

16º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2025

Estudo do desempenho operacional de um Sistema Fotovoltaico sob a influência de condições climáticas locais

Enzo MARQUEZI¹, William Zaccaro GOMES²

¹Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Campus São João da Boa Vista, enzo.marquezi@aluno.ifsp.edu.br

²Professor orientador, IFSP, Campus São João da Boa Vista, william.gomes@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.04.01-0 Geração da Energia Elétrica.

RESUMO: Este artigo investiga a influência de fatores ambientais, como temperatura e irradiação solar, no desempenho operacional de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) de 54 kWp, localizado em um campus do IFSP. O estudo adota uma abordagem quantitativa e descritiva, utilizando três fontes de dados secundários: CIIAGRO para dados de temperatura, LABREN para irradiação solar típica, e a plataforma de monitoramento da Growatt para a geração de energia do SFCR. Foi estudado o período que compreende de 2022 a 2024. Os resultados indicam a forte influência sazonal da irradiação solar e a interferência do clima na geração de energia, com picos na primavera-verão e quedas no outono-inverno. Por outro lado, o desempenho do sistema, medido pelo *Performance Ratio* (PR), demonstrou um comportamento mais complexo. O PR tende a ser menor nos meses de alta irradiação e altas temperaturas, pois o aumento da temperatura ambiente compromete a eficiência dos módulos. Em contrapartida, nos meses mais frios, o sistema opera com maior eficiência, resultando em um PR mais alto, apesar da menor geração total de energia.

PALAVRAS-CHAVE: energia fotovoltaica; performance ratio; eficiência energética; condições ambientais; irradiação solar; temperatura.

A study of the operational performance of a photovoltaic system under the influence of local climatic conditions

ABSTRACT: This original paper investigates the influence of environmental factors, such as temperature and solar irradiation, on the operational performance of a 54 kWp Grid-Connected PV System (GCPV) located on an IFSP campus. The study adopts a quantitative and descriptive approach, using three sources of secondary data: CIIAGRO for temperature data, LABREN for typical solar irradiation, and the Growatt monitoring platform for the GCPV energy generation. The analyzed period covers the years 2022 to 2024. The results indicate a strong seasonal influence of solar irradiation and the impact of climate conditions on energy generation, with peaks during spring-summer and drops during autumn-winter. On the other hand, the system performance, measured by the Performance Ratio (PR), showed a more complex behavior. The PR tends to be lower in months of high irradiation

and elevated temperatures, since the increase in ambient temperature reduces module efficiency. Conversely, in colder months, the system operates with higher efficiency, resulting in a higher PR despite the lower total energy generation.

KEYWORDS: photovoltaic energy; performance ratio; energy efficiency; environmental conditions; solar irradiation; temperature.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de energia renovável vêm se expandindo rapidamente nas últimas décadas em função das preocupações com a crise climática global, o imperativo da transição energética e as demandas pelo desenvolvimento sustentável (Aarich et al., 2024). Nesse contexto, os sistemas fotovoltaicos têm assumido um papel de protagonismo junto às novas fontes de energia renovável (Bojek, 2022). Atualmente, os sistemas fotovoltaicos já correspondem a 23% da capacidade instalada na matriz brasileira de energia elétrica (ABSOLAR, 2025) e a 6,9% na matriz elétrica mundial (REN21, 2025).

O desempenho operacional dos sistemas fotovoltaicos é um fator crítico para maximizar a conversão do recurso solar disponível em energia elétrica. Segundo o trabalho de Ferrada et al. (2015), as variáveis ambientais (tais como temperatura atmosférica e velocidade do vento) determinam fortemente o desempenho desses sistemas. A temperatura de junção das células fotovoltaicas é a principal variável a determinar a eficiência de conversão energética desses dispositivos (Skoplaki; Palyvos, 2009).

Diante desse contexto, este artigo tem como objetivo analisar a influência desses fatores na produção de energia elétrica em um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR). Foram analisados dados retroativos da energia elétrica gerada por um SFCR para estudar a hipótese da correlação entre as condições ambientais e o desempenho operacional desse sistema.

Compreender essas interações é crucial para aprimorar as práticas de operação e manutenção (O&M) do sistema de modo a elevar a sua eficiência operacional, melhorar a confiabilidade e a previsibilidade da geração, além de fortalecer o papel da energia solar na construção de matrizes energéticas mais sustentáveis e resilientes.

MATERIAIS E MÉTODOS

Esse artigo adota uma abordagem quantitativa e descritiva, realizando coleta e análise de dados numéricos para determinar o desempenho operacional de um SFCR com potência instalada de 54 kWp , instalado nas dependências do campus São João da Boa Vista do IFSP. Feito isso, o impacto das condições climáticas sobre os indicadores de desempenho foi analisado.

Para a realização desse estudo, foram utilizadas três fontes de dados secundários. A primeira fonte corresponde ao CIIAGRO (2025), o Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas de São Paulo, que possui uma estação meteorológica automática localizada no mesmo município onde se encontra o sistema fotovoltaico. Os dados obtidos por meio dessa fonte correspondem à temperatura média de cada dia.

Já a segunda fonte advém do LABREN (2017), que é o Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A principal variável a ser obtida dessa fonte foi a irradiação solar típica diária, expressa em $\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. Deve-se ressaltar que esses dados foram utilizados como base para calcular o indicador de desempenho, porém são dados típicos advindos de um estudo que conta com mais de 17 anos de dados satelitais.

A terceira fonte refere-se aos dados da energia elétrica gerada em corrente alternada pelo SFCR. Usou-se a plataforma de monitoramento baseada em nuvem proprietária do fabricante do inversor fotovoltaico (Growatt). Essa plataforma permite obter a geração diária em kWh em formato tabular, facilitando o processamento posterior, sendo essa a menor granularidade disponível.

Para manipular e processar o volume de dados provenientes de tais fontes, foi utilizado o *software* estatístico R em conjunto com o ambiente RStudio. Nesse ambiente, foi importada a base de dados de geração diária do SFCR, referente ao período compreendido entre janeiro de 2022 e dezembro de 2024, totalizando um período de 3 anos de análise na fase atual do estudo. Devido ao volume de dados, a primeira análise feita objetivou verificar valores ausentes (*missing data*), os quais não foram encontrados, assegurando a integridade da informação.

O principal indicador de desempenho operacional empregado foi a Taxa de Desempenho, ou *Performance Ratio* (PR), calculado a partir da definição apresentada por Marion et al. (2005). Os valores mensais desse indicador foram obtidos de acordo com a equação 1. Essa é uma medida adimensional que quantifica o efeito total das perdas na potência nominal do sistema, normalizando em relação à irradiação (Marion et al., 2005).

$$PR = \frac{E_{ger}}{P_{nom} \cdot \frac{H_{tot}}{G_{STC}}} \quad (1)$$

Onde,

E_{ger} é a energia elétrica de corrente alternada gerada pelo SFCR mensalmente ($kWh \cdot mes^{-1}$);

P_{nom} é a potência nominal de corrente contínua instalada do sistema fotovoltaico (kWp);

H_{tot} é a irradiação solar mensal incidente no plano dos módulos fotovoltaicos ($kWh \cdot m^{-2} \cdot mes^{-1}$);

G_{STC} é a irradiância solar nas condições-padrão de ensaio dos módulos fotovoltaicos ($kW \cdot m^{-2}$)

Para ser aplicada a equação, realizou-se o tratamento dos dados de irradiação típica fornecidos pelo LABREN (2017) já que estes se encontravam em valores diários. Para isso, foram criados vetores com o número de dias presentes em cada mês do ano, que, posteriormente, foram multiplicados por seus respectivos valores típicos de acordo com o mês correspondente (levou-se em consideração a existência de anos bissextos). Os valores típicos para as coordenadas geográficas do SFCR foram obtidos por meio do código de identificação correspondente na base de dados, ID 7778.

Dentre os outros valores necessários para a equação, todos já são conhecidos. A energia gerada é obtida através do inversor e tem todos os dias de um mês somados. A potência nominal do sistema é de $54 kWp$, e a irradiância nas condições-padrão de ensaio (STC) é de $1 kW \cdot m^{-2}$, tais termos técnicos estão descritos pela norma NBR 10.899 ABNT (2025).

Para calcular os valores mensais do PR, o *software* RStudio foi novamente utilizado. Além dos cálculos, por meio dele foi possível gerar dois gráficos que permitem uma melhor visualização dos resultados, sendo eles: uma representação da potência total gerada por mês e outra representação exibindo os valores do PR mensal ao longo do período analisado.

Para manter a coerência com a escala temporal das demais variáveis consideradas, foi realizada a média simples das temperaturas médias diárias obtidas do CIIAGRO (2025), resultando na temperatura atmosférica média diária de cada mês. Esse procedimento permite que os dados possam ser utilizados posteriormente na discussão dos resultados.

Os autores reconhecem que a principal limitação desta análise parcial está no uso de dados de irradiação típica do LABREN (2017) como referência, já que o campus não dispõe da instrumentação necessária às medições de irradiância solar. Os dados da estação meteorológica próxima ao campus não

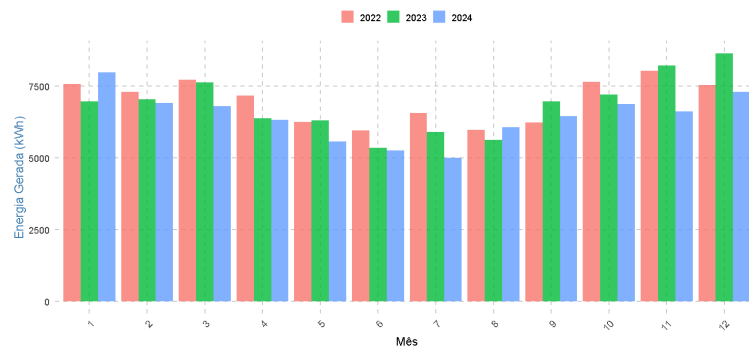
foram utilizados devido à presença de valores ausentes em determinados períodos. Isso pode alterar os valores do PR, mas os dados ainda são válidos para estudo nessa etapa da pesquisa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção analisa os dados históricos de desempenho do SFCR, irradiação solar e temperatura, destacando padrões, causas das variações e impactos das condições climáticas no sistema.

A Figura 1 apresenta a energia gerada mensalmente pelo SFCR, em quilowatt-hora (kWh), permitindo a comparação do desempenho de produção entre diferentes anos.

Figura 1: Gráfico comparativo da energia elétrica gerada mensalmente ao longo dos anos



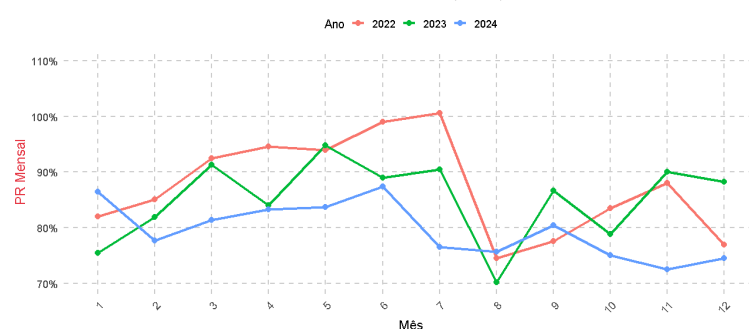
O gráfico de barras evidencia as variações sazonais, com maiores volumes de geração nos meses como janeiro, fevereiro, novembro e dezembro, e menores valores em meses como junho e julho. Consta-se um padrão sazonal evidente e condizente com as características climáticas da região.

Uma vez que os meses com maior geração correspondem à primavera e verão no Hemisfério Sul. Onde, durante tais estações, observa-se uma maior irradiação solar global, aliada a uma maior duração do dia. Em contraste, os meses que apresentam menor geração estão ligados ao outono e inverno, quando se observa uma menor irradiação solar global, juntamente com uma menor duração do dia.

Na comparação entre os anos, 2022 destacou-se por apresentar a maior produtividade, superando os demais em diversos meses. Já 2024 apresentou desempenho inferior de forma consistente, possivelmente associado a condições meteorológicas menos favoráveis.

Partindo agora para a Figura 2, esta apresenta o Performance Ratio (PR) mensal do SFCR, expresso em porcentagem, ao longo do período analisado. Este gráfico de linhas é fundamental para avaliar a eficiência relativa do sistema, ao comparar a energia efetivamente gerada com aquela esperada, considerando as condições de irradiação disponíveis.

Figura 2: *Performance Ratio* (PR) mensal por ano



A Figura 2 mostra que o desempenho do sistema, medido pelo Performance Ratio (PR), apresentou seus melhores índices em 2022 e 2023 (frequentemente acima de 85%). Em 2022, deve-se ressaltar que

há um valor próximo e outro superior a 100%, o que indicaria que o sistema estaria gerando mais energia do que sua capacidade nominal, o que é teoricamente impossível e se encontra muito acima da faixa típica de 60% a 80% (Marion et al., 2005).

Dessa forma, o PR superior a 100% provavelmente reflete o uso de dados de irradiação típica do LABREN (2017), não medidos in loco, indicando uma discrepância entre a irradiação considerada e a real. Além disso, condições de operação favoráveis, como temperaturas dos módulos mais baixas do que as estabelecidas nas Condições Padrão de Teste (CPT ou STC, do inglês *Standard Test Conditions*), podem ter contribuído para eficiência momentaneamente superior à nominal.

Um padrão marcante e recorrente em todos os anos é a queda acentuada do PR no mês de agosto, indicando um provável desvio introduzido pelo uso do TMY ao invés de medições locais para a irradiação solar. A correlação entre geração de energia e PR é fundamental, pois, nos meses de alta geração absoluta, como janeiro, nem sempre correspondem à maior eficiência, pois o PR já considera a irradiação disponível.

A análise do comportamento do PR (*Performance Ratio*) revela que, embora a irradiação seja o fator principal, outros elementos climáticos externos impactam a eficiência do sistema. A temperatura ambiente, em particular, é um dos fatores mais significativos.

A Tabela 1, com os dados da temperatura média da região calculada anteriormente, evidencia essa influência. Nos meses de verão, como janeiro e fevereiro, que coincidem com os picos de geração, as temperaturas médias são as mais elevadas, variando entre 23,0°C e 24,9°C.

Tabela 1: Temperatura atmosférica diária média por ano e mês no município de São João da Boa Vista

Ano	Temperatura atmosférica diária mensal média do ar [°C]											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2022	23,5	23,5	24,4	22,5	18,5	18,9	20,7	19,9	21,0	23,1	21,5	22,5
2023	23,0	23,7	24,1	21,7	20,4	19,1	20,0	21,2	24,6	24,4	25,2	25,7
2024	24,5	24,9	24,7	24,4	22,9	21,3	20,5	20,9	25,4	24,5	23,3	23,9

Fonte: Centro integrado de informações agrometeorológicas do estado de SP (CIIAGRO, 2025).

Com esses dados, pode-se notar uma correlação crucial para explicar por que o PR não acompanha a elevação da geração. O artigo escrito por Ferrada et al. (2015) destaca que o PR tende a ser maior no inverno do que no verão, reiterando que isso ocorre porque a tensão e a potência de saída de um módulo fotovoltaico têm uma forte dependência da temperatura da célula. Logo, em condições de alta temperatura, a eficiência do sistema diminui, resultando em um PR mais baixo.

Dessa forma, mesmo com alta irradiação e grande produção de energia em janeiro, o PR não atinge seu pico, pois as altas temperaturas atuam como um fator de perda de desempenho (Ferrada et al., 2015). Por outro lado, nos meses mais frios, como junho e julho, onde as temperaturas médias são as mais baixas (18,9°C a 20,7°C), o sistema opera com maior eficiência em relação à sua capacidade nominal, o que tende a resultar em um PR mais alto.

CONCLUSÕES

A análise dos dados confirma a forte influência sazonal da irradiação solar na geração de energia elétrica, com picos nos meses da primavera e do verão, e queda no período outono-inverno. Entretanto, o desempenho operacional do sistema (PR) revela um comportamento mais complexo, fortemente impactado pelas variações de temperatura. Mostra-se necessário aprofundar a pesquisa para entender melhor tal variabilidade e seu acoplamento com as variáveis meteorológicas.

O PR menor nos meses de janeiro e fevereiro (alta irradiação) demonstra que o aumento da temperatura ambiente comprometeu a eficiência dos módulos fotovoltaicos, convergindo com os achados de (Skoplaki; Palyvos, 2009). Em contrapartida, nos meses mais frios (junho e julho) o sistema operou com menores perdas, resultando em um PR mais alto, apesar da menor geração total de energia.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Enzo Marquezi participou da conceitualização do projeto de pesquisa e realizou: a análise de dados, o *design* da apresentação de dados, a validação de dados e experimentos, bem como a redação do manuscrito original. William Gomes participou da conceitualização do projeto de pesquisa e realizou: a curadoria de dados, a supervisão da pesquisa bem como a redação (revisão e edição) do manuscrito.

Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação (PRP) e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e Tecnológica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (PIBIFSP) pela bolsa concedida.

REFERÊNCIAS

AARICH, N. et al. Assessment the long-term performance ratio maps of three grid-connected photovoltaic systems in the Moroccan climate. p. 101388, 2024. Journal: Energy for Sustainable Development, Volume 79.

ABNT. *Energia Solar Fotovoltaica - Terminologia*. Rio de Janeiro: ABNT, 2025. Norma Brasileira, NBR 10.899.

ABSOLAR. *Infográfico ABSOLAR nº81*. São Paulo: ABSOLAR, 2025. Url date: 2025-08-16. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 16 ago. 2025.

BOJEK, P. *Solar PV – analysis*. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/solar-pv>>. Acesso em: 16 ago. 2025.

CIIAGRO. *Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas*. Campinas: [s. n.], 2025. Disponível em: <<https://www.ciiagro.sp.gov.br/>>. Acesso em: 16 ago. 2025.

FERRADA, P. et al. Performance analysis of photovoltaic systems of two different technologies in a coastal desert climate zone of chile. p. 356-363, 2015. Journal: Solar Energy, Volume 114.

LABREN. *Dados de irradiação para o Estado de São Paulo*. São José dos Campos, SP, Brasil: INPE, 2017. Disponível em: <https://labren.ccst.inpe.br/atlas2/_tables/SP/_glo.html>. Acesso em: 16 ago. 2025.

MARION, B. et al. Performance parameters for grid-connected pv systems. p. 1601-1606, 2005. Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005.

REN21. *Renewables 2025 Global Status Report*. Paris: [s. n.], 2025. Disponível em: <<https://www.ren21.net/renewables-2025-global-status-report-global-overview>>. Acesso em: 16 ago. 2025.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. p. 614-624, 2009. Journal: Solar Energy, Volume 83, Number 5.