

# AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE SFVCR, UM ESTUDO DE CASO NA AMAZÔNIA COM DIFERENTES ABORDAGENS

**M.e Fabiano Pereira dos Santos** – fabiano.pereira@ifam.edu.br

Universidade Federal Fluminense, Campus Praia Vermelha

**D.Sc. Bruno Soares Moreira Cesar Borba**

Universidade Federal Fluminense, Campus Praia Vermelha

**Dr. Eng. Gerson Máximo Tiepolo**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba

**M.e Carlos Gomes Fontinelle**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Campus Distrito Industrial

**D.Sc. Daniel Henrique Nogueira Dias**

Universidade Federal Fluminense, Campus Praia Vermelha

**M.a Marisol Elias de Barros Placido**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Campus Manaus Centro

**Resumo.** O presente artigo apresenta o resultado de aplicações de avaliações de um SFVCR instalado em Manaus – AM, as avaliações foram realizadas a partir de diferentes metodologias e abordagens. O objetivo consistiu em aplicar em um mesmo SFVCR as metodologias de avaliação pelo método da energia em contraste com a geração da curva I-V. Apresenta-se e discute os resultados contrastando as limitações e potencialidades dos métodos e instrumentos aplicados. Dessa forma, estimulando a discussão entorno das abordagens específicas, seja de inspecionar as instalações ou prever a energia gerada em horizontes futuros. A pesquisa foi desenvolvida a partir do estudo de caso realizado no SFVCR do IFAM-CMC. As fontes e dados utilizados foram obtidos do Atlas Brasileiro de Energia Solar 2º Edição, dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e dados medidos no próprio SFVCR. Os parâmetros para tratamento dos dados, filtragem e correção de erros foram os sugeridos pela IEC. Evidencia-se a crescente importância da geração de energia solar fotovoltaica distribuída na capacidade instalada no Brasil e a consequente relevância de assistir os investidores deste setor com metodologias de previsão que evidenciem resultados de longo prazo na produção de energia. As medições apresentam performance calculada pelo software do medidor de curva I-V de 84,4% e fator de forma de 0,75 ao passo que a análise realizada pelo método da avaliação das energias resultou em taxa de desempenho ou Performance Ratio (PR) de 0,790, calculado com os dados de energia gerada e a irradiação no plano dos painéis da série sintética produzida a partir de dados da estação INMET A101 e a produtividade de 1142,29 (kWh/kWp). Espera-se, por fim, a contribuição na discussão da importância de metodologias normativas no mercado brasileiro voltadas para as previsões dos insumos, energia produzida e esperada, que na metodologia aplicada apresentaram erro de 0,2%.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Avaliação, Metodologias

## 1. INTRODUÇÃO

A capacidade instalada da geração de energia solar fotovoltaica no Brasil tem experimentado um crescimento acentuado nos últimos anos. Os dados publicados pela ANEEL, de dezembro de 2022, apresentam a potência instalada no Brasil de aproximadamente 17.240 MW, correspondente a geração fotovoltaica distribuída e 7.535 MW correspondentes a centrais fotovoltaicas de geração centralizada. Consideradas as potências instaladas, tanto na geração fotovoltaica concentrada e distribuída, temos aproximadamente 24.775 MW (ANEEL, 2023a, 2023b). O expressivo crescimento da potência instalada no Brasil é evidentemente, um possível reflexo das condições de mercado e do desenvolvimento técnico, científico e tecnológico no setor, corroborando com o perfil renovável da Matriz Elétrica brasileira.

No Subsistema Norte do Sistema Interligado Nacional (SIN), no Estado do Amazonas, registra-se um crescimento acelerado desde 2015, da geração distribuída, em capacidade instalada de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR). Os dados de potência instalada registrados pela ANEEL confirmam o ritmo de crescimento, em número de empreendimentos e de potência, no âmbito da Amazonas Energia (AmE). A Fig. 1 apresenta o perfil de crescimento na localidade. O perfil de crescimento do potencial de geração solar fotovoltaica é observado nas diversas regiões e climas do país.

As transformações de longo prazo no perfil de emissões na matriz energética brasileira podem dar um lugar de destaque às energias renováveis. Conforme Saffari; Crownshaw; Mcpherson, (2023), uma opção para a manutenção do perfil renovável ou descarbonização do setor elétrico é o aumento da penetração das fontes renováveis.

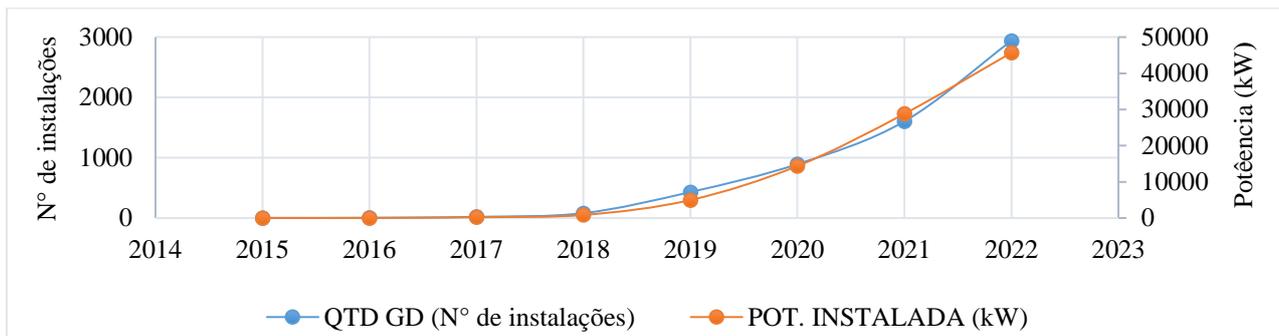


Figura 1 – Número de empreendimentos e da potência instalada, geração solar fotovoltaica no estado do Amazonas. Elaborado a partir de dados da (ANEEL, 2023).

Por outro lado, segundo pesquisas de Zhang *et al.*, (2023), existem incertezas associadas às cargas, à geração eólica ou solar fotovoltaica, podendo implicar na necessidade de aumento das capacidades instaladas com a presença das fontes renováveis intermitentes. Nas projeções de longo prazo do estudo de Zhang *et al.*, (2023), para o estudo de caso de uma região em desenvolvimento da China central, constatou-se a necessidade de aumento em até 4,79% por ano na capacidade instalada em virtude das incertezas relacionadas à característica estocástica dos recursos energéticos renováveis incluídos nas projeções. Em contrapartida, conforme verificado em El-Sayed; Khalil; Yehia, (2023), cenários de longo prazo com energias renováveis tem custos menores em comparação com outras possibilidades. Superados os desafios das incertezas relacionadas à geração a partir de fontes renováveis, o aumento de competitividade destas tecnologias e o baixo impacto ambiental podem favorecer a adoção destas.

As incertezas associadas a sistemas de geração fotovoltaica, por exemplo, estatisticamente podem apresentar valores potenciais de perdas devido à variabilidade climática entre 3,9% e 5%, erros inerentes ao modelo de transposição 3%, classificação dos módulos 3%, poeira ou sujeiras 2% e para outras perdas aproximadamente 6,5%. Apenas para o primeiro ano as perdas estimadas podem representar em torno de 8,7% e para os 20 anos de operação aproximadamente 7,9% (OLIVEIRA, 2017; SANTOS *et al.*, 2022; THEVENARD; PELLAND, 2013).

O perfil da matriz energética brasileira passa por uma transformação contrastada pelo rápido crescimento da geração distribuída. Na região amazônica, apesar do clima equatorial implicar em severa redução da irradiação no período de inverno amazônico, o crescimento da capacidade instalada da geração solar fotovoltaica segue em aceleração. Pesquisas recentes apontam potencialidades da geração renovável com a redução de emissões de gases de efeito estufa e custos do kWh. Em contrapartida, incertezas associadas à geração renovável ainda são alvo de inúmeras investigações científicas na busca por projeções mais sólidas, principalmente em planejamentos de longo prazo. O crescimento da geração distribuída, a exemplo da solar fotovoltaica, sugere transformações significativas na matriz elétrica nacional em cenários de longo prazo. Nestes cenários o estudo das incertezas associadas aos sistemas de geração de energia a partir de fontes renováveis ganham importância estratégica para os cenários futuros da geração de energia elétrica.

### 1.1 Caracterização de sistemas fotovoltaicos

A caracterização de sistemas solares fotovoltaicos frequentemente é aplicada no intuito de produzir métricas de desempenho que possam refletir os efeitos das condições ambientais e de instalação dos sistemas, podendo quantificar as incertezas associadas à geração de um sistema específico. Métricas de desempenho frequentemente utilizadas são a produtividade – *Yield* (Y) e a *Performance Ratio* (PR), enquanto o fator de forma aplica-se na análise da qualidade da curva I-V. Os dois primeiros podem ser obtidos com a aplicação da análise de SFVCR pelo método da energia, conforme sugerido pela IEC-61724-3 e o último sugerido na ABNT NBR16274 de 2014. A produtividade normaliza a produção do gerador solar com sua respectiva potência nominal, essa métrica caracteriza a região geográfica do sistema refletindo efeitos das condições ambientais e permitindo comparar sistemas fotovoltaicos de diferentes dimensões (CREMASCO *et al.*, 2021). Já o *performance ratio* normaliza a produtividade em relação ao recurso solar, possibilitando comparar sistemas instalados em diferentes localidades, evidenciando perdas totais do sistema fotovoltaico e o desvio em relação produção considerada ideal (ALMEIDA; ZILLES, 2012).

Diversas técnicas e metodologias de caracterização de Sistemas Fotovoltaicos (SF) são atualmente aplicadas. Uma das formas de caracterizar SF é normatizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR16274 de 2014, metodologia diferente é proposta pela International Electrotechnical Commission, a exemplo da IEC-61724. Princípios metodológicos, modelos, abordagens e propósitos distintos são observados nas duas propostas. Na metodologia proposta pela ABNT temos a geração da curva I-V, como ensaio de categoria dois. A norma internacional propõe a avaliação do SF a partir das energias gerada e esperada. A primeira é tipicamente aplicada no comissionamento de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede enquanto a segunda se propõe como metodologia de avaliação de SFVCR a partir das energias gerada, prevista e esperada. As técnicas ou metodologias supracitadas partem de dados ambientais e modelos diversos sendo ambas amplamente aplicadas atualmente.

A análise, aqui apresentada, concentra-se no estudo de caso aplicado a um SFVCR instalado na cidade de Manaus localizado nas coordenadas geográficas de longitude Oeste de 60,04° e latitude Sul de 3,10°. Os módulos fotovoltaicos do SFVCR estão instalados sobre a cobertura de um dos blocos do Campus Manaus Centro do Instituto Federal de

Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM). O Sistema Fotovoltaico instalado no Campus Manaus Centro do IFAM é conectado à rede da concessionária local, Amazonas Energia (AmE), gerando energia em corrente contínua a partir de seus módulos fotovoltaicos da marca *Canadian Solar* modelo CS3U-340P em Silício policristalino de 340 Wp. O sistema conta com um total de 44 kWp instalados sobre a cobertura de um dos prédios do Campus com águas Norte e Sul, inclinação de 13° e azimutes de 0° e 180°. A energia em corrente contínua é convertida em alternada por dois inversores da marca RENOVI, de 20 kW cada. O estudo está delimitado aos 12 últimos meses (jul. 2022 a jun. 2023) de operação do SFVCR, nos quais se coletou dados para o cálculo das energias gerada e esperada do SFVCR. Ao fim deste período foram geradas curvas I-V do SFVCR. Dessa forma, a análise parte das duas metodologias citadas, IEC e ABNT, avaliando o Sistema pela curva I-V e pela performance calculada a partir da avaliação das energias, ao fim do terceiro ano de operação.

O estudo do comportamento de uma célula solar fotovoltaica, de módulos ou painéis, frequentemente é realizado por meio de estudos de modelos. A modelagem, criação de uma representação matemática/computacional, pode ocorrer por estudos estatísticos ou por modelagem paramétrica. A representação de células solares fotovoltaicas é extensamente realizada pelo modelo paramétrico de diodo único. Este modelo, simples e eficiente, é utilizado como base para a simulação de sistemas por *softwares* como *System Advisor Model (SAM) do National Solar Radiation Database (NSRDB), PVSyst ou outros*. O modelo paramétrico de diodo único pode ser associado de forma a representar os parâmetros esperados de módulos ou painéis fotovoltaicos, com razoável precisão, tão quanto maior for a homogeneidade dos componentes fabricados. Dessa forma a simplicidade, e aceitável precisão do modelo paramétrico de diodo único, torna-o uma eficiente ferramenta no estudo de sistemas solares fotovoltaicos, células, módulos ou painéis.

Um dos procedimentos amplamente utilizados para diagnosticar a condição operativa de um SFV é a medição da curva I-V. O modelo de diodo único tem como parâmetros uma resistência paralela ao diodo,  $R_{sh}$ , representando as perdas por corrente de fuga, perda recorrente nas extremidades da célula solar, e uma resistência série  $R_s$  que caracteriza as quedas de tensão entre os terminais da célula (material semiconductor) e a carga externa conectada. Tais perdas podem ser detectadas com a medição dos parâmetros elétricos nos terminais das células fotovoltaicas, mediante a aplicação de uma carga capacitiva variável. Dessa forma, as condições em que as células, módulos ou painéis operam são diagnosticados em função dos parâmetros elétricos e representado com a geração da curva I-V (SANTOS; ROMANELI; TIEPOLO, 2023; SOUZA; MELO; JR., 2020). A Fig. 2 apresenta o circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.

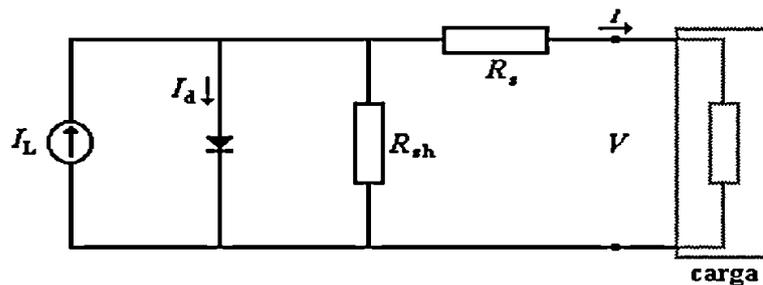


Figura 2 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica. Fonte - Oliveira, (2017)

Os valores dos parâmetros de  $R_s$  e  $R_{sh}$  influenciam as correntes e tensões nos terminais da célula (carga) indicando as características do circuito elétrico de uma célula, módulo ou painel e suas respostas para valores instantâneos de irradiância. A  $R_s$  está associada às condições de condução na base da célula, impedância nos contatos entre material condutor e condutores metálicos, resistências de contato. Assim, uma maior associação de células fotovoltaicas em série resultará em maior resistência série, redução da corrente  $I$  e perda de potência. A  $R_{sh}$  tem correlação com as perdas de corrente sofridas pelo gerador fotovoltaico, uma resistência paralela infinita eliminaria as correntes de fuga. A corrente fotogerada  $I_L$  sofre perdas devido à corrente de fuga com redução da potência nos terminais do gerador fotovoltaico. Nas curvas I-V, gráficos da corrente e tensão nos terminais dos geradores, notamos os efeitos dos parâmetros de  $R_s$  e  $R_{sh}$  no perfil do gráfico. Ao passo que a  $R_s$  resulta em queda da corrente  $I$  na região de curto-circuito da curva I-V a  $R_{sh}$  com baixos valores (maiores perdas) resultarão em acentuada declividade da curva I-V entre a região de curto-circuito e o joelho da curva. A Fig. 3 apresenta o perfil de uma curva I-V gerada em um sistema em operação na cidade de Manaus. Os geradores fotovoltaicos podem, dessa forma, ser caracterizados a partir da geração da curva I-V cujos aspectos indicam as condições do gerador em termos de corrente e tensão resultantes das condições de  $R_s$  e  $R_{sh}$ . Os valores dos parâmetros de  $R_s$  e  $R_{sh}$  influenciam as correntes e tensões nos terminais da célula (carga) indicando as características do circuito elétrico de uma célula, módulo ou painel e suas respostas para valores instantâneos de irradiância. Dessa forma, a corrente  $I$  é resultado da corrente fotogerada  $I_L$  menos as perdas. As correntes  $I$  e  $I_L$  apresentam correção unitária. As perdas são diretamente proporcionais aos valores de  $R_s$  e inversamente proporcionais aos valores de  $R_{sh}$ . Em condições ideais uma célula fotovoltaica teria resistência série nula e resistência paralela infinita. Em condições reais os efeitos desses parâmetros resultam em perda de eficiência do gerador fotovoltaico (KIM *et al.*, 2019; LIMA *et al.*, 2020; SOUZA; MELO; JR., 2020).

## 1.2 Medições no SFVCR

Para a medição dos parâmetros do SFVCR, na localidade foco do estudo, utilizou-se das instalações do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Amazonas Campus Manaus Centro (IFAM), traçando-se a curva I-V do SFVCR instalado nas coberturas dos blocos do Instituto. A técnica utilizada para medição dos parâmetros do SFVCR contou com a aplicação de uma carga capacitiva variável para plotar uma curva I-V. Foi utilizada a carga capacitiva modelo PVA-1500 do fabricante *Solmetric*. O equipamento conta com medição simultânea de irradiância, temperatura, corrente e tensão do SFVCR. Fornece as curvas I-V, P-V e os valores dos parâmetros-chave, permitindo a verificação imediata do desempenho fotovoltaico e a análise dos dados registrados. O equipamento de medição é composto pelo traçador de curva PVA-1500, a unidade de medição da irradiância *SolSensor*, o sensor de temperatura *K-type thermocouple* para medição da temperatura das células fotovoltaicas, software, cabos e conectores. Os dados medidos foram normalizados para as condições de *Standard Test Conditions* (STC) com irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura ambiente de 25°C e Massa de ar (AM – 1,5) correspondente ao percurso de 1,5 atmosfera na trajetória da radiação solar. Dessa forma, gerou-se a curva I-V e PV apresentada na Fig. 3.

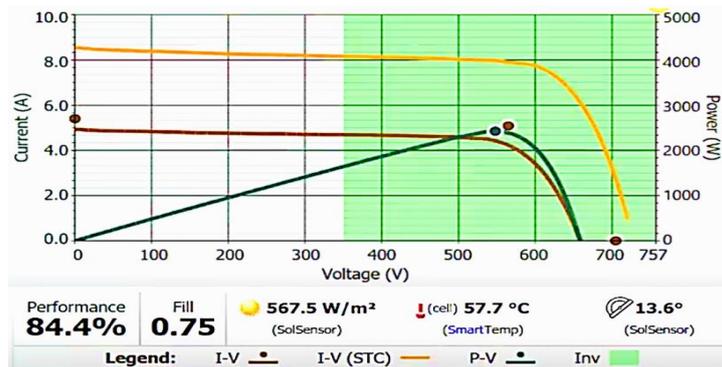


Figura 3 - Curva I-V, painel de 17 módulos do SFVCR. Elaborado pelos autores com o PVA-1500 (2023)

Na Fig. 3 tem-se a curva I-V gerada a partir do PVA-1500. Representada na cor marrom destaca-se a curva gerada no momento das medições de irradiância, temperatura e respectivos valores de correntes, tensões e potência no gráfico. Os pontos na cor marrom indicam os valores esperados teoricamente, calculados pelo software do equipamento. A curva em cor laranja é a projeção da curva marrom para as condições de padrão de teste do módulo *Standard test condition* (STC). A curva na cor preta (eixo secundário) indica a potência medida do painel no instante da medição. A região em verde é a região do MPPT do inversor. Dessa forma, a curva I-V apresenta as condições de operação do painel para um instante a partir dos valores de irradiância (em um ponto específico da planta), da temperatura (em uma célula específica) e valores medidos de correntes e tensões instantâneas resultantes da variação da carga capacitiva.

Outras metodologias de avaliação de SFV são complementares, a exemplo das metodologias utilizando a avaliação das energias gerada e esperada, conforme IEC, (2017). A avaliação de SFV, de acordo com esta norma, descreve o procedimento que assegure que uma planta solar fotovoltaica foi construída corretamente, possibilitando verificar se as saídas (variáveis de saída do SFV) correspondam às especificações do projeto com a performance esperada. De forma complementar a norma IEC, (2017) em seu volume 2, descreve metodologia para determinar a potência de saída de SFV em curta faixa de tempo, mas não se destina a quantificar o desempenho em todas as faixas de clima ou condições climáticas, aspecto similar ao da geração da curva I-V. Metodologia como a instruída pela IEC, (2017) volume 3, avaliação de SFV pelo método das energias, propicia o teste de um SFV considerando condições operacionais diversas, efeitos de intermitência nas variáveis ambientais a longo prazo, capturando maior amplitude de problemas de desempenho incluindo os relacionados a respostas a diferentes condições climáticas e aos seus efeitos estocásticos. Assim, as diferentes abordagens se complementam possibilitando avaliar os SFV nas diversas condições reais de operação. A Fig. 4 apresenta um diagrama ilustrativo do método de avaliação de SFVCR pela análise das energias.

A norma internacional apresenta metodologia de avaliação de desempenho de SFV pelo método da avaliação da energia. Na operação de um SFV, métricas são miscíveis, a exemplo de tensão e corrente que ao longo de determinado período poderão integrar determinada quantidade de energia. As energias calculadas e medidas nos terminais de um gerador fotovoltaico podem ser classificadas em energia gerada, prevista e esperada do respectivo SFV em determinado período. O estudo dessas energias de um determinado sistema fotovoltaico em certo período fundamenta a metodologia de avaliação de desempenho proposto nesta versão da norma. Esquemáticamente a metodologia citada faz uso de modelos e variáveis de entrada para calcular as energias previstas e esperadas, conforme ilustrado na Fig. 4.

Conforme apresentado na Fig. 4, dados históricos das variáveis ambientais são aplicados no cálculo da energia previstas de um SFV, ao passo em que os dados medidos em certo período geram a energia esperada do SFV. A energia esperada deverá ser comparável à energia gerada em magnitude. O modelo aplicado no presente estudo, o *System Advisor Model* (SAM), permanece o mesmo para energias prevista e esperada. Dessa forma, é esperado uma correspondência intrínseca entre a forma de coleta e tratamento das variáveis ambientais com os resultados, energias, a serem produzidas da aplicação do modelo.

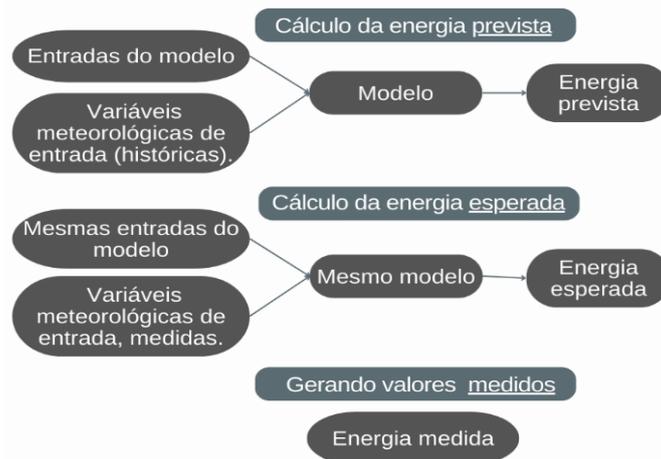


Figura 4 - Diagrama das energias prevista, esperada e medida e os dados meteorológicos. Elaborado pelo autor (2023).

A coleta e tratamento dos dados são distintos nas metodologias de geração da curva I-V e da avaliação de desempenho de SFV pelo método da avaliação da energia, produzindo informações distintas com potencialidades e limitações específicas. Na geração da curva I-V, conforme aplicado, a coleta de dados é instantânea, concomitante à geração da curva. A exemplo da irradiância e temperatura da célula, as quais medidas em pontos específicos do painel solar ou do módulo fotovoltaico. A medição tem o potencial de contribuir com a precisão do dado, porém há que se considerar que a temperatura das células nem sempre é uniforme, podendo enviesar o resultado, da mesma forma que a irradiância em determinado ponto de uma extensa planta pode apresentar variações em relação a outros. Assim, a curva I-V se mostra um bom instrumento para diagnosticar as condições da instalação, porém com limitações para as projeções da performance do SFV ao longo do tempo, pois não considera nas variáveis de entradas os efeitos do tempo na composição da energia. A metodologia utilizada para o cálculo da energia prevista, por outro lado, considera os efeitos de vários anos sobre as variáveis de entrada do modelo, limitando a correspondência da energia prevista com a energia gerada. A energia esperada, calculada a partir a irradiância horária média diária, espera-se ter significativa correspondência com a energia gerada no mesmo período de cálculo, com os mesmos intervalos de integração. Esta última, aplicável na análise de desempenho de SFV.

Para traçar a curva I-V foi utilizado uma carga capacitiva modelo PVA-1500 do fabricante *Solmetric*, contando com medições simultâneas de irradiância, temperatura, corrente e tensão do SFVCR. O mesmo fornece as curvas I-V, P-V além de parâmetros como fator de forma e performance, permitindo a verificação imediata do desempenho fotovoltaico e a análise dos dados. As fotografias do fabricante na Fig. 5 apresentam o equipamento. Este equipamento é composto pelo traçador de curva *PVA-1500* Fig. 5 (a); unidade de medição da irradiância *SolSensor*, composto de fotodiodo de silício com correções para temperatura, efeitos espectrais e angulares Fig. 5 (b) e sensor de temperatura *K-type thermocouple* para medição da temperatura dos módulos composto por termopar do tipo k acoplado atrás do módulo conforme Fig. 5 (c); software, cabos e conectores.

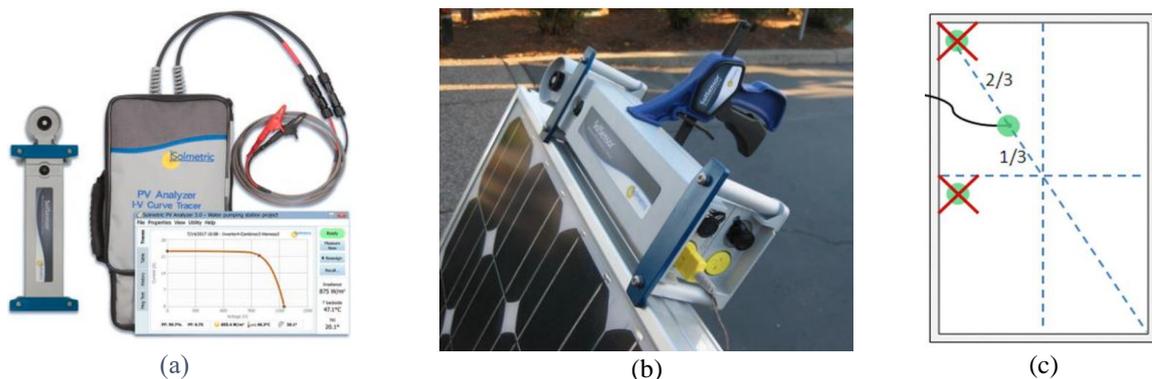


Figura 5 - Analisador PVA-1500. (a) Equipamentos e interface do software; (b) Posicionamento do *SolSensor* no módulo e conexão do termopar no *SolSensor*; (c) posição de acoplamento do termopar no módulo.

As limitações na coleta de dados ambientais, acesso aos painéis dos SFV, e finalidade das análises podem sugerir a escolha da abordagem mais adequada. O presente artigo apresenta um estudo de caso, aplicação das duas abordagens apresentadas, com a finalidade de discutir e apresentar os resultados a se esperar das diferentes formas de estudo possibilitando escolhas mais seguras e adequadas para aplicações seguintes. O objetivo consiste em aplicar em um mesmo caso, SFVCR, as metodologias, apresentar e discutir os resultados evidenciando e contrastando as limitações e potencialidades de ambos. O trabalho encontra relevância no acesso a dados reais e históricos de geração da planta do

IFAM CMC, no acesso aos equipamentos utilizados no estudo, no crescimento acelerado da geração solar fotovoltaica, na vulnerabilidade dos SFV às condições ambientais e necessidade de munir construtores, pesquisadores e investidores de ferramentas e informações que possibilitem o diagnóstico, previsão e projeção de resultados decorrentes da operação de SFVCR, possibilitando escolhas mais adequadas na seleção da abordagem para as finalidades específicas, seja de inspecionar as instalações ou prever as energias geradas em horizontes futuros.

## 2. METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida a partir do estudo de caso realizado no SFVCR do IFAM CMC com a colaboração da instituição representada por seus professores e pesquisadores. As fontes e dados utilizadas foram o Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª Edição; os bancos de dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); e dados gerados a partir de medições *in loco*.

As características probabilísticas, estocásticas, de variáveis ambientais a exemplo da radiação solar sugerem o uso de valores médios de intervalos de tempo determinados de acordo com os objetivos do estudo, no caso presente, dados horários integralizados em médias mensais. Os dados de radiação histórica, irradiação média diária mensal (kWh/m<sup>2</sup>.dia), foram extraídos da página do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As coordenadas utilizadas foram Longitude -60,049 e Latitude -3,1005. Nas mesmas coordenadas geográficas foram coletados dados meteorológicos de estações em solo do INMET, extraídos da estação A101 localizada em Manaus, dados no plano horizontal.

No modelo utilizado, derivado do modelo de diodo único, na representação do gerador solar foram utilizadas, além dos dados de radiação, os dados de velocidade do vento, temperatura e umidade. Os dados de tais variáveis foram coletados na estação INMET para o período do estudo, no formato horário e convertidos em planilhas eletrônicas para dados médios diários mensais. Os parâmetros para tratamento dos dados, filtragem e correção de erros, sugeridos são apresentados na Tab. 1.

Os parâmetros de correção da Tab. 1 são, conforme sugerido pela IEC-61724-3, ponderados de acordo com as características da localidade, experiências em medições no local do SFVCR. Os valores máximos, mínimos e desvio padrão dos dados coletados da estação meteorológica de solo foram utilizados para definição da amplitude, variações abruptas dos valores dos dados, ao passo em que na ausência de dados foram utilizados dados médio históricos, conforme sugere a norma. Os intervalos diários foram calculados em valores médios mensais, correspondendo ao período diário de interesse. No caso da radiação solar o período de dia claro foi calculado conforme Santos; Romaneli; Tiepolo, (2023). Para as variáveis de temperatura ambiente, velocidade do vento e umidade considerou-se um tempo mínimo de uma hora previa ao horário típico de partida dos inversores. Os dados históricos da estação meteorológica do INMET na localidade foram considerados nos critérios de filtragem da Tab. 1, valores máximos e mínimos, desvio-padrão e taxas de variação, conforme orienta a norma IEC-61724.

Tabela 1 - Critérios de filtragem das variáveis meteorológicas de entrada do modelo.

Filtro	Descrição	Critérios de filtragem dos dados meteorológicos			
		Irradiância W/m <sup>2</sup>	Temperatura °C	Velocidade do vento m/s	Umidade relativa %
Amplitude	Valores fora de intervalo racional.	2 < e < 1200	20 < e < 36	0,1 < e < 3	40 < e < 90
Ausência	Valores ausentes ou duplicados.	TMY	TMY	TMY	TMY
Valores Fixos	Valores travados ao longo do tempo.	se = 0 >	se = 0 >	se = 0 >	se = 0 >
Variações abruptas	Variações inconsistentes.	TMY	TMY	TMY	TMY
		-	> 10	> 2	> 40
Intervalo diário	Horário dos valores considerados	~5h00 < e < 19h00~	5h00 < e < 17h00	5h00 < e < 17h01	5h00 < e < 17h00

O modelo adotado para as simulações foi o modelo da *California Energy Commission* (CEC), aplicado no *System Advisor Model* (SAM) do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). Na opção de localização e recursos, biblioteca de recursos, foi selecionada a planilha de dados criada com os dados históricos e do período estudado. A zona horária configurada foi GMT -4 com elevação de 32m. O modelo CEC possibilita a entrada dos parâmetros dos equipamentos, módulos, inversores e configuração do sistema. O SFVCR instalado no CMC está conectado à rede de distribuição da Amazonas Energia (AmE), conta com geradores fotovoltaicos totalizando 132 (cento e trinta e dois) módulos fotovoltaicos somando 44,9 kWp de potência instalada. Os módulos instalados são da marca Canadian Solar de silício policristalino *Half cell*, modelo CS3U 340P. O sistema está instalado sobre a cobertura de um dos prédios do Campus em duas águas, Norte e Sul, inclinação de 13° e azimutes de 0° e 180°. A energia em corrente contínua é convertida em alternada pelos dois inversores de frequência, marca RENOVIGI de 20 kW cada. Os painéis estão interligados por cabos para corrente contínua com comprimentos de 60m, parâmetros configurados no *software*.

A partir dos parâmetros e dados ambientais inseridos no SAM, procedeu-se às simulações. Conforme o diagrama da Fig. 4, as energias prevista, esperada e medida devem ser calculadas e medidas para a avaliação do SFVCR. A energia

prevista foi simulada a partir dos parâmetros da instalação associados às variáveis ambientais históricas. A energia esperada foi calculada a partir da dados coletas na estação meteorológica instalada na localidade do SFVCR e a energia medida foi obtida do banco de dados virtual que armazena os dados de geração dos inversores, coletados e exportados a partir de *datalogger*.

Para a geração da curva I-V foi utilizado o traçador com carga capacitiva da Solmetric, PVA-1500. As medições foram realizadas entre as 10h00min. e 15h00min, para minimizar as incertezas com a maximização dos valores de irradiância. O procedimento incluiu a implementação do SFVCR no *software* do equipamento, instalado em um computador portátil, procedimento em que os parâmetros de instalação, modelo e especificação dos equipamentos, bitola e comprimento dos cabos, fuso horário, inclinação, azimute e configuração dos painéis são configurados. A partir do SFVCR configurado o software reproduz uma curva I-V a partir de modelo matemático a qual é contrastada com a curva medida, como apresentado na Fig. 3.

### 3. RESULTADOS

A análise dos resultados considerou como borda do sistema, o ponto de medição da curva I-V, caixa de fusíveis no lado CC, sendo analisado, portanto, o desempenho dos painéis em ambas as metodologias. A energia esperada calculada, quando comparada com a energia medida do SFVCR no mesmo período (12 meses) apresentou erro de 0,2%. A Fig. 6 apresenta o perfil das energias medida e esperada, valores mensais.

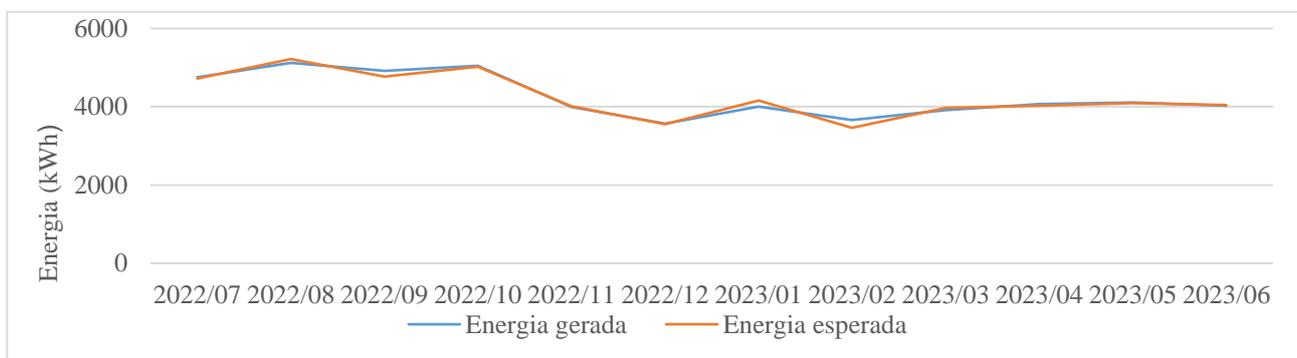


Figura 6 - Energia medida e esperada no período de análise.

Observa-se que a energia esperada do período de análise, calculada a partir de dados ambientais coletados em estação meteorológica instalada no local do SFVCR, apresentou significativa proximidade dos dados de energia registrados pelo próprio sistema.

Contabilizadas as ocorrências registradas pelo inversor de indisponibilidade do sistema, foi gerado o gráfico da Fig.7. Sendo estas indisponibilidades os instantes em que o sistema apresentou não funcionamento em condições de presença de irradiação incidente sobre o gerador fotovoltaico. Obteve-se mais de 325 ocorrências as quais concentraram-se nos horários de início e fim do dia claro e representaram aproximadamente 4% da energia anual esperada.

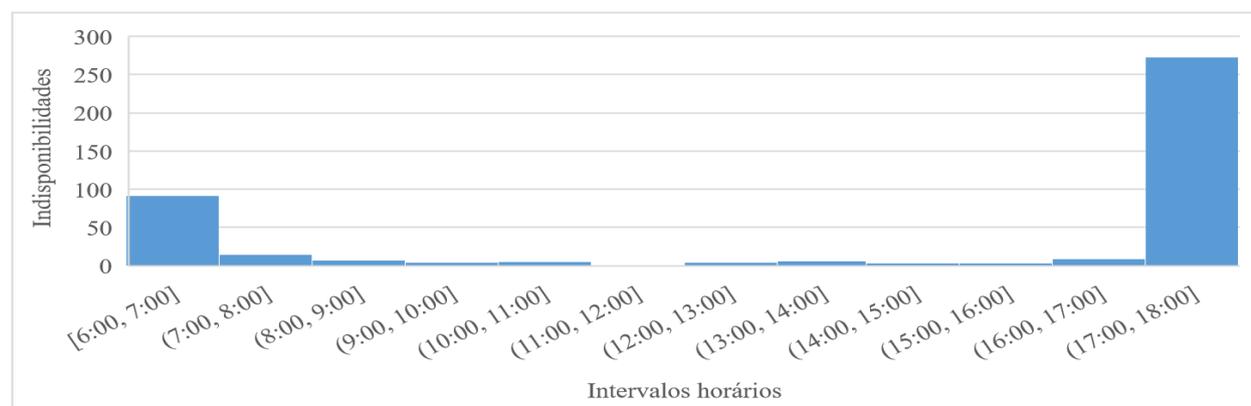


Figura 7 - Ocorrências de indisponibilidade do SFVCR por hora do dia.

Os registros de indisponibilidade do sistema constituíram significativas perdas ou ausências de geração de energia, os baixos valores de irradiância parecem ter relação com as ocorrências posto a concentração das ocorrências nos períodos diários de menores intensidade de radiação solar.

As energias esperada, gerada e prevista para os meses analisados são apresentadas na Fig. 8, junto a suas médias anuais. Observa-se uma sobreposição entre as médias anuais das energias gerada e esperada, que apresentaram erro de

0,2%. Os cálculos de energia esperada a partir das séries sintéticas geradas tendo como base os dados coletados e tratados da estação meteorológica A101, para período, apresentaram pequeno erro em relação aos dados de energia gerada pelo SFVCR. A energia prevista calculada com os dados históricos do Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª Edição, apresentaram valores muito próximos aos de energia gerada e esperada, principalmente se comparados a cálculo de energia prevista a partir de dados de outras bases como NSRDB ou NASA.

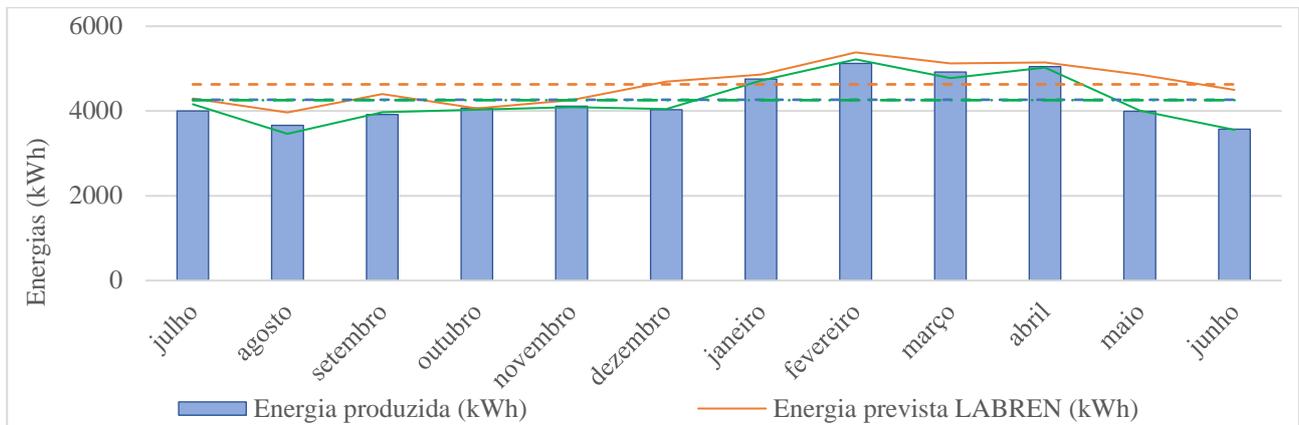


Figura 8 - Energias gerada, esperada e prevista para o período de análise.

A análise de desempenho do SFVCR pelo método de avaliação da energia é embasada nos valores mensais e anuais das energias esperada e gerada. No caso em estudo, as produtividades calculadas a partir das energias gerada, esperada e prevista com a irradiação no plano dos painéis podem ser observadas na Tab. 2.

Tabela 2 - Produtividades e Taxas de Desempenho

PR	INMET		LABREN		Medido	
	PR	$Y_a$ kWh/kW <sub>p</sub>	PR	$Y_a$ kWh/kW <sub>p</sub>	PR	$Y_a$ kWh/kW <sub>p</sub>
0,791		93,10	0,790	96,01	0,757	89,10
0,801		77,42	0,793	88,75	0,843	81,56
0,792		88,89	0,791	98,40	0,776	87,20
0,789		90,22	0,795	90,80	0,792	90,63
0,797		91,47	0,797	95,26	0,798	91,56
0,795		90,49	0,802	104,99	0,788	89,71
0,795		105,50	0,794	108,66	0,798	105,84
0,788		116,77	0,790	120,47	0,770	114,04
0,787		106,79	0,786	114,70	0,807	109,53
0,786		112,45	0,781	115,14	0,786	112,35
0,796		89,69	0,788	108,82	0,790	89,00
0,792		79,55	0,793	100,71	0,791	79,48
0,791		1142,29	0,791	1242,72	0,790	1140,01

A produtividade ( $Y_a$ ) corresponde a uma relação entre a energia gerada em (kwh) e a potência FV instalada (kW<sub>p</sub>). A energia gerada em determinado painel tem relação direta com a energia que incide sobre sua superfície (irradiação no plano), podendo ser decrescida por perdas devido a sujidades ou mesmo efeitos do ângulo de incidência, *Array Incidence Loss* (IAM). A produtividade ( $Y_a$ ) e a taxa de desempenho (PR) apresentadas pelo SFVCR, no período analisado, calculada a partir da energia esperada e medida apresentaram valores muito próximos, provável efeito da precisão dos modelos, a exemplo do modelo de diodo único, e dos dados ambientais medidos na localidade. A produtividade relativa à energia prevista, valor não tão próximo da produtividade averiguada, as variáveis ambientais, neste caso, sofrem o efeito das variabilidades interanuais que são consideradas na geração dos dados, efeito que se espera ser dirimido ao longo dos anos. A taxa de desempenho ou *Performance Ratio* (PR), calculado com os dados de energia gerada e a irradiação no plano dos painéis da série sintética produzida a partir de dados da estação A101, apresentou valor de 0,790. A taxa de desempenho calculada nas simulações, independente da fonte de dados permaneceu praticamente a mesma.

A medição realizada com o gerador de curva I-V PVA-1500, conforme orientações do manual do fabricante, resultou no cálculo da performance e fator de forma como métricas do SFVCR analisado. A performance calculada pelo *software* do PVA foi de 84,4% e o Fator de Forma 0,75. A temperatura da célula foi medida em 57,7 °C (Graus Célsius) e a irradiação em 567,5 W/m<sup>2</sup>, durante o registro da curva I-V do SFVCR. O fator de desempenho é definido como a razão entre o P<sub>max</sub> medido e o P<sub>max</sub> previsto (calculado pelo software) sendo expresso em porcentagem.

#### 4. CONCLUSÃO

A análise de sistemas fotovoltaicos pela avaliação da energia considera, além da condição operativa do SFV ao longo do período avaliado, as intercorrências do período de análise, tempo efetivo de operação do SFVCR. Eventualidades como indisponibilidade do sistema ou perdas devido a causas exógenas ao SFV impactam a produção de energia e as métricas da análise. Tais intercorrências afetam os valores de energia esperada durante os períodos de disponibilidade impactando a energia total esperada, eventualidades não previsíveis pela geração da curva I-V. A análise pelo método da energia, conforme IEC-61724, inclui o cálculo de métricas como o índice de desempenho energético e disponibilidade; relação da energia medida com a esperada e a disponibilidade correspondente à razão entre a energia esperada para os momentos de indisponibilidade em relação à energia total esperada. O fator de capacidade, fração de energia elétrica gerada em comparação com o que seria gerado em potência nominal com operação em 100% do intervalo de tempo considerado. E a taxa de desempenho que reflete a energia elétrica gerada em relação à quantidade de irradiação e à potência CC da usina. O estudo realizado conforme metodologia IEC-61724, análise pelo método da energia do SFVCR do IFAM-CMC, resultou em métricas de *Performance Ratio* (PR) de 0,790 e produtividade ( $Y_a$ ) de 1140,01, calculada a partir de valores medidos no SFVCR.

Problemas nas instalações dos geradores fotovoltaicos resultam em desvios entre as curvas I-V medida e calculada teoricamente. Há seis tipos distintos de desvios, relacionados à diferentes diagnósticos, que podem ser observados em uma curva I-V. Uma determinada fonte FV em teste pode não apresentar nenhum desvio, um desvio ou uma combinação de dois ou mais desvios. Como pode-se depreender da Fig. 2, há correlação entre variáveis ambientais e a condição operacional de um painel fotovoltaico com seus parâmetros elétricos. A associação de células e módulos fotovoltaicos, quando analisados por suas características elétricas com a geração da curva I-V evidencia graficamente desvios no perfil da curva, podendo ser associado a seis formas de desvios. Uma curva I-V com degraus ou entalhes pode ter como possível causa sombreamento, diodo de By-pass em curto ou células fotovoltaicas danificadas. Correntes de curto-circuito abaixo do esperado pode estar associado à incidência de irradiação, sombreamento, sujidades ou degradação dos módulos. Tensão de circuito aberto pode indicar, entre outras causas, temperatura da célula mais elevada. Um perfil da curva em que o “joelho da curva” apresenta arredondamento pode estar associado ao envelhecimento dos equipamentos. Uma inclinação acentuada na parte horizontal da curva pode ter como causa incompatibilidade de  $I_{sc}$  do módulo, *mismatch* ou perdas por corrente de fuga das células, baixa resistência paralela. Uma inclinação anormal do segmento vertical da curva é indicio de sobressalência das resistências sério dos módulos, conexões resistivas ou excesso de resistência nos cabos do painel. A análise pela geração da curva I-V do SFVCR do IFAM-CMC resultou na curva apresentada na Fig. 3. Como é possível observar na Fig. 3, a curva medida com o PVA-1500 (curva marrom) não apresentou as anomalias típicas supracitadas, observando-se desde a condição de curto-circuito até a condição de circuito aberto na curva I-V medida, uma diferença entre a corrente esperada para o gerador fotovoltaico (pontos marrons) e o efetivamente medido (curva marrom), provável efeito das sujidades sobre a irradiação efetivamente recebida pelo gerador. A performance calculada pelo *software* do PVA-1500 a partir da medição da curva I-V do SFVCR analisado resultou em performance de 84,4% e o Fator de Forma 0,75.

As abordagens aplicadas na análise do SFVCR do IFAM-CMC consistiram na geração da curva I-V e a análise pelo método da energia, conforme ABNT NBR16274 de 2014 e IEC-61724, respectivamente. A Geração da curva I-V, teste de categoria 2, se mostra um eficiente método para detectar inconformidades nas instalações do SFVCR na etapa de comissionamento. Este teste resultou em performance de 84,4% e o Fator de Forma 0,75. A análise pelo método da energia aplicado ao SFVCR do IFAM-CMC resultou entre outros indicadores no *Performance Ratio* (PR) de 0,790 e produtividade ( $Y_a$ ) de 1140,01, calculada a partir de valores medidos no SFVCR.

Em síntese, a ABNT NBR16274 de 2014 apresenta requisitos mínimos para documentação, ensaios, inspeção e avaliação de desempenho, destacando-se os anexos B, C, F e E da referida norma. A geração da curva I-V realizada neste estudo e apresentada na Fig. 3 resultou em performance de 84,4% e o Fator de Forma 0,75. A análise de performance do mesmo SFVCR pelo método da energia, conforme IEC-61724 forneceu *Performance Ratio* (PR) de 0,790 e produtividade ( $Y_a$ ) de 1140,01. Destaca-se a taxa de performance e a produtividade calculadas conforme IEC, que levando em conta as perdas do sistema no período, a exemplo das perdas por indisponibilidade apresentadas na Fig. 7, introduzem os fatores reais de perdas na análise, possibilitando confrontar a produtividade real do SFVCR com valores previstos e esperados, conforme apresentado na Tab. 3. Sobretudo, considera-se importante mencionar, a partir do estudo realizado, a clareza com que a metodologia IEC apresenta as energias gerada, prevista e esperada, destacadas na Fig. 4. Possibilitando-se, assim, uma visualização clara entre investidores e instaladores dos resultados obtidos contrastados com as previsões iniciais de geração de energia na fase de dimensionamento do SFVCR. Esta visualização pode contribuir para o amadurecimento de previsões em projetos de SFV e melhoria da satisfação dos investidores com a aproximação dos resultados previstos para seus SFVCR comparados aos resultados medidos ao longo da operação do sistema.

#### REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR-16274**: Sistemas fotovoltaicos conectados à rede: Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**. Disponível em:

- <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiY2VmMmUwN2QtYWFGI4MGU2NTkxIiwidCI6IjQwZDZmO mQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImM iOjR9>>. Acesso em: 26 dez. 2022a.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **ACOMPANHAMENTO DA IMPLANTAÇÃO DAS CENTRAIS GERADORAS DE ENERGIA ELÉTRICA**. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMGYyZWl0NzgtMGRlOC00M2ZjLTljZDYtZTVkYjIjZjZkxZDBkIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>>. Acesso em: 26 dez. 2022b.
- Almeida, M. P.; Zilles, R. Cálculo De Parâmetros De Desempenho Para Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 3, n. 1, p. 70, 2012.
- ANEEL. **Relação de empreendimentos de Geração**. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>>. Acesso em: 25 maio. 2023.
- Cremasco, N. P. *et al.* **Estudo de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica Instalados em Goioerê - PR Através de Índices de Mérito**. Proceedings of the 13th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC 2021). **Anais...sepoc**, 18 maio 2021Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/21817>>
- EL-Sayed, A. H. A.; Khalil, A.; Yehia, M. Modeling alternative scenarios for Egypt 2050 energy mix based on LEAP analysis. **Energy**, v. 266, n. August 2022, p. 1–15, 2023.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61724-3: Photovoltaic system performance – Part 3: Energy Evaluation Method**. Geneva: IEC, 2017.
- Kim, G. G. *et al.* Prediction Model for PV Performance with Correlation Analysis of Environmental Variables. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 9, n. 3, p. 832–841, 2019.
- Lima, A. A. *et al.* Revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. **Rev. Brasileira de Ens. de Física**, v. 42, p. 16, 2020.
- Oliveira, L. G. M. **AVALIAÇÃO DE FATORES QUE INFLUENCIAM NA ESTIMATIVA DA GERAÇÃO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA**. 2017. (Dr. em Engenharia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica, UFMG, Belo Horizonte, 2023.
- Saffari, M.; Crownshaw, T.; Mcpherson, M. Assessing the potential of demand flexibility to improve the performance of electricity systems high variable renewable energy penetration. **Energy**, v. 272, n. Oct. 2022, p. 127133, 2023.
- Santos, F. P. DOS *et al.* **ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE DO IFAM CAMPUS MANAUS CENTRO EM SEU PRIMEIRO**. **CBENS**, 2022.
- Santos, F. P. DOS; Romaneli, E. F. R.; Tiepolo, G. M. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS DADOS AMBIENTAIS APLICÁVEIS NAS PREVISÕES DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA MANAUS**. 2023. (Mestrado em Sistemas de Energia) Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2023.
- Souza, A. C. DE; Melo, F. C.; JR., J. R. M. **MODELAGEM COMPUTACIONAL DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS** Arthur. **Computational Modeling in Bioengineering and Bioinformatics**, p. 1–39, 2020.
- Thevenard, D.; Pelland, S. Estimating the uncertainty in photovoltaic yield. **Solar Energy**, v. 91, p. 432, 2013.
- Zhang, J. *et al.* A chance-constrained programming approach to optimal planning of low-carbon transition of a regional energy system. **Energy**, v. 278, n. January, 2023.

## PERFORMANCE EVALUATION OF SFVCR, AN AMAZON CASE STUDY WITH DIFFERENT APPROACHES

**Abstract.** *This article presents the results of evaluations of an SFVCR installed in Manaus, Amazonas. The evaluations were carried out using different methodologies and approaches. The aim was to apply the evaluation methodologies of the energy method to the same SFVCR, in contrast to the generation of the I-V curve. The results are presented and discussed, contrasting the limitations and potential of the methods and instruments applied. In this way, it stimulates discussion around specific approaches, whether to inspect installations or to predict the energy generated over future horizons. The research was based on a case study carried out at the IFAM-CMC SFVCR. The sources and data used were the Brazilian Atlas of Solar Energy 2nd Edition, meteorological data from the National Institute of Meteorology (INMET) and data measured at the SFVCR itself. The parameters for data processing, filtering and error correction were those suggested by the IEC. The study highlights the growing importance of distributed solar photovoltaic power generation in Brazil's installed capacity and the consequent relevance of assisting investors in this sector with forecasting methodologies that show long-term results in the production of energy inputs. The measurements show a performance calculated by the I-V curve meter software of 84.4% and a form factor of 0.75, while the analysis carried out using the energy evaluation method resulted in a performance ratio (PR) of 0.790, calculated using data on energy generated and irradiation in the plane of the panels from the synthetic series produced using data from the INMET A101 station and a productivity of 1142.29 (kWh/kWp). Finally, we hope to contribute to the discussion on the importance of normative methodologies in the Brazilian market aimed at forecasting inputs, produced, and expected energy, which in the methodology applied showed an error of 0.2%.*

**Keywords:** Solar energy, Evaluation, Methodologies