

Análise dos Parâmetros de Desempenho de SFVCR instalados no estado do Paraná

Diego Piazza Hilgert^{1*}

<https://orcid.org/0000-0001-5596-2037>

Ana Carla Cordeiro^{1*}

<https://orcid.org/0000-0001-8718-2764>

Nicole Polityto Cremasco^{1*}

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

Renata Lautert Yang^{1*}

<https://orcid.org/0000-0002-1867-229X>

Camila de Oliveira Silveira^{1*}

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

Jair Urbanetz Junior^{1*}

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

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil;

Associate Editor:

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

* diegoph86@gmail.com; Tel.: +55-41-999149054 (D.P.H.)
anacarlacordeiro_utfpr@hotmail.com; Tel.: +55-41-998452319 (A.C.C.)
nicnicolecrem@gmail.com; Tel.: +55-41-997464124 (N.P.C.)
relautert@gmail.com; Tel.: +55-41-996950786 (R.L.Y.)
camila.osilveira@hotmail.com; Tel.: +55-41-999726294 (C.O.S.)
urbanetz@utfpr.edu.br; Tel.: +55-41-998335729 (J.U.J.)

Correspondência: diegoph86@gmail.com; Tel.: +55-41-999149054 (D.P.H.)

- Estudo comparativo de operação de oito casos reais de sistemas instalados em diversas cidades do Paraná.
- Os valores das médias anuais dos índices de mérito dos sistemas que possuem mais meses de operação convergem para os valores estimados pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná.
- Foi possível identificar as cidades que apresentaram os maiores índices de mérito.

Resumo: Com o desenvolvimento das energias renováveis no mundo, há aumento também da energia solar fotovoltaica de forma global. No Brasil, e no estado do Paraná, há

crescimento exponencial desta forma de geração de energia, o que torna necessário o estudo a respeito do desempenho dos sistemas instalados. Sendo assim, este artigo analisou oito sistemas fotovoltaicos instalados no estado do Paraná sob o aspecto dos parâmetros de desempenho, por meio dos cálculos de produtividade, de performance e de fator de capacidade. Além disto, os valores calculados foram comparados aos valores estimados pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná. As maiores diferenças médias de produtividade, entre os cálculos e o Atlas, foram encontradas nas cidades de Cascavel, enquanto as menores foram observadas em Goioerê.

Palavras Chaves: energia renovável; sistemas fotovoltaicos conectados à rede; parâmetros de desempenho;

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento mundial da energia renovável está em crescente aumento, como resultado da preocupação com os efeitos da utilização de fontes convencionais de geração de energia e da demanda por fontes de energia limpas e mais eficientes. Dentro desse contexto, uma das fontes renováveis mais utilizadas é a energia fotovoltaica, obtida a partir da radiação solar [1-2].

Como resultado, o emprego da energia fotovoltaica está aumentando, tornando-se sendo a fonte de energia que mais cresceu em 2018 no mundo, com um aumento de mais de 100 GW. Seguindo a tendência mundial, há também o crescimento do emprego desta forma de geração de energia na América Latina, principalmente devido às políticas favoráveis e a abundância de recursos solares [3].

No Brasil, o uso de energia fotovoltaica começou a crescer mais fortemente em 2012, enquanto em escala global esse crescimento começou em 2006. Esse fato, pode estar relacionado à resolução normativa número 482 de 2012, que possibilitou a utilização de micro e minigeração para pequenos consumidores residenciais e grandes fabricantes. Antes disso, a utilização da geração fotovoltaica era apenas em grandes usinas de geração e nas universidades, onde eram utilizadas para estudo [4]. A resolução normativa número 482 também criou o “Sistema de Compensação de Energia Elétrica”, em que os consumidores têm a possibilidade de injetar o excedente de energia gerada na rede da concessionária e consumir a energia da rede em horários em que não há produção própria [5].

Devido a esse fato, a instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR) vem crescendo exponencialmente no Brasil, incluindo o Paraná [6]. O monitoramento desses sistemas é importante para garantir seu bom funcionamento e estudar seu desempenho. Assim, este artigo analisará os parâmetros de desempenho de oito SFVCR instalados no Estado do Paraná.

MATERIAL E MÉTODOS

Para análise dos dados, foram escolhidos oito SFVCR instalados no oeste do Paraná nas cidades de Cascavel, Goioerê, Ubatã e Rancho Alegre d'Oeste. Estes sistemas foram escolhidos devido à disponibilidade de acesso aos seus dados. Cada um desses sistemas possui uma particularidade, pois possuem diferentes potências instaladas. Além disso, no que diz respeito ao modo de instalação, nem todos estão instalados em condições ideais, na qual os painéis devem ser instalados voltados para o norte e inclinados no mesmo ângulo da latitude do local. Outro ponto importante, é que os oito sistemas não têm o mesmo tempo de atividade, portanto, os cálculos levarão de um a doze meses, dependendo do sistema.

Para avaliar os sistemas são necessários índices de mérito para analisar a operação e explorar as diferenças entre cada uma das instalações. Este tipo de ferramenta permite comparar sistemas, mesmo estando localizados em locais diferentes e com potências nominais distintas [7].

A Produtividade ou *Yield* (YF) é outro índice de mérito que compara a energia real gerada entre sistemas por meio de parâmetros normalizados, ou seja, é possível visualizar qual é o sistema mais produtivo em termos de uma unidade de potência instalada [7]. Na Equação 1 é observado como é calculado o YF, expresso em quilowatt-hora por pico de quilowatt.

$$YF = \frac{\text{energia gerada}}{\text{potência instalada}} \quad (1)$$

A *Performance Ratio* (PR) configura a energia solar disponível no plano do painel fotovoltaico que será convertida em eletricidade. Este índice considera as perdas no processo de conversão, como inversores, tecnologia de células, sombreamento, sujeira e outros nem sempre mensuráveis. O PR pode ser calculado de acordo com a Equação 2 e é expresso em porcentagem [7]

$$PR = \frac{YF}{\text{irradiação}/1000} \quad (2)$$

Por fim, o Fator de Capacidade (FC) é um índice que mostra a quantidade de energia que pode ser gerada se o sistema operar com sua potência nominal durante todo o tempo. No Brasil, o FC para SFVCR é correspondente a aproximadamente 13 % a 18 % [7]. O FC pode ser calculado conforme a Equação 3, e é expresso em porcentagem.

$$FC = \frac{\text{energia gerada}}{\text{potência nominal} * \text{tempo}} \quad (3)$$

Os dados de geração necessários para o cálculo das fórmulas 1, 2 e 3 foram obtidos através dos sistemas de monitoramento remoto dos SFVCR. Os inversores dos sistemas são de distintos fabricantes (Fronius, ABB, Refusol e SMA). Porém, todos estes contam com sistema de monitoramento, onde é possível verificar *online* diversos dados do sistema, tanto em tempo real como dados históricos, como tensão CC, tensão CA, corrente, potência de geração, entre outros.

Neste estudo foram utilizados os valores de geração mensal de cada um dos sistemas para se realizar o cálculo dos índices de mérito descritos previamente. Os valores de geração mensal para cada um dos sistemas são referentes ao período de agosto de 2018 a julho de 2019 e podem ser observados na Tabela 1a e na Tabela 1b. As células em branco destas tabelas significam que não há dados mensais disponíveis para o determinado SFVCR. Estas mesmas tabelas também apresentam a potência instalada em cada sistema, sendo que a potência total em Cascavel foi de 21,76 kWp, em Goiorê 25,67 kWp, em Rancho Alegre D'Oeste 6,03 kWp e em Ubatã 3,35 kWp.

Tabela 1a. Geração Mensal – Janeiro a Junho (kWh)

Cidade	Potência (kWp)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Cascavel	3,52	0,42	0,41	0,35	0,48	0,39	0,26
Cascavel	18,24	2,44	2,03	1,97	1,64	1,18	1,14
Goioerê	7,92						0,74
Goioerê	6,03				0,67	0,56	0,59
Goioerê	3,685						0,37
Goioerê	8,04						
Rancho Alegre D'Oeste	6,03	0,89	0,74	0,81	0,65	0,53	0,57
Ubatã	3,35						0,28

113

114

Tabela 1b. Geração Mensal – Julho a Dezembro (kWh)

Cidade	Potência (kWp)	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cascavel	3,52	0,33	0,39	0,37	0,32		0,39
Cascavel	18,24	1,62	1,82	1,89	1,76	2,64	2,95
Goioerê	7,92	0,73					
Goioerê	6,03	0,61					
Goioerê	3,685	0,38					
Goioerê	8,04	0,76					
Rancho Alegre D'Oeste	6,03	0,56					0,81
Ubiratã	3,35	0,29					

115

116 Na comparação com a expectativa de geração do sistema o valor do PR adotado foi de
 117 75%, seguindo a porcentagem adotada no Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná [8].
 118 Assim, os dados de irradiação no plano inclinado e o valor de produtividade esperado por
 119 kWp retirados dos dados disponíveis no referente Atlas [8] são dispostos na tabela 2 e na
 120 tabela 3, respectivamente.

121

122

Tabela 2. Irradiação no Plano Inclinado por Cidade(kWh/m².dia) [8]

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cascavel	5,5	5,3	5,4	5,1	4,3	4,0	4,2	5,2	4,8	5,1	5,4	5,5
Goioerê	5,5	5,5	5,6	5,2	4,4	4,1	4,3	5,2	4,9	5,2	5,5	5,7
Rancho Alegre D'Oeste	5,5	5,5	5,5	5,2	4,4	4,1	4,3	5,2	4,9	5,2	5,6	5,6
Ubiratã	5,6	5,3	5,5	5,2	4,4	4,1	4,2	5,2	4,9	5,1	5,5	5,6

123

124

Tabela 3. Expectativa de Produtividade por Cidade[8]

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cascavel	128	111	125	114	99	90	97	120	107	118	122	128
Goioerê	128	115	128	117	103	92	100	120	110	122	125	131
Rancho Alegre D'Oeste	129	116	130	118	103	92	100	121	111	122	125	131
Ubiratã	131	111	129	117	103	91	98	120	110	119	124	131

125

126

127

128

129 RESULTADOS E DISCUSSÕES

130 Antes de se iniciar a comparação dos SFVCR, vale destacar que para o cálculo dos
 131 índices de mérito não foram considerados os dados atmosféricos dos meses de geração,

mas sim a média dada pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná [8]. Também não foram feitos ajustes de acordo com a inclinação e orientação dos sistemas. Optou-se por esta estratégia justamente para se observar o comportamento dos painéis fotovoltaicos nas mais diversas situações em comparação com os valores médios projetados.

De posse dos valores apresentados na tabela 1.a e na tabela 1.b, calculou-se a produtividade (kWh/kWp) mês a mês dos sistemas instalados, conforme indicado na tabela 4.

Tabela 4. Produtividade (*Yield*) (kWh/kWp)

Cidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cascavel	119	117	100	135	111	73	93	112	105	91	0	111
Cascavel	134	111	108	90	65	62	89	100	103	97	145	162
Goioerê						93	92					
Goioerê				112	93	98	101					
Goioerê						100	102					
Goioerê							95					
Rancho Alegre D'Oeste	147	122	134	108	89	95	93					135
Ubiratã						85	88					

Os valores de produtividade calculados foram comparados com os valores de produtividade esperados, de acordo com os dados mensais de irradiação do Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná [8], chegando-se à tabela 5. A tabela 5 apresenta o valor percentual da divisão do valor gerado de fato e o valor esperado. Assim, valores acima de 100% significam que o sistema gerou mais que o esperado para aquele mês, analogamente, valores abaixo de 100% significam uma geração inferior ao esperado.

Tabela 5. Comparativo das Produtividades Calculadas e Fornecidas pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná (%)

Cidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cascavel	93	105	80	119	112	81	955	93	98	77		87
Cascavel	105	100	86	79	65	69	91	83	96	82	119	127
Goioerê						101	92					
Goioerê				95	90	107	101					
Goioerê						109	102					
Goioerê							95					
Rancho Alegre D'Oeste	114	106	104	92	86	103	93					103
Ubiratã						93	89					

Grandes variações na tabela 5 são esperadas, pois como dito anteriormente os valores dos índices de mérito não estão sendo ajustados de acordo com seu posicionamento e nem

utilizados os valores reais de irradiação mensal dos períodos. Porém, nota-se pela média do comparativo que estes tendem a convergir para 100%, ou seja, os valores de geração anuais tendem a se aproximar do valor esperado de geração anual, já que nesta comparação minimiza-se os efeitos de meses que apresentam valores de irradiação atípicos, bem como as diferenças geradas pelos posicionamentos não ideais dos SFVCR.

Similar ao cálculo realizado para o valor de Produtividade (*Yield*), a tabela 6 apresenta os valores de PR para cada um dos sistemas, mês a mês.

Tabela 6. *Performance Ratio* (PR) (%)

Cidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cascavel	69,9	79,1	60,0	88,9	83,9	61,1	71,6	69,9	73,2	57,9		65,1
Cascavel	78,7	75,1	64,8	59,3	49,1	51,9	68,5	62,4	71,8	61,7	89,5	95,0
Goioerê						76,0	69,3					
Goioerê				71,5	67,6	80,1	76,1					
Goioerê						81,7	76,9					
Goioerê							71,6					
Rancho Alegre	85,9	79,4	78,3	69,0	64,8	77,4	69,8					77,5
D'Oeste												
Ubiratã						69,8	67,1					

Na tabela 7 é apresentada a comparação dos valores obtidos na tabela 6 com o PR esperado (neste caso utilizou-se o valor de 75% para todos os meses), apresentado pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná [8].

Tabela 7. Comparativo de Valores Calculados de *Performance Ratio* (PR) e Valores apresentados pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná (%)

Cidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cascavel	93	105	80	119	112	81	95	93	98	77		87
Cascavel	105	100	86	79	65	69	91	83	96	82	119	127
Goioerê						101	92					
Goioerê				95	90	107	101					
Goioerê						109	102					
Goioerê							95					
Rancho Alegre	114	106	104	92	86	103	93					103
D'Oeste												
Ubiratã						93	89					

Novamente percebe-se que, como esperado, as variações mensais são maiores que as variações médias anuais. Inclusive, ao se considerar a média das médias anuais dos PR de todos os sistemas obtém-se o valor de 72,4%, muito próximo aos 75% considerados pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná [8]. Esta diferença percentual pode estar ligada ao fato de que os sistemas instalados não estão nas condições ideais, porém, estão sendo calculados como se estivessem, sem realizar os ajustes necessários na irradiação de acordo com a inclinação e orientação de cada sistema.

Para completar a análise de desempenho, o terceiro índice de mérito calculado foi o fator de capacidade, o qual está disposto na tabela 8 apresentando os valores mensais do FC para cada um dos sistemas.

Tabela 8. Fator de Capacidade (FC) (%)

Cidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cascavel	16.0	17.3	13.4	18.9	14.9	10.3	12.6	14.9	14.6	12.2		14.9
Cascavel	18.0	16.6	14.5	12.5	8.7	8.7	11.9	13.4	14.4	13.0	20.1	21.7
Goioerê						13.0	12.4					
Goioerê				15.4	12.5	13.6	13.6					
Goioerê						13.9	13.9					
Goioerê							12.7					
Rancho Alegre	19.8	18.3	18.1	15.0	11.8	13.1	12.5					18.1
D'Oeste												
Ubiratã						11.6	11.6					

Pode-se perceber que os fatores de capacidade dos oito sistemas oscilam dentro da expectativa em termos de Brasil. Valores superiores à 18% são mais recorrentes em meses de verão, que apresentam maiores índices de irradiação, enquanto fatores de capacidade inferiores à 13 % ocorrem em meses de inverno, em que a irradiação é menor. Em uma análise geral, pode-se concluir que os índices estão adequados dentro desta perspectiva.

CONCLUSÃO

Os valores de produtividade encontrados foram superiores durante o verão por conta do fato de que nestes meses há maiores índices de irradiação e, conseqüentemente, de geração de energia elétrica por meio dos painéis fotovoltaicos. Todavia, grande parte dos valores de *Performance Ratio* obtidos durante o período de inverno foram próximos ou superiores aos valores obtidos no verão, situação que pode ser relacionada às altas temperaturas encontradas durante os meses de verão que influenciam a perda de eficiência do sistema neste período.

Além disto, os valores de *Performance Ratio* superiores a 90% podem ser relacionados ao fato de que a irradiação utilizada como referência não foi retirada de medições realizadas por meio de estações solarimétricas, mas sim por meio de dados provenientes do Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná. Por se tratar de um estudo de 17 anos, o referido Atlas apresenta uma média histórica e não leva em consideração as particularidades de fenômenos meteorológicos que possam ter ocorrido durante o ano dos estudos de caso.

Com relação ao comparativo da produtividade das cidades, Goioerê apresentou as menores diferenças entre os valores calculados e os apresentados pelo Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná, enquanto Cascavel apresentou as maiores.

REFERÊNCIAS

- Sanchez, A.L.; Pascual, J.M.D.; Peña, R.; Materials for Photovoltaics: State of Art and Recent Developments. *International Journal of Molecular Sciences*, **2019**, volume 20, pp-1-42
- Das, S.K.; Verma, D.; Nema, S.; Nema, R.K. Shading mitigation techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Volume 78, pp-369-390, ISSN 1364-0321, DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.093>>.
- REN21; Market and Industry Trends. *Renewables 2019- Global Status Report*, REN21 Secretariat: France, 2019, Volume 1, pp-94-98, ISBN <978-3-9818911-7-1>
- Scolari, B.S.; Panorama da Inserção da Geração Fotovoltaica Conectada à Rede Amparada Pela REN Nº482/2012 da Aneel No Brasil, No Paraná E Em Curitiba. Master Thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

5. Scolari, B.S.; Tonolo, E.A.; Pan, R.C.Y.; Urbanetz Jr, J.; Mapping and Characterization of the Grid-connected Photovoltaic Systems in the City of Curitiba: Preliminary Results; Braz. Arch. Biol. Technol., Volume 61, pp- 1-8.
6. National Electrical Energy Agency (ANEEL). Unidades Consumidoras com Geração Distribuída. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp (acessado em 02 Setembro 2019).
7. 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. Dissertação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
8. Tiepolo, G.; Pereira, E. B.; Urbanetz, 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, Curitiba, UTFPR, 2017.



© 2019 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/>).