



ANÁLISE DOS ÍNDICES DE MÉRITO DE QUATRO SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM CAMPUS DO IFG

Rafael O. Lobato*¹, Jose L. Domingos¹, Carlos R. S. Júnior¹, Paulo C. B. Bastos¹

¹IFG - Instituto Federal de Goiás - Campus Goiânia

Resumo - Diante à necessidade global do uso de tecnologias verdes, o setor de energia solar fotovoltaica expande-se a cada ano no Brasil. Com esse crescimento, torna-se essencial compreender o perfil de desempenho dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de energia elétrica em território nacional. Neste sentido, este artigo tem como objetivo a análise de quatro sistemas fotovoltaicos do Instituto Federal de Goiás, em um período de três meses, por meio da utilização dos índices de mérito, com a finalidade de destacar o sistema com melhor desempenho e os fatores que proporcionaram essa melhor performance. A análise aplica os índices de mérito de fator de capacidade, produtividade do sistema, produtividade de referência e desempenho global, considerando os dados obtidos por meio dos inversores de frequência e banco de dados meteorológicos. Os resultados alcançados indicaram que o sistema submetido a limpeza dos módulos apresenta a melhor performance, evidenciando a importância das ações de manutenção, principalmente, em períodos de estiagem.

Palavras-Chave – Desempenho Operacional, Energia Solar, Índices de Mérito, Sistema Fotovoltaico.

ANALYSIS OF MERIT INDEXES OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS CONNECTED TO THE GRID ON THE GOIÂNIA AND ITUMBIARA CAMPIS OF THE IFG

Abstract - Faced with the global need to use green technologies, the photovoltaic solar energy sector expands every year in Brazil. With this growth, it becomes essential to understand the performance profile of photovoltaic systems connected to the electricity distribution network in the national territory. In this sense, this article aims to analyze four photovoltaic systems of the Federal Institute of Goiás, in a period of three months, through the use of merit indices, in order to highlight the system with the best performance and the factors that provided this better performance. The analysis applies the merit indices of capacity factor, system productivity, reference productivity and overall performance, considering the

data obtained through the frequency inverters and meteorological database. The results obtained indicated that the system submitted to the cleaning of the modules presents the best performance, evidencing the importance of maintenance actions, especially in periods of drought.

Keywords - Operational performance, Merit Index. Photovoltaic System. Solar Energy.

I. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas enfrentadas no século XXI são atribuídas ao uso inapropriado dos recursos naturais. A queima de combustíveis fósseis pelos segmentos automotivo, industrial e geração de energia elétrica estão entre os principais contribuintes para a aceleração do aquecimento global. De acordo com a 26ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP26), houve o comprometimento de diversos países em reduzir a emissão de gases poluentes. O Brasil comprometeu-se com a redução de 50% das emissões de carbono até 2030 [1].

A matriz elétrica brasileira é referência mundial na utilização de energias renováveis, destacando-se dentre elas, a hidrelétrica [2]. Esta fonte de energia é predominante pela abundante presença fluvial no relevo do país. Com as alterações no regime pluvial em seu território, o Brasil tem investido em outras fontes de energias, como a eólica e a solar, com o intuito de complementar a geração hidrelétrica, severamente impactada em períodos de estiagem.

A energia solar fotovoltaica é caracterizada pela ausência de emissão de gases poluentes, pelos reduzidos impactos ambientais e pela captação de um recurso natural e permanente de energia, tornando-a sustentável e renovável. O Brasil encontra-se geograficamente nas regiões equatorial e tropical, o que favorece a eficiência dos equipamentos fotovoltaicos e estimula o investimento em usinas solares. Em agosto de 2022, 9,1% da matriz elétrica nacional consistia nessa tecnologia [3].

O Marco Legal da Energia Solar, sancionado em 07 de janeiro de 2022, transporece as práticas e leis sobre a energia solar, o que incentiva o mercado dessa tecnologia [4]. A publicação da Resolução Normativa Aneel nº 954, em 30 de novembro de 2021, estabelece tratamento regulatório para a implantação de Centrais Geradoras Híbridas (UGH) e centrais

*rafaellobato.eng@gmail.com

geradoras associadas, o que favorece a expansão da energia solar na matriz energética nacional [5].

Neste contexto, este artigo tem como objetivo geral a análise por meio dos índices de mérito de quatro sistemas fotovoltaicos (SFV), em distintas situações e localidades, com a finalidade de destacar o sistema com melhor desempenho e os fatores que proporcionaram essa melhor performance. As instalações abordadas situam-se nos campi Goiânia e Itumbiara do IFG e a pesquisa corresponde aos primeiros três meses de operação das usinas localizadas em Goiânia, de julho a setembro de 2021.

O período de pesquisa foi delimitado pela quantidade de amostras obtidas e abrange a maior parte do inverno no Centro-Oeste brasileiro, caracterizado por ser um período seco e com atmosfera instável, com reduzidas temperaturas em julho, presença de fumaças em agosto e altas temperaturas acompanhadas de eventuais precipitações em setembro.

Evidencia-se que estes sistemas fotovoltaicos estão sujeitos a sujidade, condições meteorológicas, intervenções de manutenção e sombreamentos.

II. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos definidos no artigo, as descrições dos sistemas fotovoltaicos, as características dos locais, a irradiação solar mensal e os índices de mérito são apresentados nesta seção.

A. Descrição dos Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos analisados são quatro, dos quais três localizam-se no Campus Goiânia e um no Câmpus Itumbiara, ambos do IFG. A análise é realizada com dados dos sistemas fotovoltaicos condicionados a ações de intemperismo por um período trimestral.

Os sistemas vinculados aos inversores 5 (SFV5) e 6 (SFV6) foram escolhidos por disporem da mesma configuração operacional e localizarem-se acima do mesmo telhado, tornando possível a comparação e verificação da diferença de rendimento de cada um desses sistemas fotovoltaicos, sob as mesmas condições ambientais. O sistema vinculado ao inversor 7 (SFV7) foi escolhido por ser mais acessível a ações de manutenção e estar instalado em outra localidade do mesmo Campus. O sistema fotovoltaico vinculado ao inversor do bloco 400 (SFVB400) do Campus Itumbiara foi escolhido por estar instalado em outra cidade. A possibilidade de aquisição de dados também foi um fator determinante para a escolha dos sistemas.

1) *Sistemas Fotovoltaicos do Campus Goiânia*

O SFV5 é constituído por 114 painéis fotovoltaicos de 325 Wp. A capacidade instalada do sistema é de 37,050 kWp e o inversor é de 30 kW. O SFV6 possui as mesmas características do SFV5. Os sistemas fotovoltaicos de ambos os inversores estão localizados acima do telhado do bloco 300 e possuem inclinação conforme a latitude de Goiânia, com orientação para o norte geográfico.

O SFV7 é constituído por 93 painéis de 325 Wp. A capacidade instalada é de 30,225 kWp e o inversor é de 30 kW. O sistema fotovoltaico deste inversor está instalado sobre o telhado do Miniauditório Demartin Bizerra da Silva e sala dos professores e a inclinação dos painéis corresponde ao

ângulo de latitude do Campus, com orientação para o norte geográfico. A Fig. 1 ilustra a vista aérea desses sistemas fotovoltaicos.

Figura 1: Vista aérea dos SFV's do Campus Goiânia do IFG.



Fonte: 3E ENGENHARIA, 2020.

2) *Sistema Fotovoltaico do Campus Itumbiara*

O SFVB400 é constituído por um sistema de 70 painéis de 325 Wp. A capacidade instalada é de 22,750 kWp e o inversor é de 20 kW. Esse sistema fotovoltaico está instalado sobre o telhado do bloco 400, possui inclinação similar à superfície em que está fixado (aproximadamente 10°) e está orientado para o sudeste geográfico. A Fig. 2 ilustra a vista aérea desse sistema.

Figura 2: Vista aérea do SFV do Campus Itumbiara do IFG



Fonte: 3E ENGENHARIA, 2020.

B. Características das Localidades

A cidade de Goiânia situa-se na latitude 16° 40' 48'' Sul e longitude 49° 15' 18'' Oeste, na região central do estado de Goiás. O município de Itumbiara localiza-se na latitude 18° 25' 18'' Sul e longitude 49° 12' 56'' Oeste, na região sul do estado [6]. O estado de Goiás possui um clima tropical semiúmido e registra elevadas temperaturas a maior parte do ano [7]. A Fig. 3 apresenta a distribuição dos Campi do IFG.

Figura 3: Localização dos Campi do IFG.



C. Irradiação Solar das Localidades

Os dados de irradiação solar diária média mensal podem ser adquiridos por meio do site do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB). Este endereço eletrônico oferece dados específicos de determinados locais e apresenta as opções de radiação no plano inclinado ou horizontal.

Para o cálculo dos índices de mérito dos SFV's sistemas fotovoltaicos do Câmpus Goiânia, são utilizados os dados de radiação no plano inclinado e para o sistema do Câmpus Itumbiara, os dados de radiação no plano horizontal, aplicando deste modo, os valores de radiação mais adequados para a inclinação dos painéis de cada sistema fotovoltaico.

A Fig. 4 e Fig.5 apresentam o gráfico mensal das irradiações médias nos meses contemplados pelo estudo.

Figura 4: Irradiação média no plano inclinado em Goiânia.

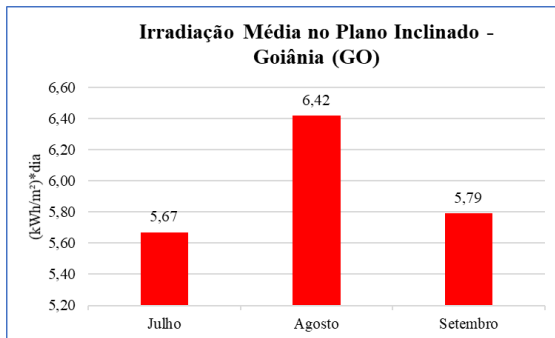
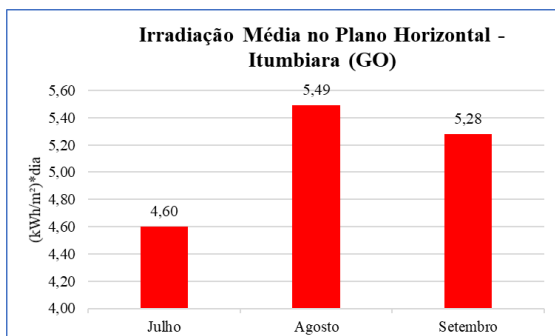


Figura 5: Irradiação média no plano horizontal em Itumbiara.



D. Índices de Mérito

Os índices de mérito, também denominados índices de desempenho, figuras de mérito ou índices de mensuração são indicadores de performance que relacionam um determinado sistema com uma referência estabelecida. Em energia solar, os índices de mérito são avaliados tomando como referência os parâmetros estabelecidos pela International Energy Agency (IEA), os quais encontram-se descritos na norma International Electrotechnical Commission (IEC) 61724 [8].

Segundo o estado da arte da literatura acadêmica, as figuras de mérito mais utilizadas são o fator de capacidade, produtividade de referência, produtividade final e desempenho global.

O Fator de Capacidade (FC), do inglês *Capacity Factor*, é determinado pela razão entre a energia elétrica efetivamente gerada e a energia elétrica produzida caso o sistema operasse em potência nominal durante todo o período analisado, em condição padrão (STD - Irradiância de 1.000 W/m², temperatura de célula de 25° C e distribuição espectral AM 1,5). Descreve-se esse parâmetro pela equação:

$$FC = \frac{Eca}{Estd} = \frac{\int_0^{\Gamma} Pca(t) \cdot dt}{\int_0^{\Gamma} Pstd(t) \cdot dt}, \quad (1)$$

em que:

Γ - Período de operação;

Eca - Energia entregue à rede;

$Estd$ - Energia que seria entregue se o sistema operasse todo o período analisado em condições padrão (STD);

Pca - Potência entregue à rede elétrica;

$Pstd$ - Potência instalada do sistema em condições padrão (STD).

O índice de Produtividade do Sistema (Y_F), do inglês *Final Yield*, é definido como a razão entre a energia elétrica produzida em corrente alternada fornecida a rede (kWh) e a capacidade instalada do sistema fotovoltaico (kWp). Segundo [9], este índice também pode ser determinado como a quantidade de horas que seriam necessárias para que o sistema produzisse em sua potência nominal a energia efetivamente gerada. Descreve-se esse parâmetro pela equação:

$$YF = \frac{1}{Pstd} \cdot \left[\frac{1}{\Gamma} \cdot \int_0^{\Gamma} Pca(t) \cdot dt \right], \quad (2)$$

em que:

Γ - Período de operação;

Pca - Potência entregue à rede elétrica;

$Pstd$ - Potência instalada do sistema em condições padrão (STD).

A Produtividade de Referência (Y_R), do inglês *Reference Yield*, é determinada pela razão entre a quantidade de irradiação solar total incidente no plano do sistema fotovoltaico e a irradiação padrão (1000 W/m²). Descreve-se esse parâmetro pela equação:

$$YR = \frac{H(\gamma, \beta)}{Gstd}, \quad (3)$$

em que:

$H(\gamma, \beta)$ - Irradiação no plano do arranjo;

G_{STD} - Irradiação padrão de 1000 W/m².

O Desempenho Global (PR), também denominado de razão de performance, razão de desempenho ou taxa de desempenho, do inglês *Performance Ratio*, é a razão entre a Produtividade do Sistema e a Produtividade de Referência. O Desempenho Global é obtido pela expressão matemática:

$$PR = \frac{YF}{YR}, \quad (4)$$

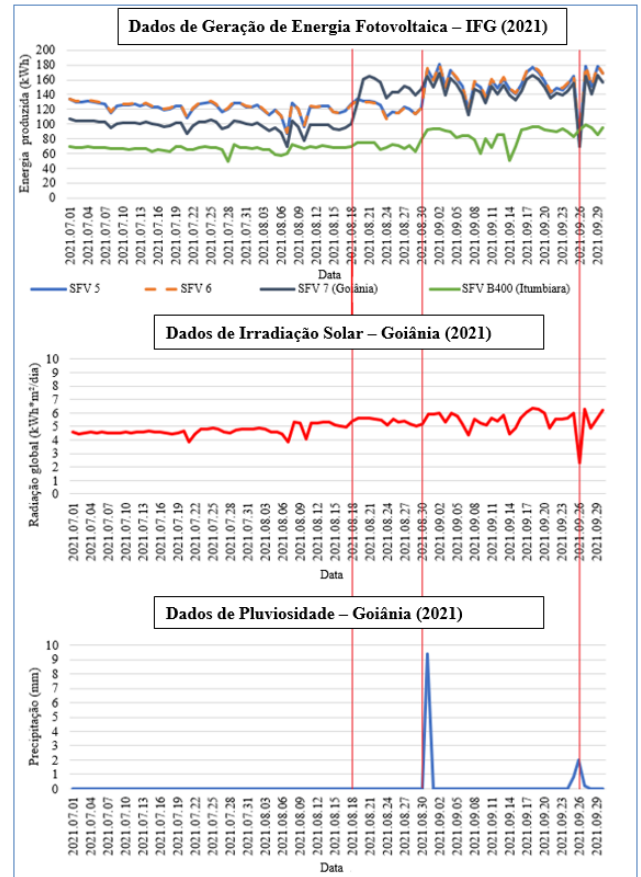
Segundo [10], esses parâmetros de desempenho fornecem uma base sobre a qual distintos sistemas fotovoltaicos conectados à rede podem ser comparados independentemente da localidade, configuração, design, tecnologia ou condição operacional. De acordo com [11] esses indicadores ainda permitem a detecção de problemas operacionais, portanto, também são utilizados com a finalidade de monitorar os sistemas fotovoltaicos e sinalizar quando é necessário a realização de ajustes e manutenção.

III. RESULTADOS

A produção diária de eletricidade exerce influência nos indicadores de desempenho operacional. Devido a isso, é realizado a análise da geração diária de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos localizados no Campus Goiânia juntamente com os dados de radiometria e pluviosidade de Goiânia, dois importantes elementos que contribuem para a atuação dos sistemas. Os dados meteorológicos foram fornecidos pelo banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A produção diária do SFV B400 não foi analisada, uma vez que os dados meteorológicos utilizados não correspondem a cidade de Itumbiara.

A Fig. 6 apresenta a comparação dos dados mencionados com intervalos de três dias entre as medições.

Figura 6: Comparação dos dados de geração de energia elétrica, radiometria e pluviosidade



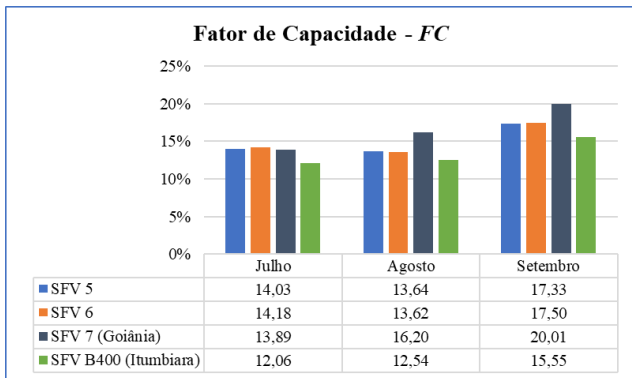
A comparação gráfica dos dados indica que a geração de energia dos três SFV's está intrinsecamente relacionada a radiação recebida, haja vista que o comportamento dos dois primeiros gráficos apresenta similaridade.

Observa-se que a radiação eleva-se gradualmente durante todo o período analisado, com eventuais alterações. Esse comportamento deve-se ao aumento de horas diárias com a presença solar na cidade, haja vista que no dia 01 de julho é registrado 11h07 de Sol, enquanto no dia 30 de setembro, é registrado 12h12 [12].

É observado, também, três alterações acentuadas nos gráficos dos SFV's. O primeiro evento, no dia 18 de agosto de 2021, deve-se a realização de uma limpeza nos módulos do SFV7 por serviço especializado. O segundo evento, no dia 30 de agosto de 2021, deve-se a exposição dos sistemas fotovoltaicos a uma precipitação, com registro pela estação meteorológica automática da cidade de Goiânia de ao menos 9mm de pluviosidade. O terceiro evento deve-se ao registro pela estação meteorológica automática da cidade de Goiânia de ao menos 2mm de pluviosidade no dia 26 de setembro de 2021 e ao menos 4 dias consecutivos de precipitações.

Para obter o FC das usinas solares em estudo, é utilizado a equação (1). A Fig. 7 apresenta os resultados desse índice.

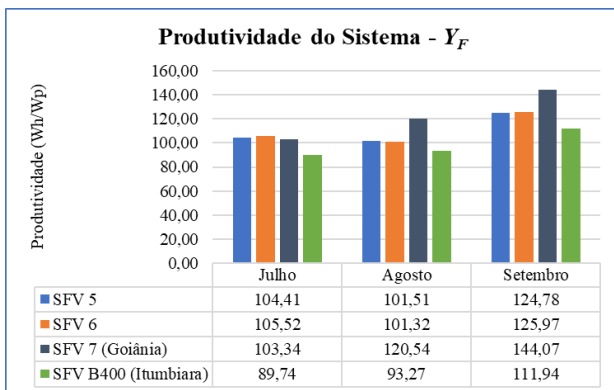
Figura 7: Fator de Capacidade mensal



Os resultados gráficos deste índice permitem identificar o aumento gradativo do FC dos quatro SFV's analisados, no período de julho a setembro. Em julho, o maior resultado deste índice alcançou 14,18%, enquanto em setembro o menor resultado é de 15,55%. Os resultados dos 3 meses de estudo fornecem a variação de 12 a 20% de FC .

Para esta pesquisa, o YF é obtido conforme a equação (2). A Fig. 8 apresenta os resultados desse índice.

Figura 8: Produtividade do Sistema mensal



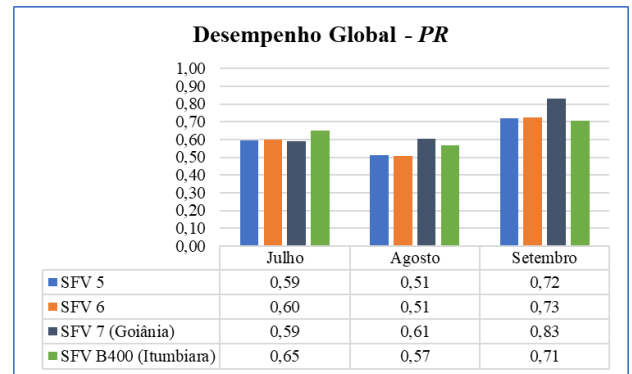
Observa-se o comportamento distinto dos SFV5 e SFV6 em relação aos demais. Os SFV5 e SFV6 apresentaram YF semelhantes nos 3 meses analisados, com ligeira redução deste índice em agosto (inferior a 5Wh/Wp) e notável aumento em setembro (superior a 25 Wh/Wp). A maior diferença de Produtividade do Sistema entre os dois sistemas é identificada em setembro, com 1,19 Wh/Wp.

O SFV7 apresentou resultados com aumentos expressivos de YF , com elevação de 17,2 Wh/Wp de agosto em relação a julho e de 23,53 Wh/Wp de setembro em relação a agosto, totalizando um acréscimo de 40,73 Wh/Wp.

O SFV B400 apresenta aumento sutil e contínuo do YF , com resultados menores que os demais sistemas fotovoltaicos em todo o período analisado.

A aquisição do índice PR é realizada por meio da equação (3). A Fig. 9 apresenta os resultados desse índice.

Figura 9: Desempenho Global mensal



Observa-se que o comportamento dos quatro sistemas fotovoltaicos são distintos durante os 3 meses analisados. Consta-se que entre os SFV5 e SFV6, localizados acima do mesmo edifício, não houveram diferenças expressivas entre seus resultados de julho a setembro, tornando possível considerar que ambos apresentaram o mesmo desempenho. O SFV 7 apresentou o melhor desempenho em relação aos demais sistemas fotovoltaicos em agosto e setembro.

O SFV B400 apresenta o maior PR em julho em relação aos demais, seguido de sutil redução em agosto e tem elevação em setembro, mês no qual atinge uma performance similar aos SFV5 e SFV6 e inferior ao do SFV 7.

Com a finalidade de sintetizar as informações obtidas, é apresentado a seguir um quadro comparativo dos resultados dos índices de mérito aplicados.

Tabela 1: Síntese dos valores dos índices de mérito.

Câmpus	Sistema	Período (2021)	Geração de energia (kWh)	Fator de Capacidade - FC (%)	Produtividade final - YF (Wh/Wp)	Desempenho Global - PR (adimensional)
Goiânia	SFV 5	Julho	3868,46	14,03	104,41	0,59
		Agosto	3760,77	13,64	101,51	0,51
		Setembro	4623,22	17,33	124,78	0,72
	SFV 6	Julho	3909,59	14,18	105,52	0,60
		Agosto	3753,95	13,62	101,32	0,51
		Setembro	4667,33	17,50	125,97	0,73
	SFV 7	Julho	3123,57	13,89	103,34	0,59
		Agosto	3643,40	16,20	120,54	0,61
		Setembro	4354,38	20,01	144,07	0,83
Itumbiara	SFV B400	Julho	2064,00	12,06	89,74	0,65
		Agosto	2145,30	12,54	93,27	0,57
		Setembro	2574,60	15,55	111,94	0,71

IV. CONCLUSÕES

Conclui-se que no mês de setembro foram encontrados os melhores resultados. A atmosfera límpida proporcionada pelas eventuais precipitações (logo permitindo maior quantidade de radiação incidente nos arranjos fotovoltaicos), o arrefecimento e limpeza dos mesmos pela ação pluvial e o maior tempo de exposição à radiação solar, promovida pelo aumento na quantidade de horas diárias com presença de luz solar, característico do fim da estação do Inverno e início da Primavera, foram fatores atmosféricos que influenciaram para que esse mês apresentasse os melhores desempenhos.

O sistema fotovoltaico com o melhor desempenho diante os ambientes observados é o SFV7, o qual tem a mesma

inclinação com a latitude local, atuou em uma estação do ano com incidência de radiação quase ininterrupta durante os dias e evidencia-se a ação de manutenção de limpeza de seus painéis realizada por um serviço especializado, em um mês do ano com condições atmosféricas caracterizadas por fumaça, fuligem e demais impurezas.

O sistema fotovoltaico com o segundo melhor PR foi o SFVB400, o qual é caracterizado por ter inclinação dos painéis quase plana e orientação para o sudeste geográfico.

A comparação entre SFV 5 e 6 esclarece que para sistemas com as mesmas descrições operacionais e localização há sutis variações de performance devido as características inerentes de cada sistema. Os resultados das usinas foram muito próximos, como esperado.

O estudo seria mais expressivo com a escolha de sistemas fotovoltaicos com condições de instalações mais distintas, entretanto, apenas foi possível coletar os dados dos sistemas citados. Os três sistemas escolhidos do Campus Goiânia possuem condições de instalação semelhantes, sendo instalados em local com mesma irradiância e com mesmas condições de orientação e inclinação, destacando-se o SFV7 por possuir fator de dimensionamento diferente das usinas SFV5 e SFV6, além de receber ação de manutenção de limpeza. O sistema escolhido do Campus Itumbiara possui condição de instalação distinta aos demais, apresentando índices de mérito mais relevantes a comparação.

Concluí-se, também, que este tipo de pesquisa contribui como orientação para futuras instalações de equipamentos fotovoltaicos, indicando as condições com maior produtividade e geração de energia elétrica e o tipo de manutenção a ser adotada.

REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL, Ministério Do Meio Ambiente (2021). *Com meta ambiciosa, Brasil anuncia redução de 50% nas emissões de carbono até 2030*. Acedido em 14 de Janeiro de 2022, em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/anuncio-de-ampliacao-da-meta-de-reducao-de-emissoes-para-50-ate-2030-e-destaque-nas-primeiras-participacoes-do-brasil-na-cop26>.
- [2] REN21 (2021). *Trends in Brazil Facts from the Renewables 2021 Global Status Report*. Acedido em 03 de Setembro de 2022, em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/REN21_GSR2021_Factsheet_Brazil_EN.pdf
- [3] ABSOLAR (2022). *Infográfico Absolar*. Acedido em 21 de Setembro de 2022, em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>
- [4] BRASIL, Diário Oficial da União (2021). Lei nº 14300. Acedido em 09 de Setembro de 2022, em <https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>
- [5] BRASIL, Diário Oficial da União (2021). *Resolução Normativa Aneel nº 954*. Acedido em 09 de Setembro de 2022, em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-normativa-aneel-n-954-de-30-de-novembro-de-2021-364715864>
- [6] Cidade-brasil (2022). *Cidades do Brasil*. Acedido em 30 de Agosto de 2022, em: <https://www.cidade-brasil.com.br/>
- [7] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2016). *Clima*. Acedido em 04 de Setembro de 2022, em: https://atlascolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas_brasil/brasil_clima.pdf
- [8] IEC STANDARD 61724. *Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis*. 1998.
- [9] G. Rampinelli, *et al*, “Desenvolvimento de mapas de avaliação do desempenho de sistemas fotovoltaicos em diferentes ângulos de inclinação e de azimute”, *Avances em Energias Renovables y Media Ambiente*, v. 18, p.04.01-04.08, 2014. Acedido em 01 de Setembro de 2022, em: https://nteelsolar.paginas.ufsc.br/files/2020/10/2014_L.-Kormann-J.-Peroza-J.-E.-Silva-G.-A.-Rampinelli-2014-Tema-4.pdf
- [10] M. S. Adaramola, E. E. T. Vagnes, “Preliminary assessment of a small-scale rooftop PV-grid tied in Norwegian climatic conditions”, *Energy conversion and management*, Elsevier, v. 90, n.15, p.458-46, jan. 2015. Acedido em 10 de Setembro de 2022, em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890414009856>
- [11] B. Marion, *et al*, “Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems”, *IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition*, Springfield, 2005. Acedido em 04 de Setembro de 2022, em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1488451>
- [12] SUNRISE-AND-SUNSET (2022). *Nascer e pôr do sol Goiânia, Brasil*. Acedido em 05 de Setembro de 2022, em: <https://www.sunrise-and-sunset.com/pt/sun/brasil/goiania>.