

Métricas de Cálculo de Eficiência na Produção de Energia em Plantas Fotovoltaicas

Guilherme D. Yamada*, Paulo C. Stadzisz**, Robson L. Ribeiro***,
 André E. Lazzaretti ****, Elder Oroski*****, Guilherme L. Moritz*****,
 Rubens A. de Faria*****, Clayton H. da Costa*****,
 Marcelo P. Rodrigues*****, Gilberto Lexinoski*****

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR,

*(e-mail: yamada@alunos.utfpr.edu.br). **(e-mail: stadzisz@utfpr.edu.br). ***(e-mail: linhares@utfpr.edu.br).

****(e-mail: lazzaretti@utfpr.edu.br). *****(e-mail: oroski@utfpr.edu.br). *****(e-mail: moritz@utfpr.edu.br).

*****(e-mail: rubens@utfpr.edu.br). *****(e-mail: claytoncosta@alunos.utfpr.edu.br).

*****(e-mail: marcelorodrigues@alunos.utfpr.edu.br). *****(e-mail: gilberto.2015@alunos.utfpr.edu.br).

Abstract: To ensure the return on investment of a grid connected photovoltaic plant, over its lifetime of five years or more, monitoring and guaranteeing its operation efficiency is required. Even though there is no single metric that provides the global efficiency of a photovoltaic plant, it is possible to monitor the plant operational quality by means of a varied set of metrics, referenced on the standards of the area and on technical and scientific publications. This paper conducts a study over performance metrics and selects a set of eight metrics to perform the efficiency analysis of a grid-tie 5 kWp photovoltaic plant. The obtained results from a thirty-day sampling period are presented, allowing one to observe the preliminary behavior and the interrelations between the considered metrics, and enlarging this analysis compared to those commonly found in the literature.

Resumo: O retorno de investimento sobre uma planta fotovoltaica (FV) de geração distribuída ao longo de cinco ou mais anos de vida útil exige o acompanhamento e garantia de eficiência de sua operação. Embora não exista uma métrica única que forneça a eficiência global da planta fotovoltaica, pode-se acompanhar a qualidade de operação da planta por meio de um conjunto variado de métricas referenciadas nas normas e materiais técnicos e científicos da área. Este artigo realiza um estudo sobre métricas de performance e seleciona um conjunto de oito métricas para a realização da análise de eficiência de um sistema fotovoltaico de 5 kWp, conectado à rede elétrica. São apresentados os resultados obtidos em um período de amostragem de trinta dias permitindo observar o comportamento preliminar e as inter-relações entre as métricas consideradas, e tornando esta análise mais abrangente do que comumente encontrado na literatura.

Keywords: Efficiency Metrics; Efficiency Measurement; Solar Energy; Photovoltaic Energy; Performance Ratio.

Palavras-chaves: Métricas de Eficiência; Cálculo de Eficiência; Energia Solar; Energia Fotovoltaica; Taxa de Desempenho.

1. INTRODUÇÃO

A exploração de fontes de energia renovável tem se intensificado em escala global nas últimas décadas. Há uma popularização crescente de plantas fotovoltaicas (FV), geradores eólicos e uso de biomassa, entre outros, em razão da busca por alternativas de fontes energéticas limpas e da evolução tecnológica ocorrida no setor que levou à consequente redução dos custos de aquisição destes sistemas.

No que diz respeito à energia solar FV, a geração de energia ainda não se destaca dentre as outras fontes renováveis, pois representa apenas 1,6% (i.e., 2.878 MW) da potência instalada da matriz energética brasileira (ANEEL/ABSOLAR 2020). Entretanto, o interesse por esta fonte energética tem

crescido fortemente a partir de 2017, entre outros, incentivado pelos programas do governo federal e governos estaduais. Adicionalmente, a redução dos custos de aquisição de plantas FV e a criação de políticas de geração distribuída no país, incentivaram tanto investimentos na construção de plantas FV de grande porte, quanto a disseminação de pequenas plantas de uso residencial, em pequenas empresas e na área rural. Considerando, ainda, a grande disponibilidade de irradiação solar em todo o país, a expectativa é de que o uso de energia fotovoltaica continue a se expandir ao longo dos próximos anos e décadas.

Existem três tipos principais de interesses que motivam a adoção de energia FV. O primeiro deles está ligado à questão ambiental. Sem considerar a fabricação dos materiais, a

geração de energia FV não produz emissões de gases, nem outros resíduos, ao ambiente. Desta forma, ela é considerada uma energia renovável e limpa, com pouco impacto ambiental. O segundo interesse está relacionado com as estratégias energéticas nacionais visando a diversificação na oferta global de energia e uma maior segurança energética e sustentabilidade. O terceiro interesse na adoção de energia fotovoltaica é de caráter econômico. Esta fonte permite a geração de energia a um custo menor ao consumidor do que a energia gerada por fontes convencionais e fornecida pelas concessionárias (Nakabayashi 2014).

O investimento necessário para a aquisição de uma planta FV ainda é considerável, mesmo com as reduções de custo e políticas de incentivo existentes. Como exemplo, a planta FV de 5kWp apresentada no caso de estudo do seção 5, foi adquirida (incluindo instalação e comissionamento) a um valor de R\$ 25.000,00. Por outro lado, as plantas FV têm uma longevidade crescente. Os principais fabricantes de módulos fotovoltaicos têm oferecido garantias de operação de 10 a 20 anos, ou até mais (Canadian Solar 2016). Outros componentes destas plantas podem ter longevidade menor, mas são comumente superiores a 10 anos (como no caso dos inversores). Assim, o emprego de energia fotovoltaica envolve um investimento inicial substancial, com retorno gradual ao longo de diversos anos de operação da planta.

Para alcançar seu propósito econômico até o final de sua vida útil, a planta FV deverá manter uma certa “qualidade de operação” ao longo dos anos, ou seja, a planta deverá gerar a potência esperada, segundo as estimativas feitas durante seu projeto. Pode-se, genericamente, denominar esta qualidade de operação de “eficiência da planta fotovoltaica”. Dito de outra forma, a eficiência da planta representaria o quão bem os seus recursos de captação e conversão de energia estão operando. Diversas formas de falhas e perdas, entretanto, tenderão a afetar esta eficiência ou qualidade de operação, podendo colocar em risco ou alongar o retorno de investimento. Alguns exemplos comuns de perdas e falhas são: curto-circuito de um módulo, falha por circuito aberto, degradação de células FV, perdas por sombreamento, sujidade e por temperatura elevada dos módulos FV (Kumar and Kumar 2017).

Falhas e perdas provocam quedas de desempenho da planta e, conseqüentemente, a redução de sua eficiência. Assim, o acompanhamento da eficiência da planta FV ao longo de sua vida útil pode colaborar para a manutenção de seu rendimento, visando garantir a qualidade da geração de energia e o retorno de investimento no prazo previsto. Diversos estudos (Khalid *et al.* 2016), (Kumar and Kumar 2017), (Ayompe *et al.* 2011), além de normas do setor (e.g. IEC 61724), apresentam métricas para este acompanhamento, incluindo o PR - *Performance Ratio*, o CUF - *Capacity Utilization Factor* e o Y_f - *Final Photovoltaic System Yield*, entre outras. Entretanto, não há uma proposição de métrica de eficiência para plantas FV. A eficiência é avaliada segundo pontos de vistas variados em diferentes estudos, destacando-se o cálculo de PR.

Este artigo aborda a questão do cálculo da eficiência de plantas fotovoltaicas, fazendo uma revisão das métricas mais

comumente empregadas e aplicando estas métricas em um caso de estudo de uma planta fotovoltaica de 5 kWp na UTFPR. Propõe-se analisar a eficiência da planta por meio de um conjunto de 8 métricas, tornando esta análise mais abrangente do que comumente encontrado na literatura.

O artigo está organizado em 4 seções, além desta introdução. A seção 2 apresenta os trabalhos relacionados, enquanto a seção 3 descreve as principais métricas relacionadas com a eficiência de plantas fotovoltaicas. A seção 4 descreve um caso de estudo de análise preliminar de eficiência e a seção 5 apresenta as conclusões do estudo.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

A norma IEC 61724 (IEC *et al.* 1998) define orientações para a realização do monitoramento de performance de sistemas fotovoltaicos. As métricas e equações da norma são empregadas pela indústria e em estudos científicos para avaliar diferentes aspectos dos sistemas FV. Como exemplo, Aristizábal and Gordillo (2008) utilizam métricas da norma IEC para avaliar a performance, durante dois anos, de um sistema FV integrado a um edifício. Kymakis *et al.* (2009) analisam a performance de um parque FV de 171,36 kWp na Grécia, pelo período de 1 ano. Ramgolam and Soyjaudah (2017) utilizam as métricas da norma para avaliar um sistema de 2,45 kWp pelo período de cinco anos. Necaibia *et al.* (2018) apresentam a análise de um sistema FV de 2,5 kWp instalado na região sul da Argélia, no deserto do Saara.

Khalid *et al.* (2016) realizam uma revisão sobre diferentes medidas de análise de performance presentes na literatura, com foco em PR. O cálculo mais comum de PR encontrado na literatura é a relação entre a produtividade final e produtividade de referência do sistema, ou seja, medidas de energia produzida dividida pela potência nominal do gerador FV e da irradiação dividida pelo valor das condições padrão de teste (*Standard test conditions – STC*) de irradiação (1000 W/m²), sob o período analisado. Essa métrica é utilizada em variados estudos com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema. Do Nascimento *et al.* (2020) realizam uma avaliação de desempenho completa de seis tecnologias de módulos FV em oito instalações idênticas espalhadas pelo Brasil, pelo período de um ano. O PR é utilizado para avaliar o desempenho de cada tecnologia em oito climas diferentes. O PR também é utilizado para avaliar plantas FV sob diferentes condições. Hachicha *et al.* (2019) estudam o efeito de poeira intensa sobre os módulos FV na região dos Emirados Árabes Unidos, ao comparar PR's de um módulo FV limpo e um módulo FV sujo. Liu *et al.* (2014) estudam o efeito de neblina sobre o PR em Singapura. Além disso, Chine *et al.* (2014) apresentam a utilização de medidas de PR como instrumento para detecção de falhas em um sistema FV ao comparar os valores da métrica medido e simulado.

Além de PR, a norma IEC 61724 apresenta métricas de produtividade (*Yield - Y*), eficiências de componentes do sistema FV (η), perdas (L) e produção de energia (E_{CA}). Essas métricas são utilizadas em Ayompe *et al.* (2011) para a avaliação de um sistema de 1,72 kWp instalado na Irlanda, e em Trillo-Montero *et al.* (2014) na aplicação de *software*

proposta no artigo, que analisa a eficiência de sistemas FV utilizando dados de um sistema de monitoramento.

Além das métricas apresentadas na norma, o fator capacidade (*Capacity Utilization Factor* - CUF) é uma métrica que permite avaliar o desempenho de produção da planta FV apenas com medidas de potência e é utilizado por investidores e projetistas.

Townsend *et al.* (1994) apresentam uma métrica de análise de performance de sistema FV além da norma, chamando-a de *Performance Index* (PI). O PI tem por objetivo eliminar o efeito de perdas providas de fatores ambientais que afetam o sistema FV, como sujidade, de modo a representar apenas as perdas ditas inevitáveis do sistema FV. Leloux *et al.* (2012) utilizam ambos PR e PI para avaliar o desempenho de um total de 6868 plantas FV de diferentes tecnologias na França, no período de um ano. Dierauf *et al.* (2013) propõem uma variação de PR, o PR corrigido pelo clima. Esse índice tem por objetivo diminuir a influência da temperatura sobre o desempenho do sistema FV, de modo que essa medida não possui grande variação ao decorrer do ano. Essas métricas não são utilizadas neste trabalho pela necessidade de medições de longos períodos para executar os cálculos de maneira correta.

As métricas discutidas nos trabalhos relacionados citados são utilizadas de uma forma não padronizada. O PR é a métrica mais utilizada para estudos de desempenho, mas poucos trabalhos, como Ayompe *et al.* (2011), exploram as variadas métricas disponíveis.

Para realizar a análise de performance, segundo as métricas da norma IEC, são necessárias medições de irradiância incidente ao módulo FV, de potências CC do arranjo FV e potências CA de saída do inversor para obter informações de energia produzida pela planta FV. Essas medidas são normalmente monitoradas em períodos de um ano ou mais para realizar um estudo da planta sob todas as condições climáticas que influenciam na produção de energia.

3. MÉTRICAS DE EFICIÊNCIA

Um conjunto de oito métricas foi selecionado dentre as mencionadas na seção anterior para realizar a “análise de eficiência” da planta FV. Os cálculos de eficiência resultam em valores que caracterizam a qualidade de operação da planta. As equações apresentadas constam da norma IEC 61724 (IEC 1998) “*Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurement, data exchange and analysis*”, do review de Kumar, M. “*Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review*” (Kumar and Kumar 2017) e do artigo “*Performance ratio—Crucial parameter for grid connected PV plants*” (Khalid *et al.* 2016). As métricas selecionadas são detalhadas a seguir.

Energia de Saída (E_{CA} - Energy Output) (Wh): é a medida da energia CA produzida pelo sistema FV e fornece a informação da energia final entregue à rede da concessionária em sistemas conectados à rede elétrica, em um dado período. É calculada pela multiplicação da somatória das potências de

saída do inversor pelo período de registro τ_r (h), conforme formulado em (1) (Khalid *et al.* 2016), na qual $P_{i,CA}$ (W) indica a potência CA medida no instante de amostragem i . O período de registro τ_r é dado pelo inverso da frequência de registro, ou amostragem, do sinal. A energia CA é o produto final do sistema FV e é gerada após a captação da energia fotovoltaica e inversão da potência CC pelo inversor solar. O valor esperado desta medida está relacionado com o menor entre a potência do inversor e a potência do arranjo FV, uma vez que, por exemplo, o inversor limita a potência de saída de acordo com seu valor nominal.

$$E_{\tau,CA} = \tau_r \times \sum_{\tau} (P_{i,CA}) \quad (1)$$

Taxa de Desempenho (PR - Performance Ratio) (%): é um fator de qualidade da planta fotovoltaica que representa a relação entre a “produtividade real” (Y_f) do sistema e a “produtividade teórica” (Y_r), sem perdas, que a energia solar é capaz de fornecer, em um dado período, conforme formulado em (2) (Kumar and Kumar 2017). O *Performance Ratio* é afetado pelas diversas perdas que ocorrem na planta fotovoltaica, geradas por fatores como a temperatura dos módulos, sujeira, perdas em cabeamento e degradação dos componentes.

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} = \frac{E_{CA}/H}{P_n/G_0} \quad (2)$$

O *Performance Ratio* pode ser utilizado para comparar sistemas FV diferentes em relação ao desempenho de produção. Para isso, costuma-se realizar medições de período de um ano ou mais para diminuir os efeitos de sazonalidade do local de instalação do sistema. É possível comparar diferentes sistemas em períodos menores se estiverem sob as mesmas condições climáticas, de modo que as perdas causadas por fatores externos à planta FV sejam similares. No caso de estudo, descrito na seção 4, aplica-se essa métrica para a avaliação de desempenho da planta FV no período considerado, e não para comparação de sistemas diferentes.

A produtividade final do sistema FV (Y_f , em h) e a produtividade de referência (Y_r , em h), componentes do cálculo do PR, são apresentadas em (3) e (4) (Khalid *et al.* 2016), respectivamente. A produtividade é uma relação entre energia medida e potência nominal. Assim, a produtividade final é a relação entre energia entregue pelo sistema FV (E_{CA}) e a potência nominal do gerador FV (P_n) e a produtividade de referência é a relação da irradiação solar medida (H) pela irradiação das condições STC de $G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$. A irradiação é calculada de forma análoga à energia de saída do sistema, substituindo as variáveis de energia e potência pelas correspondentes, irradiação e irradiância, respectivamente.

$$Y_f = \frac{E_{CA}}{P_n} \quad (3)$$

$$Y_r = \frac{H}{G_0} \quad (4)$$

A produtividade final do sistema pode ser medida em horas, representando o tempo necessário para que o sistema, trabalhando em potência nominal, produzisse a energia medida. Analogamente, a produtividade de referência representa a quantidade de horas necessárias para a irradiância de STC gerar energia equivalente à irradiação medida. Adicionalmente, a produtividade pode ser utilizada como referência de produção de um local para avaliação de instalação de plantas FV (Khalid *et al.* 2016).

Neste artigo optou-se por utilizar as métricas de produtividade (Y_f e Y_r) exclusivamente para o cálculo do PR, ao invés de utilizá-las como métricas de eficiência, uma vez que o resultado de produtividade apresenta significado muito próximo ao do próprio PR, sendo mais utilizado na comparação de plantas FV diferentes em condições semelhantes de sazonalidade, que não é o foco deste trabalho.

O PR de 80% indica, em média, um bom funcionamento para os atuais sistemas FV (Reich *et al.* 2012). Essa métrica permite avaliar o desempenho global do sistema FV.

Fator de Capacidade (CUF – Capacity Utilization Factor) (%): é o fator que indica a relação da energia produzida pela planta fotovoltaica (E_{CA}) e a energia máxima teórica produzida em um dado período nas condições STC para uma planta FV. Pode ser interpretado também como a relação da produtividade final do sistema e o período total de monitoramento. A equação (5) (Kumar and Kumar 2017) apresenta o cálculo do fator de capacidade para o período de um ano, enquanto (6) (Kumar and Kumar 2017) apresenta o cálculo do fator de capacidade para o período de um dia com “*h/d of the peak sun*” equivalente à produtividade final do sistema no período de um dia.

$$CUF = \frac{Y_{f,a}}{24 \times 365} = \frac{E_{CA,a}}{P_{mp(rated)} \times 8760} \quad (5)$$

$$CUF = \frac{h}{d} \text{ of the peak sun} / 24 \quad (6)$$

Eficiência do Arranjo Fotovoltaico (η_A - Array Efficiency) (%): é a medida percentual média que indica a qualidade da conversão de energia solar (irradiação) incidente no plano do arranjo FV em energia elétrica em um período. Alternativamente, esta medida de eficiência pode ser computada para um dado instante, considerando o período de registro (τ_r) como o período da medida (τ).

Um arranjo fotovoltaico com $\eta_A = 100\%$, indicaria ausência de perda ou desperdício algum na captura da radiação solar e na conversão FV no período analisado. O processo de conversão de energia solar possui tipicamente baixa eficiência. Por exemplo, a especificação do módulo MaxPower CS6U-330P da Canadian Solar aponta uma eficiência máxima de 16,97%. A medida de η_A é calculada conforme formulação apresentada em (7) (IEC 1998), de forma que $\eta_{Amean,\tau}$ (%) representa a média da eficiência no período τ monitorado, $E_{A,\tau}$ (Wh) representa a energia produzida pelo arranjo FV no mesmo período, A_a (m²)

representa a área total da superfície do arranjo FV, τ_r (h) representa o período de registro dos sinais medidos e G_I (W/m²) representa a irradiância incidente no arranjo, de modo que sua somatória equivale à irradiação para o período considerado. O valor deve, normalmente, ficar abaixo da eficiência padronizada dos módulos que compõem o arranjo FV correspondente (dados do fabricante), uma vez que estes são medidos sob STC. Os valores medidos sob STC não necessariamente correspondem ao valor máximo que pode ser alcançado, mas apresentam um valor alto, realizado sob condições padronizadas, que são dificilmente superadas em um sistema real. Do Nascimento *et al.* (2020) encontraram em seu trabalho valores de irradiância superiores aos 1 kW/m² das STC, mas essa medição ocorreu poucas vezes e por períodos curtos de tempo. Fatores que afetam a eficiência do painel FV incluem a temperatura dos módulos, sujeidade, perdas em cabeamento, degradação dos componentes e efeitos ópticos da luz, como reflexão da luz na superfície do módulo e absorção efetiva dos fótons. Essa métrica concede uma visão mais específica do desempenho do conjunto de módulos FV, e não da planta como um todo.

$$\eta_{Amean,\tau} = \frac{E_{A,\tau}}{(A_a \times \tau_r \times \sum_{\tau} G_I)} \quad (7)$$

Eficiência do Inversor (η_{inv} - Inverter Efficiency) (%): é a medida percentual (média) que indica a relação da energia elétrica CA de saída do inversor (E_{CA}) com a energia elétrica CC de entrada (E_{CC}), em um dado período, conforme formulado em (8) (Kumar and Kumar 2017). Alternativamente, esta medida de eficiência pode ser computada para um dado instante, considerando o período de registro τ_r como o período da medida e realizando uma relação entre os valores de potências de entrada e saída do inversor. Além disso, essa medida engloba a eficiência do algoritmo do rastreador de ponto de máxima potência (*Maximum power point tracking - MPPT*) do inversor solar. O valor máximo teórico da medida é informado pelo fabricante no datasheet do produto. Essa métrica concede uma visão mais específica do desempenho do inversor solar.

$$\eta_{inv} = \frac{E_{CA}}{E_{CC}} \quad (8)$$

Eficiência do Sistema (η_{sys} - System Efficiency) (%): é a medida percentual (média) que indica a relação entre a energia que é injetada na rede da concessionária (E_{CA}) e a energia capturada pelo arranjo FV, em um dado período. Alternativamente, esta medida de eficiência pode ser computada para um dado instante. Pode ser calculada pela multiplicação das eficiências do arranjo FV e de carga do sistema (η_{LOAD}), conforme formulado em (9) (IEC 1998). Para um sistema *grid-tie* sem baterias, a eficiência da carga é equivalente à eficiência do inversor, como apresentado em (10) (IEC 1998). Essa métrica avalia o desempenho do sistema FV de modo diferente do PR, focando na eficiência de conversão da energia solar em energia elétrica.

$$\eta_{sys} = \eta_{Amean,\tau} \times \eta_{LOAD} = \frac{E_{CA}}{A_a \times H} \quad (9)$$

$$\eta_{LOAD} = \frac{E_{CA,\tau}}{E_{CC,\tau}} = \eta_{inv} \quad (10)$$

Perdas de Captura do Arranjo Fotovoltaico (L_c - Array Capture Loss) (h): representa as perdas decorrentes do processo de captura de energia solar pelo gerador FV, em um dado período. Envolve perdas por fenômenos de reflexão da luz, perdas por sujeira no módulo FV, perdas por temperatura dos módulos, perdas na conversão fotovoltaica, entre outras. A perda de captura, de acordo com a norma IEC 61724 (IEC 1998) é calculada pela diferença entre a produtividade de referência e produtividade do arranjo FV (Y_A), conforme formulado em (11) (IEC 1998), com Y_A apresentado em (12) (IEC 1998). L_c indica a quantidade de horas de produção perdidas no processo de captura da energia solar, em um dado período.

$$L_c = Y_r - Y_A \quad (11)$$

$$Y_A = \frac{E_A}{P_n} \quad (12)$$

Perdas do BOS (L_{BOS} - Balance of System Loss) (h): representa as perdas que ocorrem nos componentes do sistema FV com exceção dos módulos FV (balanço do sistema), em um dado período. Envolve perdas de cabeamento, perdas no inversor, perdas por temperatura dos componentes do sistema, entre outras. A perda do BOS, de acordo a norma IEC 61724 (IEC 1998), é calculada pela diferença entre a produtividade do arranjo FV e produtividade final do sistema FV, conforme formulado em (13) (Khalid *et al.* 2016). L_{BOS} indica a quantidade de horas de produção perdidas por conta do BOS, em um dado período.

$$L_{BOS} = Y_A - Y_f \quad (13)$$

4. CASO DE ESTUDO

Uma planta FV *grid-tie* sem *backup*, de 5 kWp, instalada na UTFPR na cidade de Curitiba-PR, foi monitorada pelo período de um mês, entre 18 de abril e 17 de maio de 2020. A planta está localizado nas coordenadas $-25,438686^\circ$ (latitude) e $-49,268487^\circ$ (longitude) e seus 16 módulos estão orientados ao norte com inclinação igual à latitude. O gerador FV da planta é composto por duas *strings* de oito módulos de silício policristalino Canadian Solar de 330 W (Canadian Solar 2016) conectadas a um inversor solar NHS (NHS Solar 2018) de potência nominal de 5 kW. O monitoramento da planta é feito por um sistema desenvolvido pela equipe de pesquisa utilizando um controlador cRIO-9039, apresentado na Fig. 1, da NI contendo 4 módulos de aquisição de sinais. Os circuitos em FPGA e o *software* de processamento foram desenvolvidos em LabVIEW (da Costa *et al.* 2019).

As variáveis elétricas foram coletadas a uma taxa de 25 kSamples/s, integralizadas no tempo e salvas em intervalos de 1 s, e as variáveis ambientais foram coletadas e salvas a intervalos de 1 s, junto às variáveis elétricas.

Normalmente os dados de sistemas FV monitorados possuem intervalos de amostragem maiores (i.e. uma hora), entretanto de acordo com Haerberlin and Beutler (1995) amostragens de intervalos menores também são úteis, pois permitem uma análise mais detalhada da variação do desempenho da planta FV. O relatório da tarefa 13 do projeto IEA PVPS (Woyte *et al.* 2014) recomenda ainda que a amostragem de dados de variáveis elétricas seja realizada a cada segundo, ou numa frequência ainda maior, e que a média dos dados seja realizada e salva a intervalos de 5 a 15 minutos. Desse modo pode-se reduzir o tempo para detectar falhas e diminuir os custos resultantes desta falha. Em do Nascimento *et al.* (2020), por exemplo, as variáveis elétricas e ambientais são monitoradas em intervalos de 1 segundo, e os valores médios são calculados e salvos em intervalos de 1 minuto. Diferentemente do trabalho proposto por do Nascimento *et al.* (2020) este trabalho realiza a análise de um único sistema FV, ao invés de compará-lo com outros.



Fig. 1 NI cRIO-9039 em que o sistema de monitoramento é implementado

As métricas são normalmente utilizadas considerando períodos longos, de um ano ou mais, diferentemente deste estudo. Entretanto, há vantagens em estudos de menor período. De acordo com o relatório técnico do laboratório nacional de energias renováveis dos Estados Unidos (NREL) (Kurtz *et al.* 2013) análises de períodos curtos, além da vantagem mais simples do menor tempo necessário para completar o monitoramento, possibilitam obter resultados sobre a performance do sistema que podem ser usados para atuar na ocorrência de falhas de maneira mais rápida. Marion *et al.* (2005) afirmam que análises de períodos curtos podem ser úteis para identificar ocorrências de falhas de componentes.

Os resultados da análise preliminar de eficiência são apresentados na Tabela 1. Salienta-se que os dados de potência medidos em períodos em que o inversor encontrava-se desligado não foram considerados, pois não caracterizam a planta em funcionamento.

Tabela 1. Resultados da análise mensal de eficiência

E_{CA} (kWh)	PR (%)	CUF (%)	η_A (%)
624,125	83,67	16,42	14,76
η_{inv} (%)	η_{Sys} (%)	L_c (h/m)	L_{BOS} (h/m)
96,22	14,20	18,42	4,65

A energia total produzida nos trinta dias foi de 624,125 kWh, com um PR mensal de 83,67% e CUF mensal de 16,42%. O PR ficou acima da referência de 80%, caracterizando uma boa performance da planta FV. De acordo com Benedito (2009), o CUF no Brasil varia entre 13% e 18%, logo a planta também teve um bom resultado em relação a esta métrica. A η_A obteve resultado de 14,76%, próximo à eficiência padronizada do módulo FV, que é de 16,97%, de acordo com o *datasheet* do mesmo, e a η_{inv} obteve resultado de 96,22%, próximo ao valor máximo (médio) de 97,8% do inversor, indicado no manual. L_C apresentou perdas de 18,42 h/m, que é quatro vezes maior que as perdas L_{BOS} de 4,65 h/m, relacionadas aos componentes sistema FV à exceção dos módulos FV (i.e., BOS). Isto indica que as perdas na captura da energia solar foram as mais significativas.

Uma análise diária das métricas durante o período de trinta dias monitorado é apresentada nas Fig. 2 à Fig. 6. As condições climáticas no período monitorado foram, no geral, de muita pouca chuva, com temperatura ambiente média de 17,4°C e temperatura dos módulos FV média de 22°C.

O maior PR diário, de 86,92%, ocorreu no dia 18 de abril, apesar de ser o dia com menor irradiação dentro do período monitorado. Neste dia, as métricas de η_{inv} e η_{sys} também são as maiores do período, com valores de 99,57% e 14,75%, respectivamente, além de ser o dia de menor L_{BOS} , igual a 0,006 h/d, e de segunda menor L_C , além de ter menor média de temperatura dos módulos FV, igual a 16,15°C. Em razão da baixa irradiação, também é o dia de menor CUF e E_{CA} , com valores de 5,67% e 7,181 kWh. Em contrapartida, o dia de maior irradiação foi o dia 22 de abril, com PR de 83,08%. Foi o dia de maiores valores de CUF e E_{CA} , 21,8% e 27,627 kWh, mas de maior L_{BOS} , de 0,232 h/d. O dia de menor PR foi 17 de maio, com a métrica no valor de 74,36%. Esse dia apresentou também os menores valores para as métricas de η_A e η_{sys} , 13,09% e 12,62%, respectivamente, e o maior valor de L_C de 1,333 h/d. Os dias 12 e 13 de maio, com valores de PR de 85,78% e 86,79%, respectivamente, também tiveram métricas com valores de destaque. O dia 12 apresentou o maior η_A , 15,26%, e o menor η_{inv} , 95,35%. O dia 13, por sua vez, apresentou o menor L_C , 0,199 h/d, e o valor de PR de 86,79%, muito próximo ao máximo valor medido, mostrando o impacto das perdas de captura no PR. Como foi o dia de segunda menor irradiação, CUF e E_{CA} também foram baixos, com valores de 5,84% e 7,394 kWh, os segundos menores, dentro de suas respectivas métricas, no período analisado.

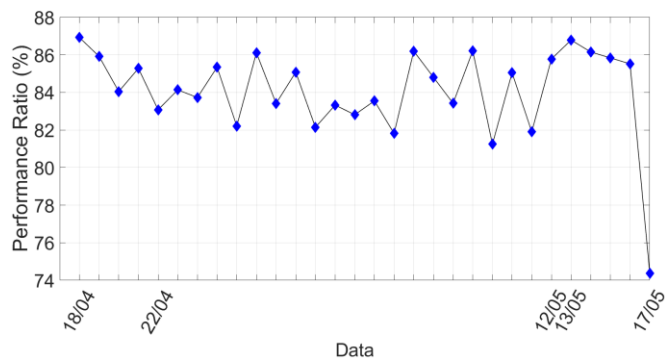


Fig. 2 Performance Ratio (PR) diário do sistema FV, no período analisado.

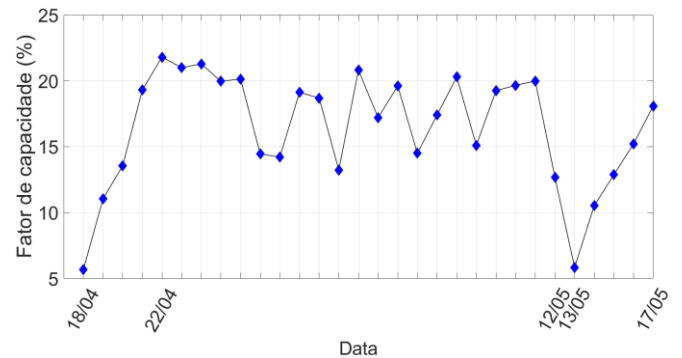


Fig. 3 Fator de capacidade (CUF) diário do sistema FV, no período analisado.

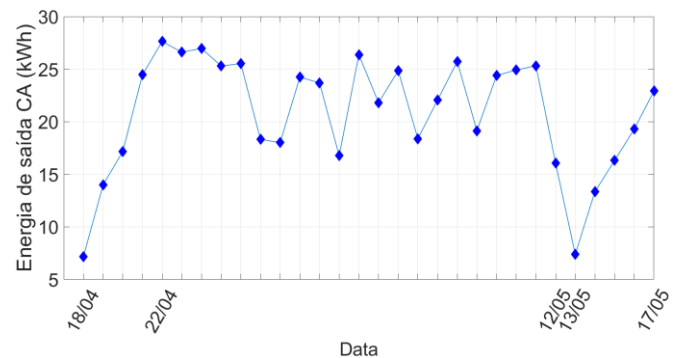


Fig. 4 Energia diária produzida no período analisado.

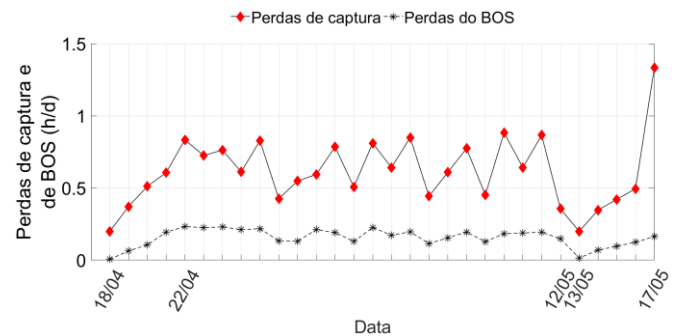


Fig. 5 Perdas diárias de captura e do sistema FV, no período analisado.

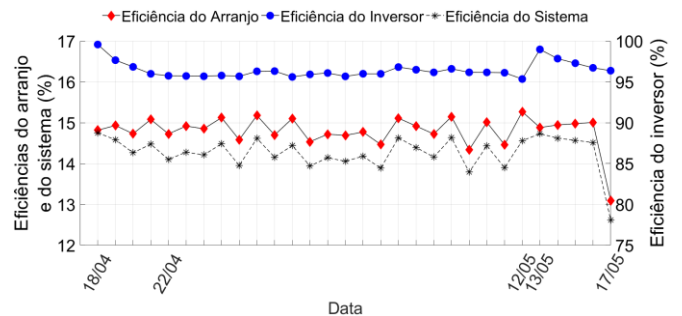


Fig. 6 Eficiências diárias do arranjo, do inversor e do sistema FV, no período analisado.

A Tabela 2 apresenta os valores de desvio padrão (e percentual do desvio padrão) das métricas da análise de eficiência, em que p.p. indica a unidade de pontos percentuais. Os valores nesta tabela permitem avaliar o quão instáveis ou variáveis foram as medidas das métricas ao longo dos dias da monitoração.

Tabela 2. Desvios padrões das métricas de eficiência no período de 18 de abril a 17 de maio de 2020

E_{CA} (kWh %)	PR (p.p. %)	CUF (p.p. %)	η_A (p.p. %)
5,75 27,45	2,45 2,90	4,54 27,45	0,24 1,63
η_{inv} (p.p. %)	η_{Sys} (p.p. %)	L_C (h/m %)	L_{BOS} (h/m %)
1,01 1,05	0,28 1,98	0,202 33,83	0,06 40,35

Nota-se que as variações de η_{inv} , η_A , η_{Sys} durante o período de um mês são baixas, pois representam o funcionamento dos componentes internos do sistema FV que variam muito pouco em um período de trinta dias (conforme (7), (8) e (9)). O PR também possui baixa variação no período, pois como é influenciado pela sazonalidade do local, ele varia muito pouco em um período de trinta dias (conforme (2)). Por outro lado, as métricas de E_{CA} , CUF, L_C e L_{BOS} têm variação mais significativa. E_{CA} e CUF podem ter grande variação pois são diretamente dependentes da irradiação incidente. As perdas L_C e L_{BOS} têm igualmente grande influência da irradiação.

As oito métricas revisadas e analisadas neste artigo são as mais comumente consideradas no acompanhamento da eficiência de plantas FV. Nenhuma delas, entretanto, fornece um índice de eficiência global. PR, que mede a taxa de desempenho, é a métrica mais comumente utilizada para avaliar a qualidade de operação de uma planta FV. No caso de estudo considerado, o PR do período indica que a planta opera em boas condições pois está acima da referência de 80%. O mesmo vale para o CUF que ficou dentro da faixa de referência. As duas métricas de perdas, que possuem baixos valores, comprovam esta boa condição da planta e, portanto, L_C e L_{BOS} podem ser consideradas medidas complementares de eficiência. O E_{CA} não é uma medida conclusiva do ponto de vista de eficiência da planta, a não ser que fosse relacionada com alguma expectativa (i.e., estimativa) da energia gerada no período. As métricas de eficiência do arranjo FV (η_A) e do inversor FV (η_{inv}), apesar de serem um indicativo de eficiência, aplicam-se a partes do sistema e não à planta como um todo. A métrica de eficiência do sistema (η_{Sys}) mede a qualidade de conversão da energia solar em energia elétrica. Diferentemente de PR, é calculada pela relação direta entre a energia gerada pela planta FV e a irradiação total incidente (conforme (9)). PR, em comparação, é a relação entre a energia gerada pela irradiação total (E_{CA}/H) dividida pela relação da potência nominal do gerador FV pela irradiância de STC (P_n/G_0) (conforme (2)), ou seja, é a divisão entre a relação das energias medidas pela relação das potências STC do sistema, de modo que PR indica o quanto o sistema real está próximo do sistema ideal. A produção ideal do sistema FV possuiria PR igual a 100%. Utilizando os valores nominais fornecidos

pelos fabricantes, a planta do caso de estudo produziria idealmente com η_{Sys} equivalente à 16,6%.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, um conjunto de oito métricas, dentre as mais comumente utilizadas para avaliar o desempenho de plantas FV, foi selecionado para realizar a análise de “eficiência da planta fotovoltaica”. As métricas são descritas e foram utilizadas em um caso de estudo para avaliar a qualidade de geração de energia de uma planta FV de 5 kWp em um período de trinta dias.

Este trabalho de pesquisa permite observar a inter-relação entre as oito métricas selecionadas, além de demonstrar que uma única métrica não é o bastante para adquirir a total compreensão sobre a qualidade de geração da planta FV. O conjunto de métricas apresenta informações complementares entre si, permitindo observar a eficiência segundo vários parâmetros.

Embora um período de monitoramento de trinta dias permita observar variações de eficiência da planta, um período maior alcançando doze meses já permitiria identificar a influência da sazonalidade sobre a qualidade de operação da planta. Como trabalhos futuros, pretende-se dar continuidade às medições, possibilitando alcançar conclusões ainda mais precisas sobre a “eficiência da planta fotovoltaica”.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Companhia Paranaense de Energia Elétrica - COPEL e Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL pelo suporte e fomento do projeto de pesquisa PD2866-0464/2017.

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANEEL/ABSOLAR. (2020). Infográfico ABSOLAR. Disponível em <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html>>.
- Aristizábal, A.J., and Gordillo, G. (2008). Performance monitoring results of the first grid-connected BIPV system in Colombia. *Renewable Energy*, v. 33, n. 11, p. 2475-2484.
- Benedito, R.D.S. (2009). Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Canadian Solar. (2016). Maxpower 1500V CS6U- 315| 320| 325| 330P – Datasheet. Disponível em <www.canadiansolar.com>.

- Chine, W., Mellit, A., Pavan, A. M., and Kalogirou, S. A. (2014). Fault detection method for grid-connected photovoltaic plants. *Renewable Energy*, v. 66, p. 99-110.
- Dierauf, T., Growitz, A., Kurtz, S., Cruz, J.L.B., Riley, E., and Hansen, C. (2013). Weather-corrected performance ratio. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).
- da Costa, C.H., Rodrigues, M.P., Yamada, G.D., Rodrigues, G.V., Jiayu, X., Moritz, G.L., Oroski, E., de Góes, R.E., Lazzaretti, A.E., and Stadzisz, P.C. (2019). A Monitoring and Management System for Medium-Scale Photovoltaic Plants. In *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)*. (p. 1-6).
- do Nascimento, L.R., Braga, M., Campos, R.A., Naspolini H.F., and Rütther, R. (2020). Performance assessment of solar photovoltaic technologies under different climatic conditions in Brazil. *Renewable Energy*, v. 146, p. 1070-1082.
- Hachicha, A.A., Al-Sawafta, I., and Said, Z. (2019). Impact of dust on the performance of solar photovoltaic (PV) systems under United Arab Emirates weather conditions. *Renewable Energy*, v. 141, p. 287-297.
- Haeblerlin, H., and Beutler, C. (1995). Normalized representation of energy and power for analysis of performance and on-line error detection in PV-systems. *In Proc. 13th EU PV Conf., Nice*. (p. 934).
- IEC. (1998). International Standard IEC 61724: Photovoltaic System Performance Monitoring—Guidelines for Measurements, Data Exchange and Analysis.
- Khalid, A.M., Mitra, I., Warmuth, and W.; Schacht, V. (2016). Performance ratio—Crucial parameter for grid connected PV plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 65, p. 1139-1158.
- Kumar, M., and Kumar, A. (2017). Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 78, p. 554-587.
- Kurtz, S., Newmiller, J., Kimber, A., Flottemesch, R., Riley, E., Dierauf, T., Mckee, J., and Krishnani, P. (2013). Analysis of photovoltaic system energy performance evaluation method (No. NREL/TP-5200-60628). National Renewable Energy Lab (NREL), Golden, CO (United States).
- Kymakis, E., Kalykakis, S., and Papazoglou, T.M. (2009). Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete. *Energy Conversion and Management*, v. 50, p. 433-438.
- Liu, H., Nobre, A.M., Yang, D., Ye, J.Y., Martins, F.R., Rütther, R., Reindl, T., Aberle, A.G., and Peters, I.M. (2014). The impact of haze on performance ratio and short-circuit current of PV systems in Singapore. *IEEE Journal of Photovoltaics*, v. 4, n. 6, p. 1585-1592.
- Leloux, J., Narvarte, L., and Trebosc, D. (2012). Review of the performance of residential PV systems in France. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 2, p. 1369-1376.
- Marion, B., Adelstein, J., Boyle, K.E., Hayden, H., Hammond, B., Fletcher, T., Canada, B., Narang, D., Kimber, A., Mitchell, L., Rich, G., and Townsend, T. (2005). Performance parameters for grid-connected PV systems. In *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005*, p. 1601-1606. IEEE.
- Nakabayashi, R. (2014). Microgeração Fotovoltaica no Brasil: Condições Atuais e Perspectivas Futura. Dissertação de Mestrado, Instituto de Energia e Ambiente, USP.
- Necaibia, A., Bouraiou, A., Ziane, A., Sahouane, N., Hassani, S., Mostefaoui, M., Dabou, R., and Mouhadjer, S. (2018). Analytical assessment of the outdoor performance and efficiency of grid-tied photovoltaic system under hot dry climate in the south of Algeria. *Energy Conversion and Management*, v. 171, p. 778-786.
- NHS Solar. (2018). Inversores On Grid NHS SOLAR. Disponível em: <<https://nhssolar.com.br>>
- Ramgolam, Y.K., and Soyjaudah, K.M.S. (2017). Holistic performance appraisal of a photovoltaic system. *Renewable Energy*, v. 109, p. 440-448.
- Reich, N.H., Mueller, B., Armbruster, A., Van Sark, W.G., Kiefer, K., and Reise, C. (2012). Performance ratio revisited: is PR > 90% realistic?. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 20, n. 6, p. 717-726.
- Townsend, T., Whitaker, C., Farmer, B., and Wenger, H. (1994). A new performance index for PV system analysis. In: *Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion-WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC)*. p. 1036-1039.
- Woyte, A., Richter, M., Moser, D., Reich, N., Green, M., Mau, S., and Beyer, H.G. (2014). Analytical Monitoring of Grid-connected Photovoltaic Systems: Good Practices for Monitoring and Performance Analysis. *IEA PVPS Task 13, Subtask 2: Report IEA PVPS T13-03: 2014*. International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme.