdTe thin film solar module CX3, 2013. Disponível em: <[https://solibro-solar.com/fileadmin/image/05\\_News\\_Downloads/Downloads/Data\\_sheets/G2.3/Solibro\\_Datenblatt\\_SL2-F\\_G2-3\\_2017-12\\_Rev01\\_EN.pdf](https://solibro-solar.com/fileadmin/image/05_News_Downloads/Downloads/Data_sheets/G2.3/Solibro_Datenblatt_SL2-F_G2-3_2017-12_Rev01_EN.pdf)>. Acesso em: 14 set. 2019.
10. Calyxo GMBH. CdTe thin film solar module CX3, 2013. Disponível em: <[http://www.go-pure.eu/download/datenblatt\\_CX3\\_eng\\_85.pdf](http://www.go-pure.eu/download/datenblatt_CX3_eng_85.pdf)>. Acesso em: 14 set. 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/>).