

# DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM PALMAS-TO

**Brunno Henrique Brito** – brunno@ifto.edu.br  
**Astrogildo Pires Bernardo**  
**Ezequias Camargo da Silva**  
**Gustavo Dy Castro**  
**Murilo de Avila Dilli**  
Instituto Federal do Tocantins, Câmpus Palmas

**Resumo.** Este artigo tem como principal objetivo verificar o desempenho da produção de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) na cidade de Palmas-TO. O intuito é determinar a produtividade média mensal (em kWh/kWp) para sistemas instalados em diferentes orientações (leste, oeste, norte e sul), bem como verificar os níveis rendimentos globais a partir dos níveis de irradiação medidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Este estudo conta com a participação de empresas que, sozinhas, têm mais de 3.000 sistemas instalados no Estado do Tocantins. Neste cenário, fora selecionada uma amostra com 343 instalações na cidade de Palmas-TO, considerando os seguintes filtros: (i) a unidade prosumidora (UP) precisa ter pelo menos um ano fechado de geração sem interrupções, considerando os anos de 2020, 2021 e/ou 2022; (ii) os painéis precisam estar instalados em telhados que não promovam sombreamento entre 9hs e 16hs; (iii) os painéis precisam ter a mesma orientação para cada MPPT (Maximum Power Point Tracking) monitorável; e (iv) uma produtividade mensal não pode ser inferior a 60 kWh/kWp, pois pode caracterizar algum tipo de problema na geração do sistema fotovoltaico. A ideia é proporcionar aos integradores/instaladores da região resultados que indiquem se os dados informados nos manuais/datasheets dos equipamentos estão efetivamente sendo praticados. Além disso, os resultados sugerem valores genéricos de produtividade e rendimentos globais que podem ser utilizados por profissionais da região na hora de fazer o dimensionamento de um SFCR.

**Palavras-chave:** Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, Produtividade, Rendimento Global

## 1. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica tem emergido como uma solução ambientalmente responsável e economicamente viável para atender às crescentes demandas de energia em todo o mundo (REN21, 2020). O processo de conversão da luz solar em eletricidade é baseado no princípio fotovoltaico, no qual células fotovoltaicas semicondutoras transformam a luz solar em corrente elétrica direta (DC) (Goetzberger & Hoffmann, 2005). Essa tecnologia tem sido amplamente adotada para produzir eletricidade limpa e sustentável em diversas escalas, desde pequenos sistemas residenciais até grandes parques solares.

O uso prático da energia solar fotovoltaica remonta à descoberta do efeito fotovoltaico por Alexandre-Edmond Becquerel em 1839 (Becquerel, 1839). No entanto, o desenvolvimento de células fotovoltaicas eficientes e economicamente viáveis ocorreu principalmente no século XX. Em 1954, Bell Labs produziu a primeira célula solar de silício eficiente, marcando o início da era moderna da energia solar fotovoltaica (Green *et al.*, 2017). O funcionamento das células fotovoltaicas é baseado na capacidade dos semicondutores de liberar elétrons quando expostos à luz solar. Esses elétrons são então coletados e direcionados por um circuito para gerar eletricidade. As células solares são agrupadas em módulos solares, que, por sua vez, são combinados para formar sistemas fotovoltaicos (Goetzberger & Hoffmann, 2005).

Em escala global, a energia solar fotovoltaica tem desempenhado um papel fundamental na transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis. A capacidade instalada de energia solar fotovoltaica em todo o mundo aumentou significativamente nas últimas décadas, tornando-se uma das fontes de eletricidade de crescimento mais rápido (REN21, 2020). Países como China, Estados Unidos e Alemanha lideram o caminho na adoção de energia solar fotovoltaica. No Brasil, essa tecnologia teve uma ascensão marcante nas últimas décadas, impulsionada por políticas públicas e normas de qualidade mais rigorosas (ANEEL, 2012). O crescimento notável do setor solar fotovoltaico no país tem sido particularmente evidente em cidades como Palmas, no estado de Tocantins, onde a disponibilidade de radiação solar é abundante (IEA, 2021).

A história dos sistemas fotovoltaicos no Brasil remonta a décadas atrás, mas foi a partir da implementação da norma ABNT NBR 16690:2012 que o país testemunhou um crescimento exponencial nesse setor (ABNT, 2012). A norma estabeleceu padrões rígidos para a instalação e operação de sistemas fotovoltaicos, garantindo maior confiabilidade e segurança nas instalações solares. Desde então, o Brasil tem visto um aumento notável na adoção de

sistemas fotovoltaicos em residências, empresas e instalações industriais (MME, 2020), tornando-se um dos mercados de crescimento mais rápido para a energia solar na América Latina (IEA, 2021). A disponibilidade de recursos solares abundantes em todo o país, especialmente em regiões como o estado de Tocantins, incluindo Palmas, tem contribuído para o sucesso dessa tecnologia no Brasil. Na Fig. 1 é possível observar o crescimento exponencial dos sistemas fotovoltaicos na matriz elétrica brasileira. Note que, atualmente, a fonte solar fotovoltaica já é a segunda maior em potência instalada.

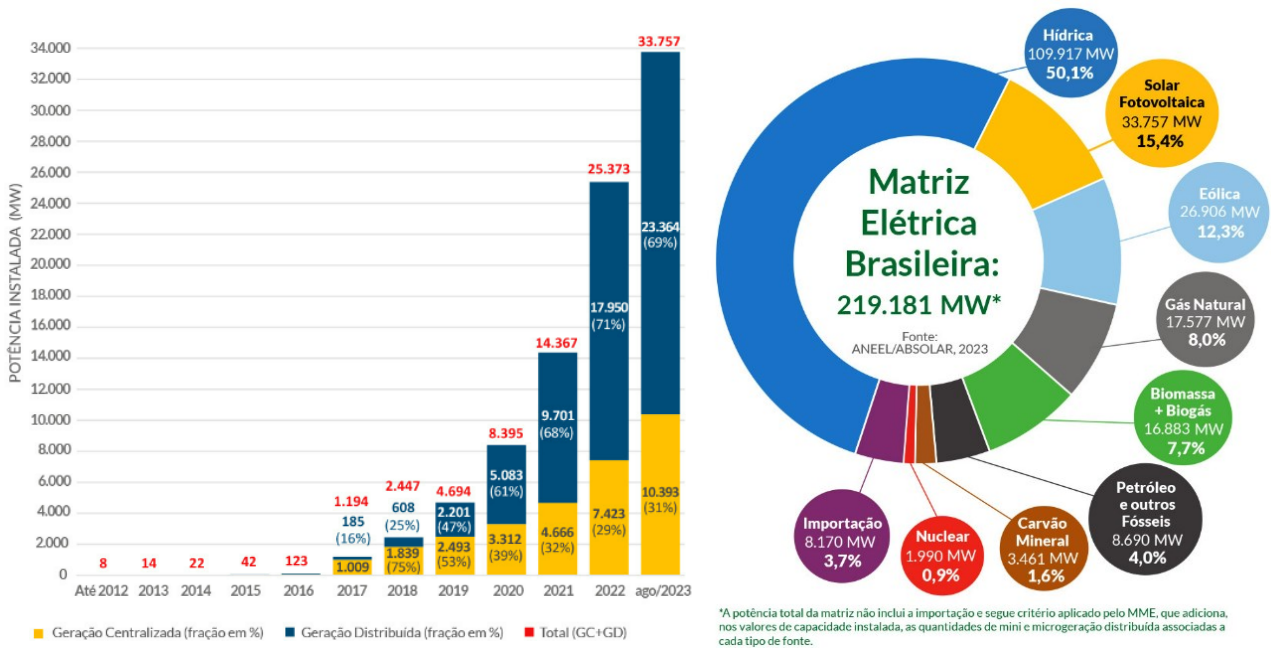


Figura 1 – Crescimento da geração fotovoltaica nos últimos anos e matriz elétrica brasileira (ABSOLAR, 2023).

Com o aumento na adoção de sistemas fotovoltaicos, uma variedade de marcas e modelos de equipamentos fotovoltaicos inundou o mercado (IEA, 2021). No entanto, essa diversidade também levantou preocupações em relação à qualidade e ao desempenho dos sistemas, especialmente em áreas com condições climáticas específicas, como Palmas-TO. A eficácia dos sistemas solares está intrinsecamente ligada à orientação e inclinação dos painéis fotovoltaicos (IRENA, 2020). Portanto, é crucial avaliar se esses sistemas estão gerando energia de acordo com as especificações fornecidas pelos fabricantes.

Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo principal avaliar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos já instalados em Palmas-TO, considerando diversas orientações de telhado. A pesquisa busca determinar se esses sistemas estão produzindo energia de acordo com as especificações dos *datasheets* dos equipamentos e, ao mesmo tempo, examinar como a orientação dos painéis solares afeta seu desempenho em condições locais. Para isso, inicialmente é realizado o cálculo da produtividade média mensal apresentado pelos sistemas instalados para cada orientação considerada. Na sequência, é realizado o cálculo do rendimento global apresentado para cada orientação a partir: (1) das irradiações solares medidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (INMET, 2023); e (2) das médias históricas de irradiações solares para região apresentadas pelo Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB) (CRESESB, 2023). O principal objetivo dessa pesquisa é prover os integradores/instaladores com uma maior previsibilidade de geração e, conseqüentemente, retorno do investimento para (potenciais) UP's.

## 2. METODOLOGIA

O objetivo principal deste trabalho é verificar o desempenho da produção de energia elétrica ao longo de três anos (2020, 2021 e 2022) de sistemas fotovoltaicos conectados à rede instalados em Palmas-TO em diferentes orientações. As orientações foram separadas em quatro representativas (leste, oeste, norte e sul) conforme indicado na roda-dos-ventos da Fig. 2. Por exemplo, uma Unidade Prossumidora (UP) orientada ao norte tem direcionamento delimitado pela região destacada em vermelho.

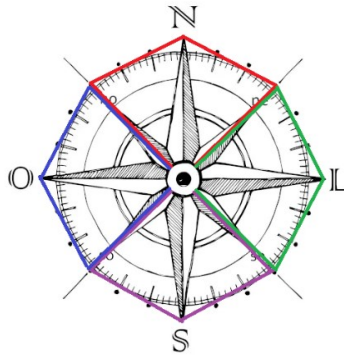


Figura 2 – Roda-dos-ventos indicando as direções analisadas.

Em Júnior *et al.* (2016) pode-se verificar uma simulação das perdas esperadas para cada orientação e inclinações em Palmas-TO. Nesse artigo é mostrado que, como Palmas-TO tem latitude de cerca de  $10^\circ$  ao sul, o posicionamento que não gera perdas em relação à orientação e inclinação se dá para painéis orientados ao norte e com inclinação de  $10^\circ$ . Por conta disso, espere-se que a instalações orientadas ao norte apresentem maiores níveis de produção de energia elétrica, em relação aos sistemas instalados em outras orientações.

A primeira métrica de resultados analisados na comparação das produções de energia elétrica em diferentes orientações é a produtividade média. Para tanto, faz-se necessário calcular a produtividade de cada sistema a Eq. 1 (MARION *et al.*, 2005).

$$Y_f = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt}{P_{cc}} = \frac{E_g}{P_{cc}} \quad (1)$$

Onde:  $Y_f$  é a produtividade do sistema, em kWh/kWp;  $P(t)$  é a potência instantânea de saída em função do tempo considerado, em kW;  $E_g$  é a energia produzida pelo sistema no período  $t_2 - t_1$ , em kWh; e  $P_{cc}$  é a potência nominal do sistema. Logo, a produtividade é um valor que representa a produção de energia, em kWh, por unidade de potência instalada, em kWp.

Após encontrar a produtividade média para cada orientação e ano considerado, é realizada uma estimativa do rendimento global médio resultante de cada orientação. Para tanto, inicialmente considere que o rendimento global pode ser calculado conforme Eq. 2 (VILLALVA, 2015).

$$G = P \times I \times n \times \eta \rightarrow \eta = \frac{G}{P \times I \times n} \quad (2)$$

Onde:  $P$  é a potência instalada do sistema, em kWp;  $I$  é a irradiação solar incidente no plano do sistema em horas de sol pleno, em h/dia;  $n$  é o número de unidades do intervalo de tempo a ser considerado (dias); e  $\eta$  é o rendimento global do sistema.

Neste trabalho, o rendimento global será calculado em relação às irradiações medidas pelo INMET (INMET, 2023) e às médias históricas apresentadas pelo CRESESB (CRESESB, 2023). Em ambas as situações, os níveis de irradiações são apresentados em relação ao plano horizontal. Por conta disso, os rendimentos globais apresentados nesse trabalho serão em relação às irradiações no plano horizontal. Na Eq. 3 é apresentada a maneira como o rendimento global é efetivamente calculado nesse trabalho.

$$\eta = \frac{G}{P \times I \times n} = \frac{P \times I \times n \times \eta}{P \times I \times n} = \frac{1 \times I \times n \times \eta}{1 \times I \times n} = \frac{Y_m}{I \times n} \quad (3)$$

onde  $Y_m$  é a produtividade média obtida para cada orientação. Note que as potências instaladas são aproximadas para um porque a produtividade já reflete a geração para cada kWp instalado.

### 3. RESULTADOS

Nesse capítulo, são apresentados os resultados que demonstram o desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede instalados em Palmas-TO e com registro de geração integralizada para os anos de 2020, 2021 e/ou 2022. O estudo foi realizado a partir da análise dos dados de geração de uma amostra de 343 sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR), considerando os seguintes filtros: (i) a UP precisa ter pelo menos um ano fechado de geração sem interrupções; (ii) os painéis precisam estar instalados em telhados que não sejam promovam sombra entre 9hs e 16hs; (iii) os painéis precisam ter a mesma orientação – em caso de inversor com mais de um MPPT e painéis em diferentes orientações, selecionar apenas UP's que possibilitam o monitoramento de cada MPPT individualmente; e (iv) uma produtividade mensal não pode ser inferior a 60 kWh/kWp, pois pode caracterizar algum tipo de problema no

sistema fotovoltaico. A tolerância para a orientação geográfica é de 45°, isto é, uma UP está orientada para o norte se ela estiver entre o noroeste e o nordeste geográfico. Ademais, vale ressaltar que não foram observados os níveis de sujeidade das instalações. Na Fig. 3 é possível observar a quantidade de UPs filtradas em cada ano e orientação. Note que em anos mais recentes foi possível colher uma amostra maior de sistemas fotovoltaicos com registro de geração em todos os meses. Isso reflete o crescimento exponencial de instalações nos últimos anos em Palmas-TO. Ademais, percebe-se uma quantidade maior de UPs orientadas para o norte, seguido de leste e oeste, o que reflete as orientações priorizadas na instalação em Palmas-TO, devido ao seu posicionamento geográfico.

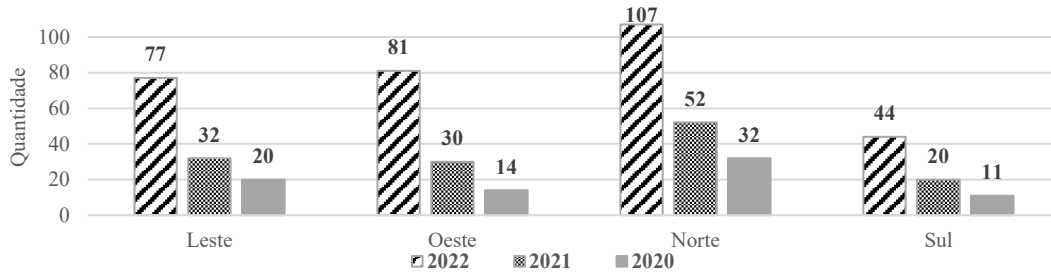


Figura 3 - Unidades prossumidoras analisadas.

Ao observar as gerações mensais desses sistemas em cada ano e orientação, foi possível extrair a produtividade mensal dos sistemas fotovoltaicos. Os resultados podem ser observados na Fig. 4. Perceba que os sistemas orientados ao norte conseguem manter uma produtividade superior em quase todos os períodos e anos. A diferença é mais significativa entre maio e setembro, o que pode ser justificado pelo período em que o sol está mais próximo do hemisfério norte (período em que ocorre o solstício de inverno). Na sequência, em termos de maiores produtividades, tem-se os sistemas orientados para o leste e oeste, que apresentaram valores razoavelmente próximos entre si – com leve vantagem para sistemas orientados ao oeste. Conforme esperado, os sistemas orientados ao sul apresentaram os menores níveis de produtividade na maioria dos meses e anos. Note que o mês em que ocorre o solstício de inverno é quando os sistemas orientados ao sul tendem a ter o menor (ou um dos menores) nível de geração do ano. Em contrapartida, no mês do solstício de verão (dezembro), os sistemas orientados ao sul apresentaram produtividades mais próximas ou até superiores aos sistemas com outras orientações. Ademais, as gerações mais elevadas nos meses de julho, agosto e setembro (principalmente em sistemas orientados para o norte, leste e oeste) acabam refletindo o perfil de maiores níveis de radiação em Palmas-TO nessa época do ano.

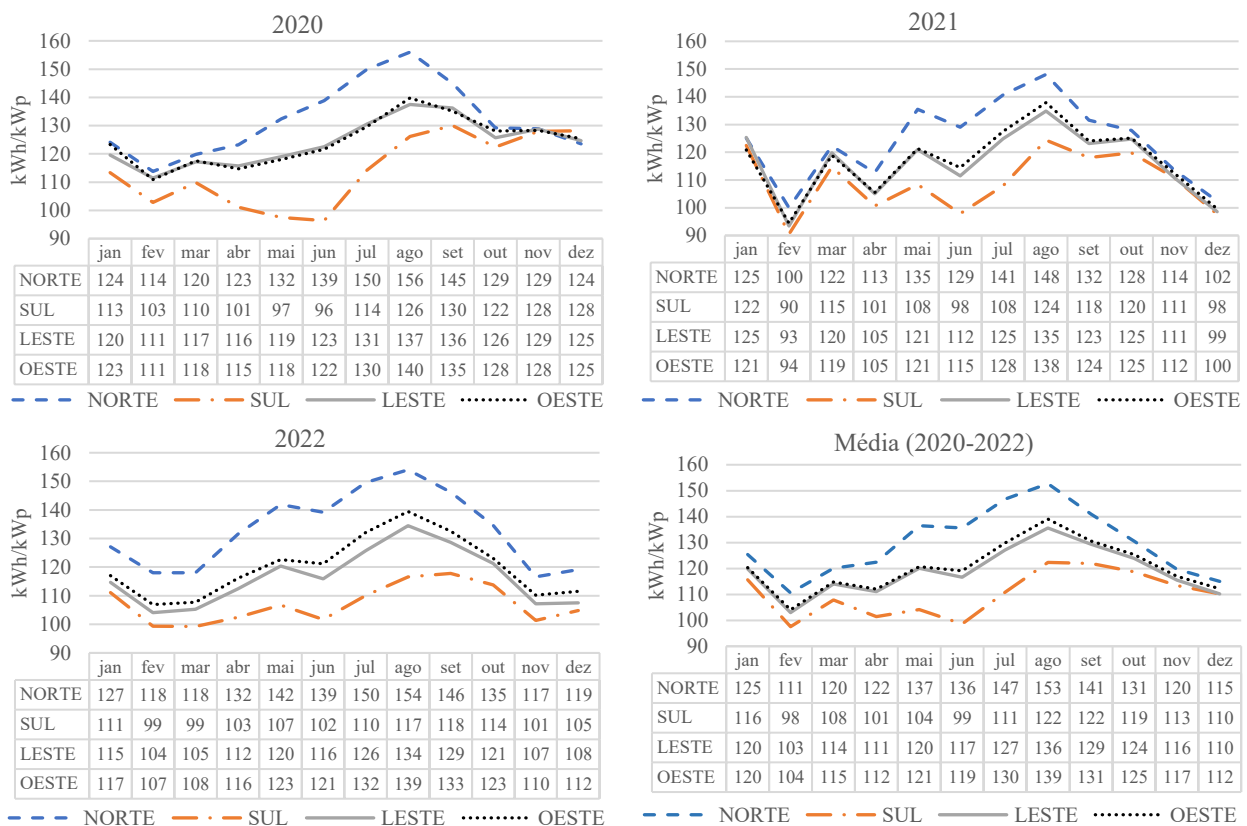


Figura 4 – Produtividades mensais observadas.

Na Fig. 5 são apresentados os valores de produtividade média observados em cada ano e orientação, bem como a média geral (para os três anos) para cada orientação. Perceba que a média dos três anos analisados da produtividade registrada para os sistemas orientados para o norte ficou em 130 kWh/kWp, superando em cerca de 8-9% as produtividades relacionadas com as orientações à leste/oeste (que ficaram muito próximas entre si) e 18% as produtividades relacionadas com os sistemas orientados ao sul. Essas informações são muito interessantes integradores/vendedores de sistemas fotovoltaicos, que podem, a partir desses dados, fazer um dimensionamento rápido na hora de orçar um sistema. Por exemplo, sendo conservador, pode-se generalizar uma produtividade de 120kWh/kWp para sistemas orientados ao norte, 115kWh/kWp para sistemas orientados à leste/oeste e 105kWh/kWp para sistemas orientados ao sul.

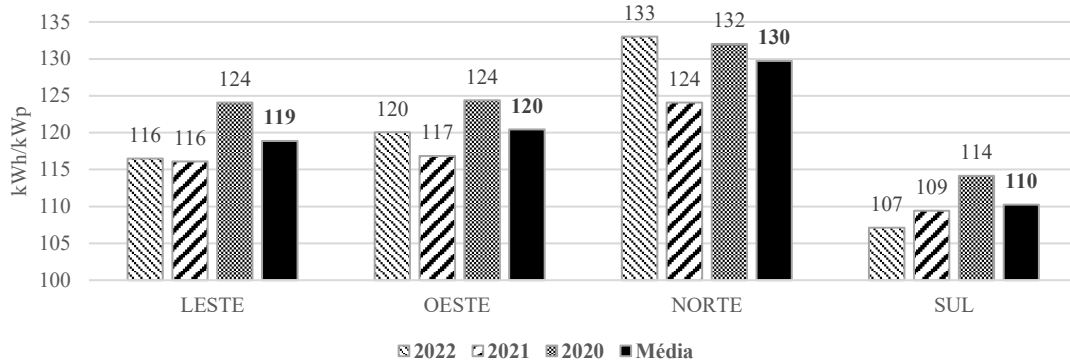


Figura 5 – Produtividades anualizadas.

O próximo passo é comparar as produtividades observadas com: (1) os níveis de irradiação solar medidos pelas estações meteorológicas do INMET; e (2) as médias mensais históricas apresentadas pelo programa SunData, do CRESESB. Os dados do INMET foram obtidos da estação meteorológica automática de Palmas-TO (Estação A009). Na Fig. 6 podem ser observados os níveis de irradiação mensal no plano horizontal registrados pela estação A009 para cada mês dos anos de 2020, 2021 e 2022, bem como as médias históricas apresentadas pelo CRESESB. Vale ressaltar que, como pode ser observado, em alguns meses (nov/2021, dez/2021, mai/2022 e jun/2022) não foram encontrados registros de irradiação solar nos dados históricos do INMET. Perceba, na Fig. 6, que os valores medidos pelo INMET para quase todos os meses foram inferiores à média histórica apresentada pelo CRESESB.

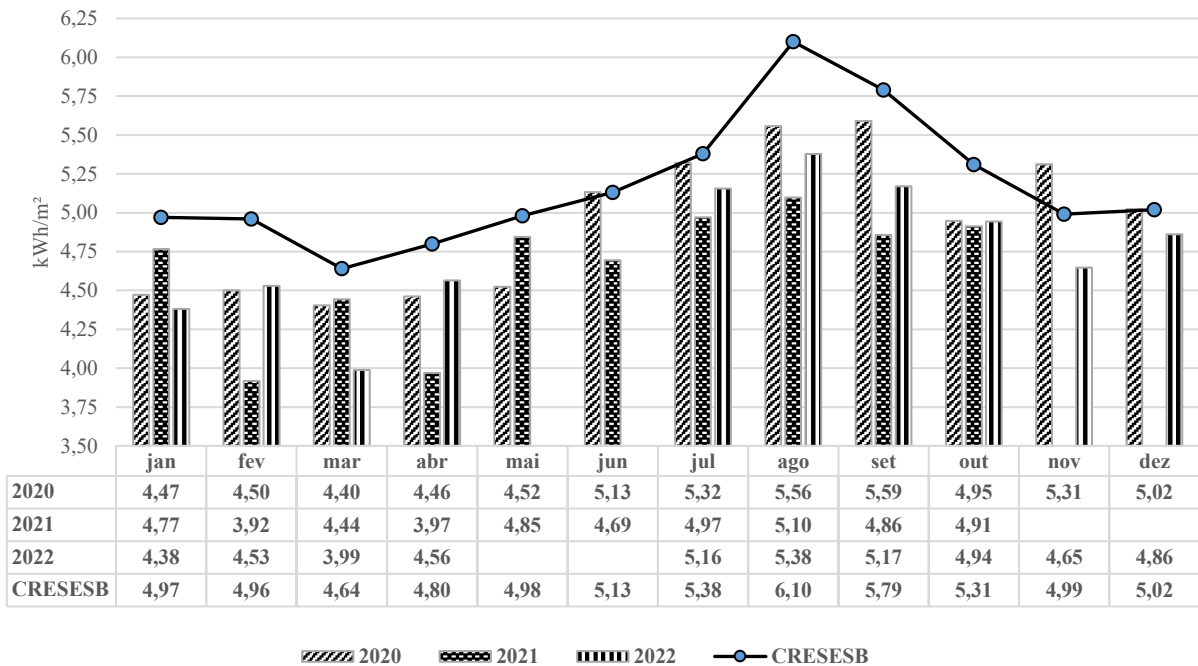


Figura 6 – Radiações medidas pelo INMET vs média histórica do CRESESB.

Conhecidos os valores de irradiação solar registrados pelo INMET em cada mês de cada ano, pode-se calcular o rendimento global dos sistemas com diferentes orientações isolando  $\eta$  da Eq. 3. Os rendimentos globais em cada mês

para cada orientação podem ser observados na Fig. 7. Nessa figura é possível observar os períodos de maior e menor rendimento global apresentados pelos sistemas voltados a cada orientação em relação às irradiações medidas no plano horizontal pelo INMET. Por exemplo, os sistemas orientados ao norte, tem maior rendimento no período em que o sol está mais ao norte (entre abril e agosto) e menor rendimento quando o sol está mais ao sul (entre novembro e janeiro). O inverso ocorre com sistemas orientados ao sul. Já os sistemas orientados à leste e oeste apresentam rendimentos superiores em períodos do ano em que o sol está mais alinhado com a linha do equador, isto é, em datas próximas aos equinócios de outono (março) e primavera (setembro).

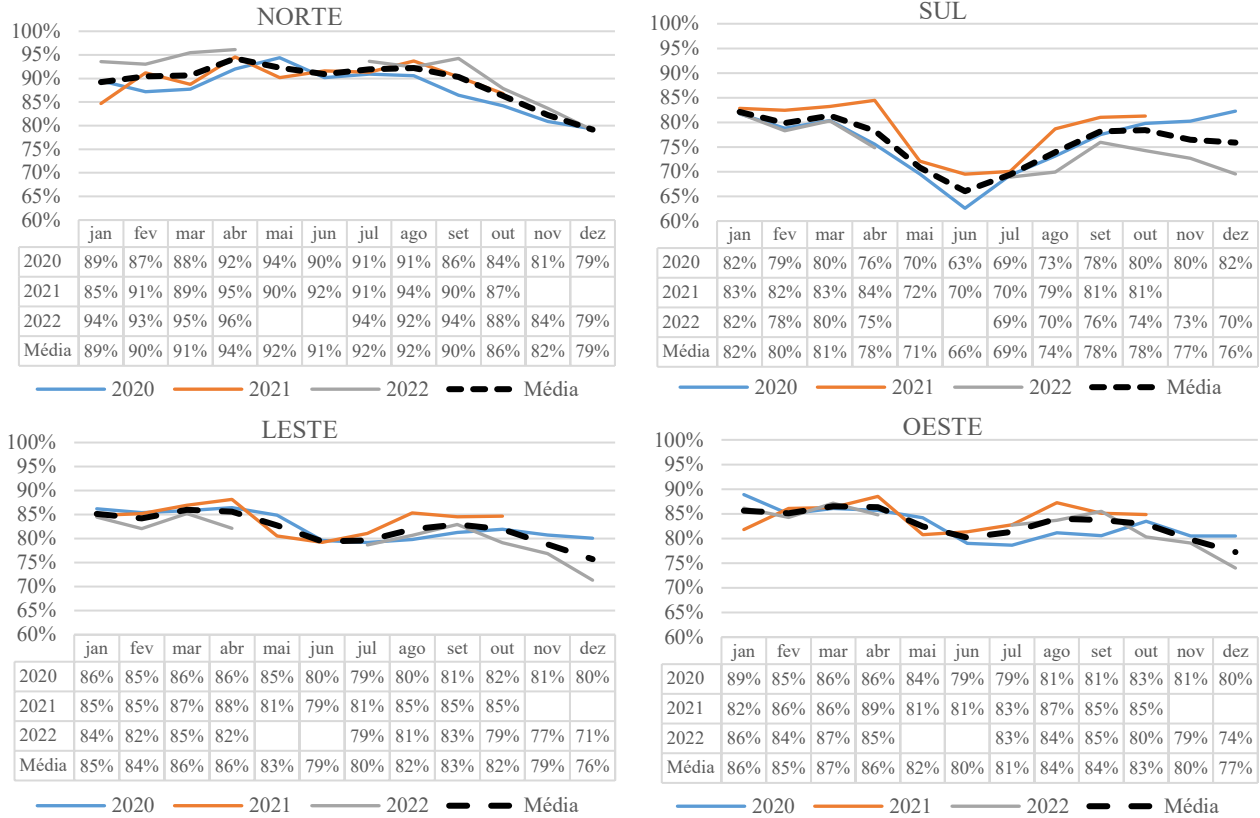


Figura 7 – Rendimento global em cada mês em relação às radiações medidas.

Na Fig. 8 é possível verificar os rendimentos globais anualizados para cada orientação obtidos a partir dos registros históricos de medições do INMET e a partir da média histórica de irradiação informada pelo CRESESB (5,17kWh/m<sup>2</sup>). Perceba que os rendimentos globais são maiores quando considerados os valores medidos pelo INMET, visto que, no geral, eles foram menores que as médias históricas ao longo dos três anos analisados. Como era de se esperar, os sistemas orientados ao norte apresentaram rendimentos globais superiores, seguidos por oeste, leste e sul. Uma das grandes dúvidas que os integradores/vendedores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede têm na hora de dimensionar um gerador fotovoltaico está relacionado com qual valor de rendimento global considerar. A partir dos resultados da Fig. 8, pode-se concluir que, sendo conservador, considerar  $\eta = 80\%$  para sistemas orientados ao norte,  $\eta = 75\%$  para sistemas orientados ao leste/oeste e  $\eta = 70\%$  para sistemas orientados ao sul configura uma boa sugestão de valores a serem utilizados para o rendimento global do sistema.

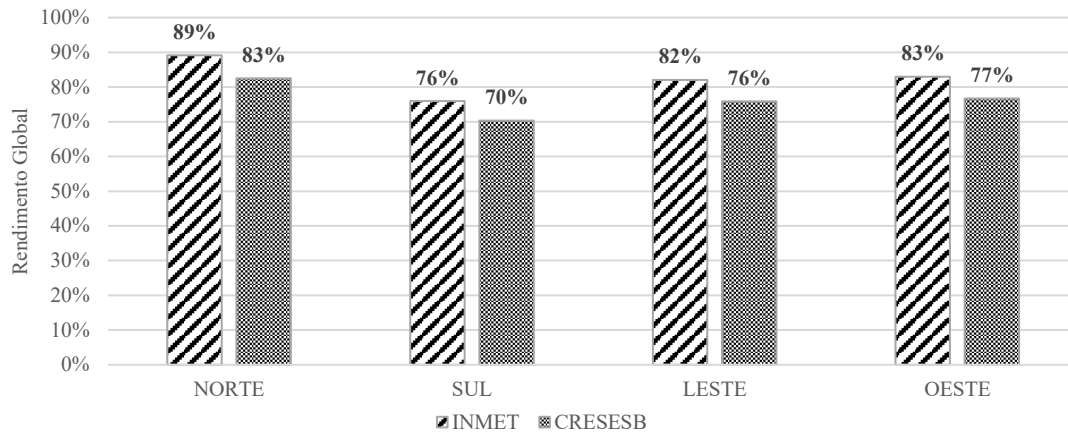


Figura 8 – Rendimento global anualizado por orientação a partir das medições do INMET e do histórico do CRESESB.

#### 4. CONCLUSÕES

Este artigo teve como objetivo avaliar a eficiência da produção de diversos sistemas fotovoltaicos instalados em diferentes orientações na cidade de Palmas-TO. Para isso, foi selecionada uma amostra com 343 sistemas. Dentre os resultados de maior interesse, destaca-se a produtividade média por orientação, bem como o rendimento global extraído com base nos dados medidos do INMET e nas médias históricas informadas pelo CRESESB.

Os resultados mostraram que os sistemas fotovoltaicos conectados à rede instalados em Palmas-TO geraram em média: 119 kWh/kWp para instalações com orientação para o leste; 120 kWh/kWp para instalações com orientação para o oeste; 130 kWh/kWp para instalações orientadas para o norte; e 110 kWh/kWp para instalações para instalações orientadas para o sul. Como esperado, a orientação dos painéis para o norte geográfico proporcionou um maior rendimento do sistema. Ademais, com base nos níveis de irradiância medidos pelo INMET entre os anos de 2020 e 2022, percebeu-se que os sistemas apresentaram perdas globais inferiores a 25%, o que pode ser considerado bem aceitável. Em relação à média histórica do CRESESB, os rendimentos globais oscilaram entre 70%, para sistemas voltados para o sul, e 83%, para sistemas orientados ao norte. Esses dados obtidos para a cidade de Palmas-TO são de grande relevância para prover uma maior previsibilidade de geração, dimensionamento e, conseqüentemente, retorno do investimento para (potenciais) UP's e empresas da região.

#### REFERÊNCIAS

- ABNT, 2012. ABNT NBR 16690:2012 - Sistemas Fotovoltaicos - Requisitos Mínimos para Documentação, Instalação e Operação.
- ABSOLAR, 2023. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Infográfico ABSOLAR nº 59. Disponível em <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>
- ANEEL, 2012. Resolução Normativa nº 482/2012.
- Becquerel, E., 1839. Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. Comptes Rendus, 9, 561-567.
- CRESESB, 2023. Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>.
- Goetzberger, A., & Hoffmann, V. U., 2005. Photovoltaic solar energy generation. Springer Science & Business Media.
- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D., 2017. Solar cell efficiency tables (version 50). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 25(1), 3-13.
- Júnior, A. M., Santana, K. G. S., Macedo, A. C., Nascimento, O. C. S., Silva, S. B., 2023. Análise de Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos com Diferentes Ângulos de Inclinação e Azimute Localizados em Palmas-TO. XIV CEEL, UFU, Uberlândia.
- IEA, 2021. Renewables 2021: Analysis and Forecast to 2026. Agência Internacional de Energia.
- INMET. 2023. Banco de dados de irradiação solar e temperatura ambiente para a estação de Palmas. Disponível em <<https://www.inmet.gov.br/>>.
- IRENA, 2020. Photovoltaic (PV) Power. International Renewable Energy Agency.
- MME, 2020. Balanço Energético Nacional 2020. Ministério de Minas e Energia.
- MARION *et al*, 2005. Performance parameters for grid-connected PV systems. In: IEEE PHOTOVOLTAICS SPECIALISTS CONFERENCE AND EXHIBITION, 31, 2005, Florida. Proceedings. IEEE: Piscataway,.
- REN21, 2020. Renewables 2020 Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
- Villalva, M. G, 2015. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 2. ed. São Paulo: Editora Érica.

## PERFORMANCE OF ON-GRID PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN PALMAS-TO

**Abstract.** *This paper's main objective is to verify the performance of electrical energy production by on-grid photovoltaic systems (OGPS) in the city of Palmas-TO. The main objective is to determine the average monthly productivity (in kWh/kWp) for systems installed in different orientations (east, west, north and south), as well as verify the global efficiencies levels for the irradiation levels measured by the National Institute of Meteorology (INMET). This study includes the participation of companies that, alone, have more than 3,000 systems installed in the State of Tocantins. In this scenario, a sample with 343 installations in the city of Palmas-TO was selected, considering the following filters: (i) the prosumer unit (UP) must have at least one closed year of generation without interruptions, considering the years 2020, 2021 and/or 2022; (ii) the panels must be installed on roofs that do not provide shading between 9 am and 4 pm; (iii) the panels must have the same orientation for each monitorable MPPT (Maximum Power Point Tracking); and (iv) monthly productivity cannot be less than 60 kWh/kWp, as this may characterize some type of problem in the generation of the photovoltaic system. The idea is to provide integrators/installers in the region with results that indicate whether the data reported in the equipment manuals/datasheets are effectively being respected. Furthermore, the results suggest generic values of productivity and global efficiencies that can be used by professionals in the region when designing an OGPS.*

**Keywords:** *On-Grid Photovoltaic Systems, Productivity, Global Efficiency*