

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE USINA SOLAR FOTVOLTAICA UTILIZANDOSIMULAÇÕES COM DADOS DE ENTRADA MEDIDOS

PERFORMANCE ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC SOLAR PLANT USING SIMULATIONS WITH MEASURED INPUT DATA

Raquel Xavier Silva

rxs1@discente.ifpe.edu.br

Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho

manoel@pesqueira.ifpe.edu.br

RESUMO

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à rede (SFCRs) apresentam parcela significativa na expansão das fontes de energias renováveis na matriz elétrica nacional. Esses sistemas podem ter seu desempenho energético verificado por meio das Figuras de mérito, como a Produtividade (Y) e o PR (Taxa de Desempenho), como também pelo Índice de Performance de Energia (EPI). Este trabalho fez análise de desempenho de usinas solares fotovoltaicas, utilizando simulações com dados de entrada medidos na instalação. Foram instalados sensores de Irradiância Horizontal Total (GHI) e Irradiância Horizontal no Plano (GHIt) dos módulos, para a medição de temperatura sensores LM35, localizados respectivamente, no centro de um dos módulos fotovoltaicos e o outro medindo temperatura ambiente na localidade da usina A. Foram analisadas etapas e cenários distintos, com configurações de usinas e combinações de dados de entrada. O programa Pvsyst foi utilizado para converter as entradas em energia simulada, a partir da configuração do SFCR. Foram obtidas as Figuras de mérito e o EPI mensal, elas possibilitaram visualizar problemas de operação do inversor, na parte medida, e limitação de potência no inversor na análise feita no PVsyst. A simulação realizada com as combinações de dados de entrada de GHI e temperatura ambiente e GHIt e temperatura do módulo, apresentaram diferenças percentuais abaixo de 3% de energia gerada simulada entre os cenários analisados. Demonstrou-se que para processos de análise de desempenho de usinas fotovoltaicas próximas é necessário apenas um sensor de irradiância horizontal ou no plano e sensor de temperatura, instalado no módulo ou em suporte.

Palavras-chave: Figuras de mérito. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à rede. Dados simulados.

ABSTRACT

Grid-Connected Photovoltaic Systems (SFCRs) significantly propose the expansion of renewable energy sources in the national electricity matrix. These systems can have their energy performance selected through Figures of Merit, such as Yield (Y) and PR (Performance Ratio), as well as the Energy Performance Index (EPI). This work analyzed the performance of photovoltaic solar plants, using simulations with average input data in the installation. Sensors were installed for Global Horizontal Irradiance (GHI) and Global Horizontal Irradiance in the plane of the modules (GHIt), for a temperature environment and module temperature were used LM 35 sensors, respectively installed, one in the local plant and the other behind the photovoltaic module in the center of that. Were provided steps and scenarios, with power plant configurations and input data settings. The Pvsyst program was used to convert the inputs into simulated energy, based on the SFCR configuration. Figures of merit and the monthly EPI made it possible to visualize inverter operation problems, in the measurements, and the inverter power limitation in the analysis made in PVsyst. The simulation with the GHI and ambient temperature input data and the GHIt and module temperature, showed percentage differences of 3% of simulated generated energy between the tested ones. It has been shown that for performance analysis processes of nearby photovoltaic plants, only a horizontal irradiance sensor or in the plane and a temperature sensor is needed, installed in the module or on a support.

Keywords: Figures of merit. Photovoltaic Systems Connected to the Grid. Simulated data.

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira apresenta expansão das energias renováveis nos últimos anos, como apresenta o Balanço Energético Nacional dos dois últimos horizontes 2019 e 2020, desta fatia, a geração solar, principalmente no que tange a geração distribuída dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), (EPE, 2019; EPE, 2020). Conforme levantamento no Banco de Informações de Geração (BIG) da (ANEEL, 2021), a fonte solar fotovoltaica representou, em março de 2021, 1,88% dos empreendimentos de geração em operação no País, com 3,29 GW instalados. Existem ainda 33 empreendimentos de usinas solares fotovoltaicas em construção com potência na ordem de 1,22 GW. O total de usinas fotovoltaicas contratadas e com construção não iniciada é 371 com potência total de 14,59 GW. Some-se a estes números, os 5,04 GW instalados de forma distribuída em 425.806 unidades consumidoras com base nas Regulamentações 482/12 e 687/15.

As plantas fotovoltaicas apresentam perdas esperadas durante o período de operação, que afetam o seu desempenho. As perdas Ohmicas são consideradas no período de geração dos SFCRs, elas decorrem da degradação dos cabos de ligação do sistema (NASCIMENTO; FERREIRA, 2018). Outra perda considerada na operação é a Light Induced Degradation (LID), o processo dá-se nos módulos fotovoltaicos a partir do momento de exposição à luz solar (SILVA *et al.*, 2018). Destaca-se também que os módulos fotovoltaicos possuem desempenho garantidos pelo fabricante de 25 anos, com taxa de degradação dos geradores de aproximadamente 20% nesse período resultando em uma perda de desempenho esperada de menos de 1% por ano

(CASSINI *et al.*, 2018). No processo de geração podem ocorrer as perdas no inversor, elas podem ocorrer durante a conversão de energia de Corrente Contínua (CC) para Corrente Alternada (CA) (NASCIMENTO; FERREIRA, 2018). Dessa forma, as instalações fotovoltaicas irão necessitar periodicamente, aferir o desempenho do sistema instalado ao longo do tempo, para detectar reduções abruptas de eficiência, relacionadas as perdas esperadas, como também a outros processos que durante a operação da usina fotovoltaica podem insurgir em desempenho abaixo do esperado.

As Figuras de mérito permitem analisar o desempenho dos SFRCs, com base em seus balanços energéticos, e dessa forma descrever a eficiência desses sistemas, através dos processos que envolvem a conversão fotovoltaica (ZILLES *et al.*, 2012). A NBR 16724:2014 indica que SFRCs podem ser monitorados por meio de figuras como a taxa de desempenho (PR – Performance Ratio) e a Produtividade (Y – Yield).

Dados medidos na planta fotovoltaica, como o de energia gerada, e dados ambientais, como: valores de temperatura ambiente e dos módulos, Irradiância Global Horizontal (GHI), Irradiância Global Horizontal Transposta (GHIt), auxiliam na obtenção das Figuras de mérito. O adequado registro dos dados de operação deste tipo de instalação, por meio dos sistemas de monitoramento, permite analisar o desempenho, e possibilita detectar problemas na instalação como defeitos ou a ação da sujeira, e assim indica a necessidade de realizar manutenção (ZILLES *et al.*, 2012). Esta forma de simulação também permite que Índice de Desempenho Energético (EPI) também possa ser calculado e utilizado como outro indicador da qualidade da operação e manutenção, conforme IEC 61724-3:2016.

Pretende-se com isto, realizar simulações no PVsyst mais próximas das condições reais de operação de duas usinas fotovoltaicas. As simulações permitirão obter as Figuras de mérito e o EPI, e assim comparar os resultados da ferramenta de simulação com a operação real do sistema fotovoltaico.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Figuras de mérito

As figuras de mérito são parâmetros que representam características de materiais ou equipamentos de acordo com o seu desempenho de conversão de energia (MELLO; RAMPINELLI, 2020). Utiliza-se como referência para diagnosticar a qualidade do sistema FV e identificar necessidades futuras de melhoramento desse empreendimento, como também detectar potenciais problemas (ZHU; XIAO, 2019).

A avaliação do desempenho dos SFRCs considera algumas variáveis que afetam a produção de energia, como irradiação solar, orientação e inclinação dos arranjos, temperatura dos módulos, entre outros. Estas características em plantas fotovoltaicas interferem tanto na eficiência técnica como também financeira (KROTH; RAMPINELLI, 2020).

Para a realização da análise de desempenho as principais Figuras de mérito são: a Produtividade (Y) e a Taxa de desempenho (PR) (TORRES; TIBA; BARBOSA, 2015).

2.1.1 Produtividade (Y)

A produtividade é a relação entre a energia convertida em kWh pela potência instalada do sistema FV em kWp em um determinado período de dias, meses e anos (MARTINS; LIMA; MORAIS *et al.*, 2020). A produtividade em (kWh/kWp) foi calculada conforme a Equação 1.

$$Y = \frac{E}{P_{FV}} \quad (1)$$

Y = produtividade [kWh/ kWp]

E = Energia gerada [kWh]

P_{FV} = Potência nominal do gerador fotovoltaico [kWp]

2.1.2 Taxa de desempenho (PR)

O PR relaciona a energia entregue pelo sistema fotovoltaico com a radiação no plano do módulo fotovoltaico (KROTH; RAMPINELLI, 2020). A taxa de desempenho tem a finalidade de avaliar e comparar sistemas fotovoltaicos conectados à rede de diferentes localidades (MELLO; RAMPINELLI, 2016). Para o cálculo do PR foi utilizada a Equação 2.

$$P_R = \frac{Y}{\frac{H_t}{G}} \quad (2)$$

PR = Taxa de desempenho [%]

Y = Produtividade [kWh/ kWp]

H_t = Irradiância no plano do módulo [kW/m²]

G = Irradiância de referência [1kW/m²].

2.1.3 Índice de Desempenho Energético (EPI)

O Índice de Desempenho Energético (EPI) conforme definido na IEC 61724-3: 2016, caracteriza a operação do sistema, a partir da relação energética, entre a energia real do sistema fotovoltaico produzida e a produção de energia esperada para as condições ambientais observadas.

Para o cálculo do EPI utilizou-se a Equação 3, descrita na IEC 61724-3:2016.

$$EPI = \frac{E_{medido}}{E_{esperado}} \quad (3)$$

Na Equação 3, E_{medido} é a energia medida gerada pelo sistema fotovoltaico em (kWh) e E_{esperado} é a energia esperada (kWh), é obtida por meio de simulações, considerando as condições ambientais e a configuração da usina FV.

2.2 Ferramenta de simulação

As ferramentas de simulação de sistemas fotovoltaicos são fundamentais para verificar a operação destes através da análise das Figuras de mérito. O mercado oferece uma gama de programas de previsão de produtividade, que utilizam dados nominais dos dispositivos que formam o sistema gerador, como também de bases de dados meteorológicos para caracterizar e monitorar plantas fotovoltaicas (OKELLO; DYK; VORSTER, 2015).

2.2.1 PVSyst

O programa de simulação PVSyst é utilizado para avaliar a energia gerada na planta fotovoltaica e obter as Figuras de mérito, esta metodologia consiste em entender como o sistema FV irá funcionar após a instalação do sistema projetado (BEHURA *et al.*, 2021). A ferramenta analisa diversas configurações de sistemas fotovoltaicos, que permite comparar os dados medidos com os dados previstos e realizar diagnósticos da planta fotovoltaica. (OKELLO; DYK; VORSTER, 2015; RAMANAN; KALIDASA; KARTHICK, 2019). O PVSyst foi escolhido como ferramenta para obter as Figuras de mérito, visto a experiência de utilização com dados de entrada medidos apresentada na metodologia de (SILVA; PEDROSA FILHO, 2022).

3 METODOLOGIA

Trata-se de estudo experimental, onde foram obtidas as figuras de mérito de um sistema fotovoltaico por meio de simulação, com dados de entrada medidos na localidade. Foram verificadas as operações das usinas A e B, como apresenta a

Figura 2ra 1.

Figura 2ra 1 - Localização Usina A e B.



Fonte: Autores (2022).

A usina A analisada localiza-se no município de Pesqueira-PE. A instalação contém 208 módulos de silício monocristalino, de potência nominal 405 Wp. A instalação dispõe de dois inversores: inversor de 60 kW e inversor de 15 kW, totalizando 75 kW ambos interligados a rede trifásica. A obtenção das figuras de mérito do sistema considerou os dados do período de outubro de 2021 a maio de 2022. A usina B tem a mesma localização da usina A, e a distância entre elas é de 500 metros. A usina B apresenta mesma configuração da usina A, contudo será somente considerado o inversor de 60 kW trifásico e 168 módulos de silício monocristalino, o inversor de 15 kW foi desconsiderado, visto a indisponibilidade de dados de operação. Foram considerados os dados de energia medida de novembro de 2021 a maio de 2022, não foi considerado o mesmo período da usina A, pois os dados de outubro estavam faltantes.

Os dados utilizados para a obtenção da Produtividade e da Taxa de desempenho, são: Irradiância Global Horizontal (GHI), Irradiância Global Horizontal Transposta (GHIt), temperatura ambiente ($T_{amb.}$) e temperatura na superfície do módulo ($T_{mod.}$). Os dados de GHI e GHIt foram obtidos por piranômetros. O sensor de irradiação da GHIt foi montado no plano dos módulos, em um módulo aleatório, e o de GHI fixado em um suporte na localidade da usina A conforme é apresentado a

Figura 2 – Piranômetro GHI à esquerda e o piranômetro GHIt à direita.



Fonte: Autores (2022).

Os valores de temperatura no módulo e temperatura ambiente foram medidos por sensores LM35. O sensor $T_{mod.}$ foi montado no centro do módulo, que foi escolhido de modo aleatório e o de $T_{amb.}$ fixado em suporte como mostra a *Figura 3*. Ambos os sensores foram instalados na localidade da Usina A. Os dados de energia gerados nas plantas foram obtidos a partir da saída dos inversores das usinas A e B, e utilizados para a comparação entre a operação real e a operação simulada.

Figura 3 – Sensor de temperatura ambiente à esquerda e sensor de temperatura do módulo à direita.



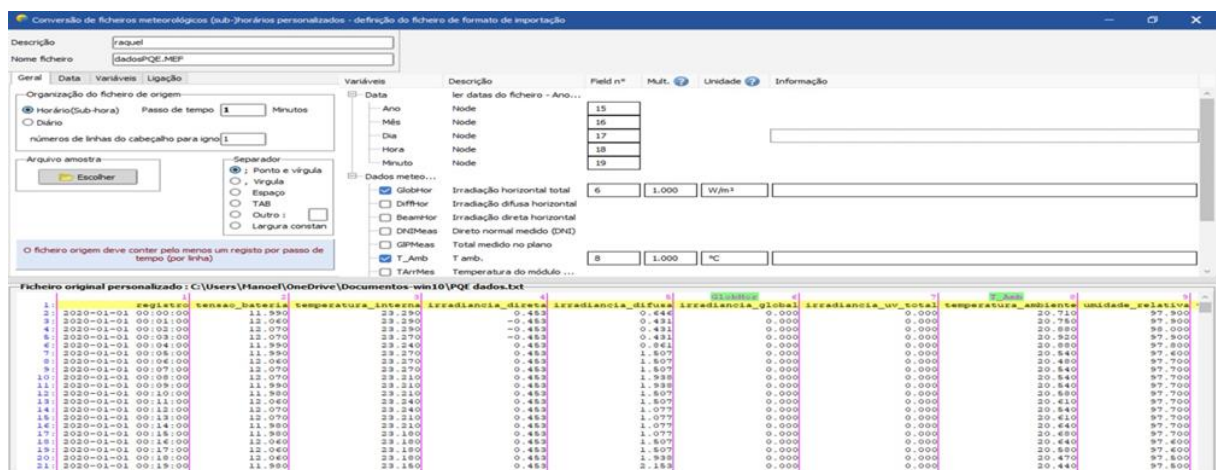
Fonte: Autores (2022).

Os valores obtidos pelos piranômetros e sensores de temperatura foram salvos em um Datalogger a cada um minuto. O sistema de aquisição de dados foi conectado a rede wifi da localidade, e dessa forma os dados foram enviados em arquivo para o

serviço de armazenamento em nuvem (pCloud). Os dados obtidos remotamente a partir do sistema de aquisição de dados, foram tratados no Excel, e organizados em arquivo de formato xlsx.

As medições instantâneos de GHI, GHIt, T_{amb} . e T_{mod} ., foram inseridas como dados de entrada no PVsyst que os utilizou para a obtenção das Figuras de mérito. A metodologia utilizada para a inserção dos dados foi demonstrada no trabalho de (SILVA; PEDROSA FILHO, 2022). Os autores apresentam passo a passo todo processo para obter a energia simulada em (kWh) a partir do uso dos dados de entrada medidos na localidade do sistema fotovoltaico, como apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Interface de inserção de dados PVsyst.



Fonte: Silva e Pedrosa Filho (2022).

Para obter as Figuras de mérito, realizou-se simulações no PVsyst, que foram divididas em etapas e cenários como apresenta a Tabela 1. Após a definição das etapas e cenários, foi realizado na ferramenta de simulação a construção da configuração real dos sistemas fotovoltaicos conforme a ordem da figura da Tabela 1. Foram selecionados o fabricante e a potência dos módulos, como também os inversores. Considerou-se a inclinação dos módulos de 8° , de modo a ficar similar as usinas da operação real.

Tabela 1 - Tabelas de etapas e cenários utilizados na simulação.

Etapa	Cenário	Usina	Configuração da usina	Dados de entrada	Período
I	I	A	Inversor 60 kW 168 módulos de 405 Wp	GHIt e Temperatura do módulo.	out/21 a mai/22
I	II	A	Inversor kW 40 módulos de 405 Wp	GHIt e Temperatura do módulo.	out/21 a mai/22
II	III	B	Inversor 60 kW 168 módulos de 405 Wp	GHI e Temperatura ambiente	nov/21 a mai/22
II	IV	A	Inversor 60 kW 168 módulos de 405 Wp	GHI e Temperatura ambiente	nov/21 a mai/22

Fonte: Autores (2022).

As etapas apresentadas na Tabela 1 foram utilizadas para identificar os dados que serão inseridos no PVsyst. A etapa I utiliza os dados de entrada de GHI_t e T_{mod} , medidos no módulo fotovoltaico, localizado na usina A. A etapa II utiliza os dados de entrada de GHI e T_{amb} medidos na mesma localização.

Os cenários foram utilizados para caracterizar a usina trabalhada, apresentando o sistema gerador, como também teve por função indicar a análise que seria feita por meio da simulação para os quatro cenários apresentados na Tabela 1. O cenário I apresenta a usina A com potência instalada de 60 kW, a simulação foi realizada com os dados de irradiância e temperatura do módulo, a análise desse cenário teve por objetivo verificar a operação real e a simulada, comparando energia mensal gerada, PR e EPI no período de outubro de 2021 a maio de 2022. O cenário II apresenta a usina A com os mesmos dados de entrada utilizados no cenário I medidos na localidade dessa usina, o sistema gerador instalado é de 15 kW. O objetivo desse cenário corresponde a verificar a operação desse sistema através da ferramenta de simulação e dos dados que foram obtidos no datalogger do inversor, a energia mensal gerada, o PR e o EPI, foram objetos de estudo para o cenário II.

O cenário III corresponde a usina B, e foram utilizados os dados de GHI e T_{amb} como dados de entrada para a ferramenta de simulação, o sistema gerador tem potência instalada de 60 kW. Foram analisados a energia gerada simulada e medida da operação real. O objetivo desse cenário foi utilizar os dados medidos na usina A e simular na usina B, de modo a verificar a viabilidade em utilizar dados medidos para obter a energia simulada e verificar a operação desses sistemas.

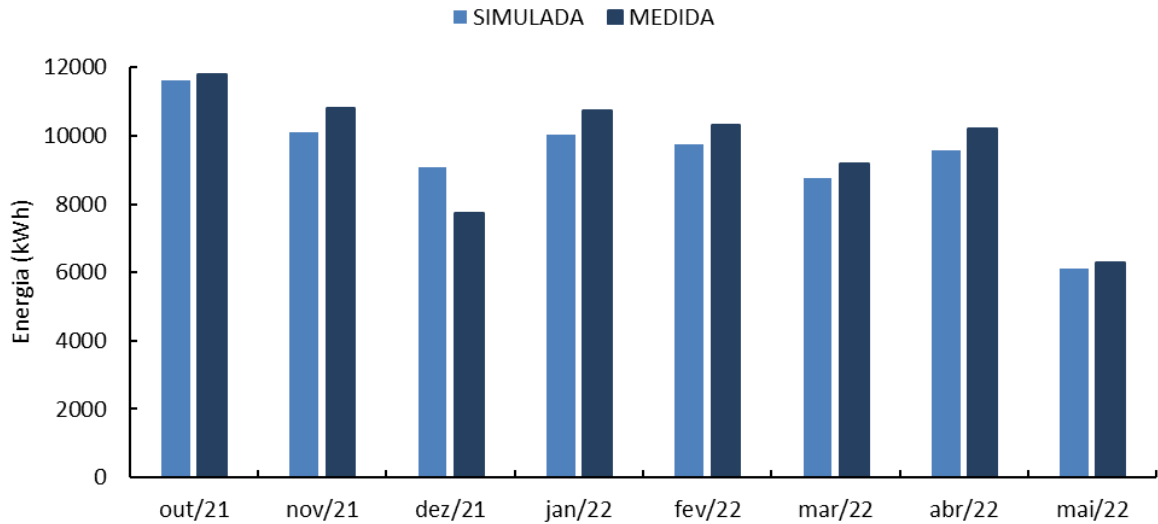
O cenário IV utiliza a usina A, com sistema gerador de 60 kW e utiliza a etapa II como entradas para o PVsyst. O cenário IV tem como objetivos: 1) comparar com o cenário III, e essa análise busca verificar se a distância entre a usina A e a usina B influencia na geração de energia simulada, utilizando os dados de entrada medidos na localidade da usina A. 2) comparar com o cenário I, de modo a verificar a viabilidade em utilizar os quatro sensores (GHI , GHI_t , T_{mod} e T_{amb}) ou de utilizar apenas um sensor de irradiância e um sensor de temperatura, essa análise será feita a partir da energia simulada em kWh.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

4.1 Cenário I

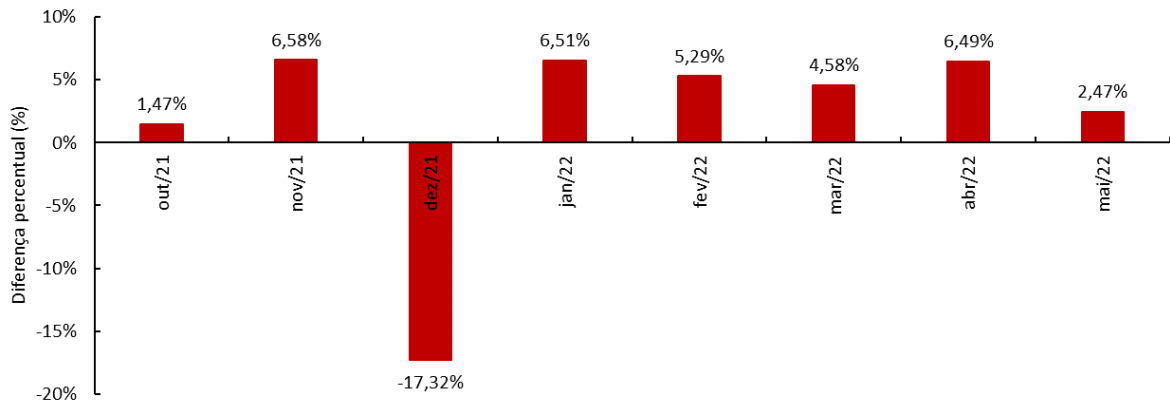
A partir da simulação com os dados de entrada descritos no cenário I, foi possível realizar a simulação do sistema, a operação da instalação foi verificada, durante o período de outubro de 2021 a maio de 2022. A análise do comportamento do sistema é visualizado na Figura 5 que apresenta a relação entre a energia medida e simulada da saída do inversor de 60 kW da Usina I.

Figura 5 - Energia mensal medida e simulada.



Fonte: Autores (2022).

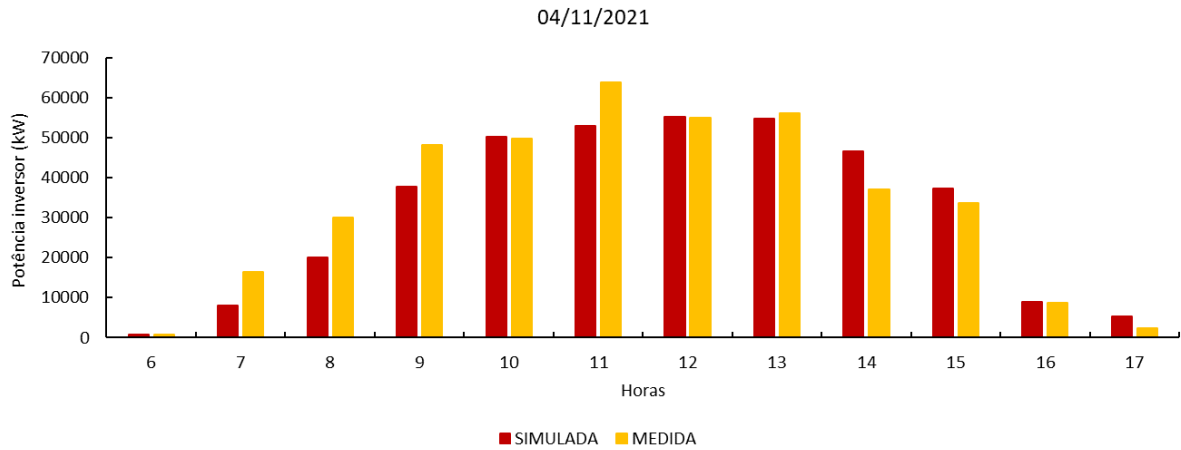
Figura 6 - Diferenças percentuais entre energia medida e simulada.



Fonte: Autores (2022).

Os valores medidos de energia mensal ultrapassam a energia simulada, exceto no mês de dezembro, tal fato foi decorrente da falta de operação do inversor durante 7 dias em dezembro, o que resultou na diferença percentual apresentada, na Figura 6. As diferenças percentuais, apresentadas na Figura 6, são decorrentes do comportamento do inversor na simulação, que no período de maiores valores de irradiância, como no horário das 11 horas o inversor limita sua potência de operação, o que resulta em perdas diárias de energia durante o processo de simulação do programa PVsyst, como apresentado na Figura 7.

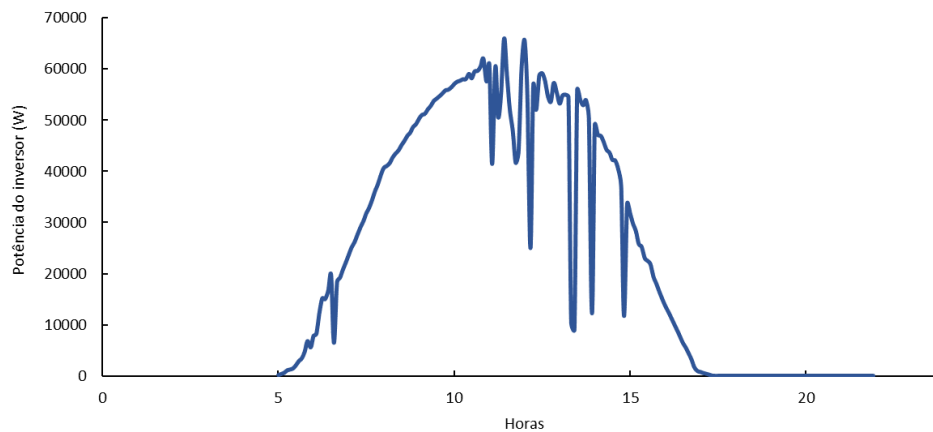
Figura 7 - Potência de operação do inversor 60 kW medido e simulado.



Fonte: Autores (2022).

É possível verificar que o inversor de 60 kW da Usina I opera em situação real acima do valor nominal de 60 kW, e atinge 66 kW, como apresentado na Figura 8. Nos demais horários do dia é verificado que a operação real e simulada apresentam valores próximos de geração de energia.

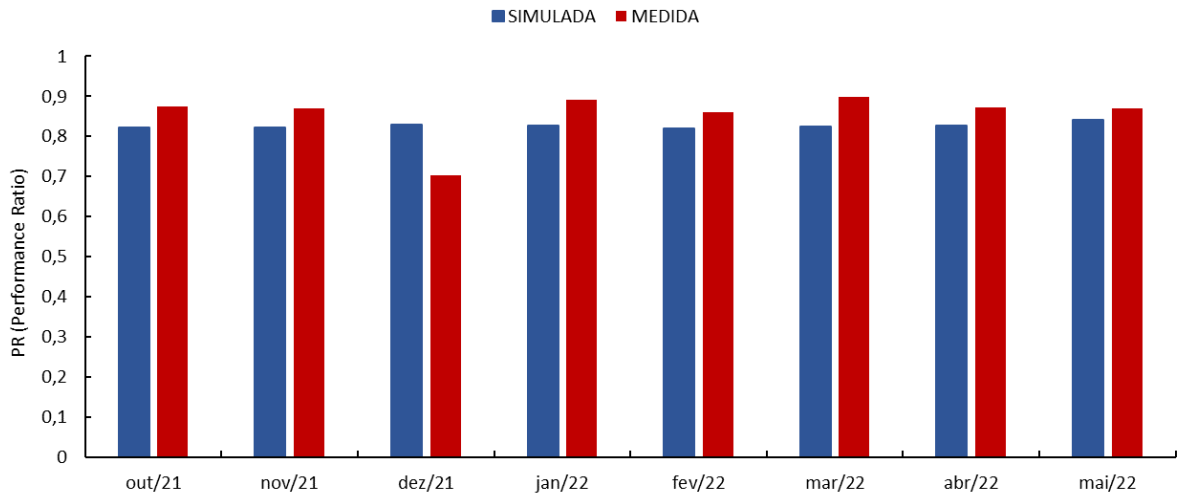
Figura 8 - Operação do inversor de 60 kW Usina I.



Fonte: Autores (2022).

Os comportamentos acima descritos resultaram no PR mensal apresentado na Figura 9, as diferenças entre o PR medido e o simulado, são influenciadas pelo Y. No comportamento do inversor durante a simulação, os valores de potência abaixo do sistema medido apresentado na Figura 7 influenciam na produtividade mensal, visto que a relação KWh/kWp é menor em relação a operação real. O mês de dezembro apresenta o menor PR medido em decorrência de problemas de operação em 7 dias do mês, esse valor representa que a produtividade do sistema simulado foi superior ao medido.

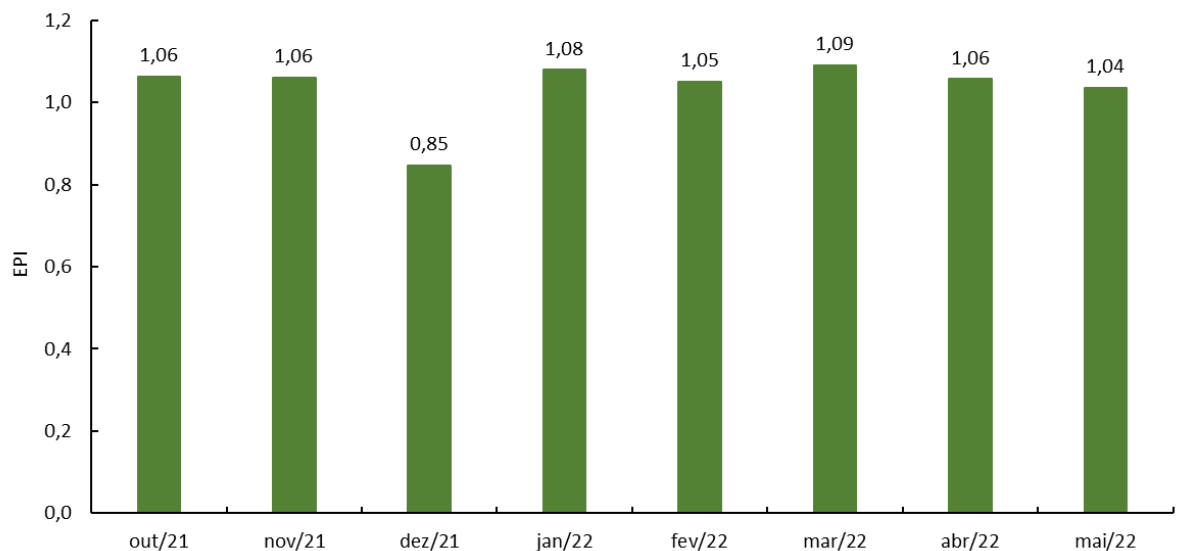
Figura 9 - PR medido e simulado.



Fonte: Autores (2022).

A Figura 10 apresenta o EPI do inversor de 60 kW da Usina I, a relação entre a energia medida e esperada (simulada) apresenta valor médio de 104% , o resultado mostra que a energia medida supera a energia esperada pela simulação e pelos parâmetros climáticos medidos na localidade da usina.

Figura 10 - EPI inversor 60 kW.



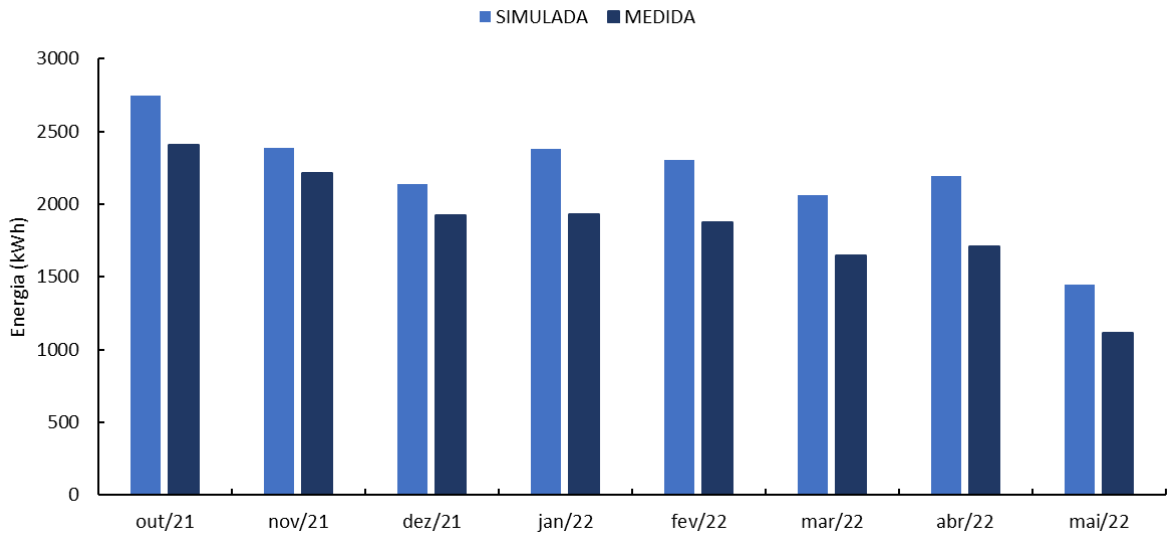
Fonte: Autores (2022).

4.2 Cenário II

A análise do cenário II demonstra situação inversa em relação ao cenário I. A Figura 11 apresenta os dados de energia mensal em KWh medido na saída do

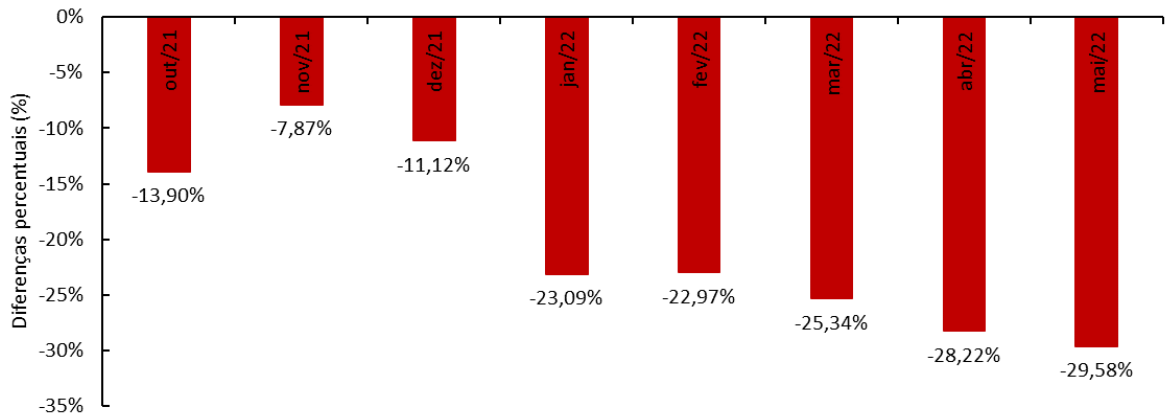
inversor e simulado no programa PVsyst, a energia esperada apresenta maior valor em relação a gerada, os dados de diferença percentual de energia mensal são apresentados na Figura 11 e Figura 12.

Figura 11 - Energia medida e simulada inversor 15 kW.



Fonte: Autores (2022).

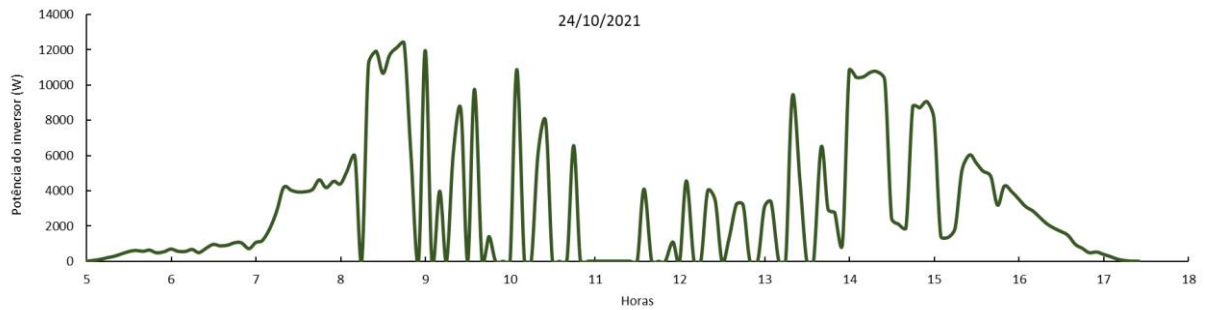
Figura 12 - Diferenças percentuais entre energia medida e simulada.



Fonte: Autores (2022).

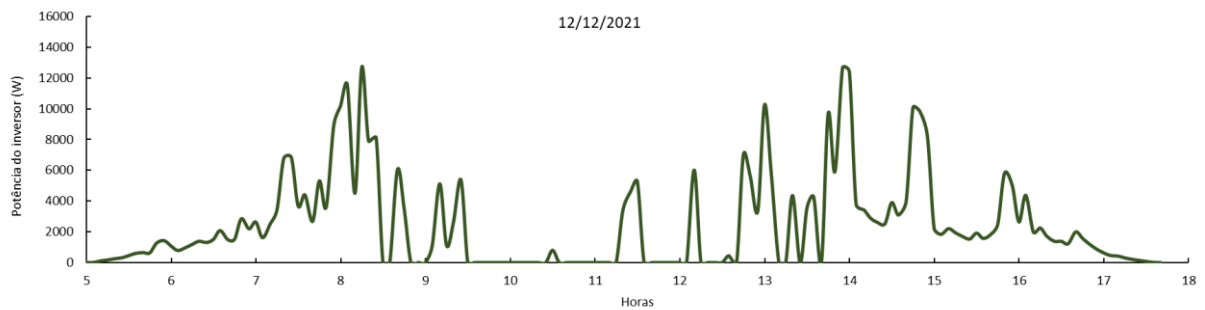
Os valores percentuais, apresentados na Figura 12, são decorrentes de problemas de operação do inversor de 15 kW. Em que o inversor desliga em várias horas do dia, em horários que apresentam maiores valores de irradiância conforme mostrados nas Figura 13, Figura 14, Figura 15 e Figura 16, que ocasiona perdas diárias de energia e resultam nas diferenças apresentadas na Figura 12.

Figura 13 - operação do inversor 15kW em 24/10/2021.



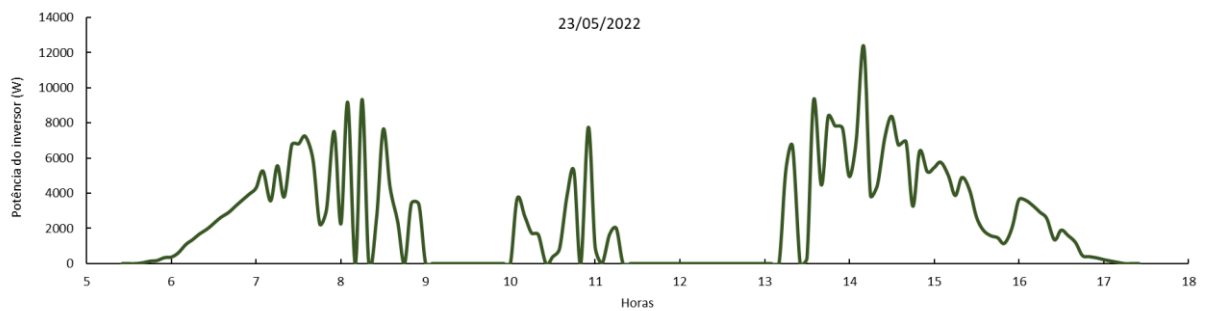
Fonte: Autores (2022).

Figura 14 – operação do inversor 15kW 12/12/2021.



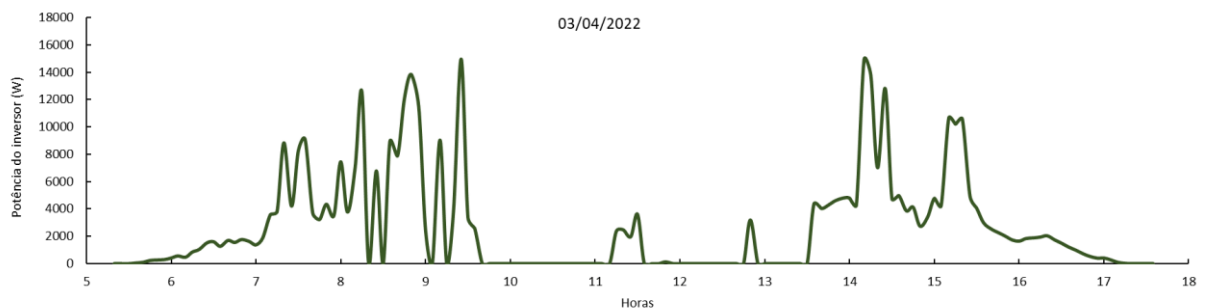
Fonte: Autores (2022).

Figura 15 – operação do inversor 15kW em 23/05/2022.



Fonte: Autores (2022).

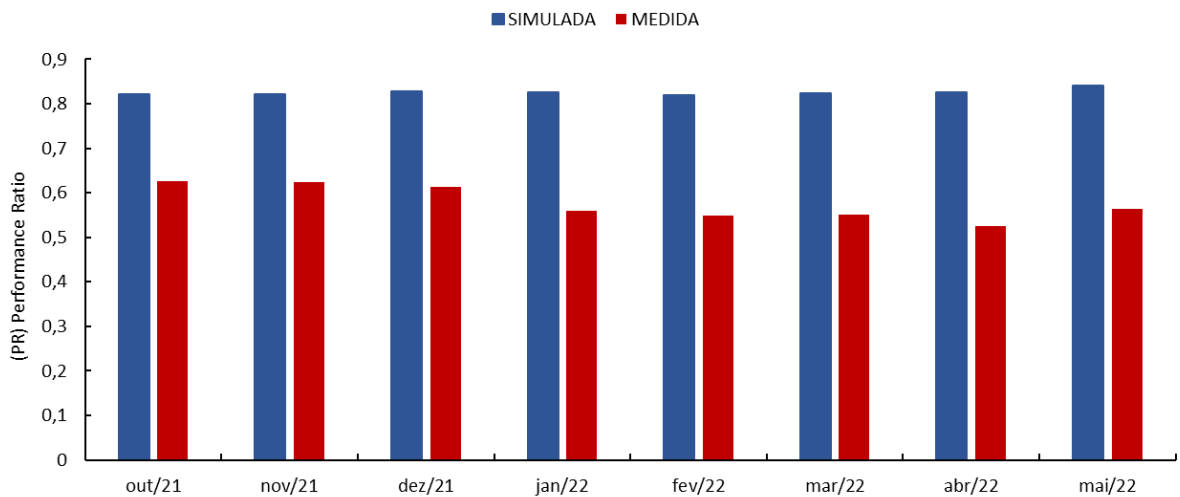
Figura 16 – operação do inversor 15kW 03/04/2022.



Fonte: Autores (2022).

As perdas de energia gerada durante os problemas de operação do inversor de 15 kW, fizeram com que o PR medido mensal fosse muito abaixo do valor apresentado na Figura 9. O PR mostrado na Figura 17 apresenta média mensal simulada de 0,82. O desempenho da operação apresentou uma média de 0,59, esse resultado é decorrente da baixa produtividade do sistema do cenário II.

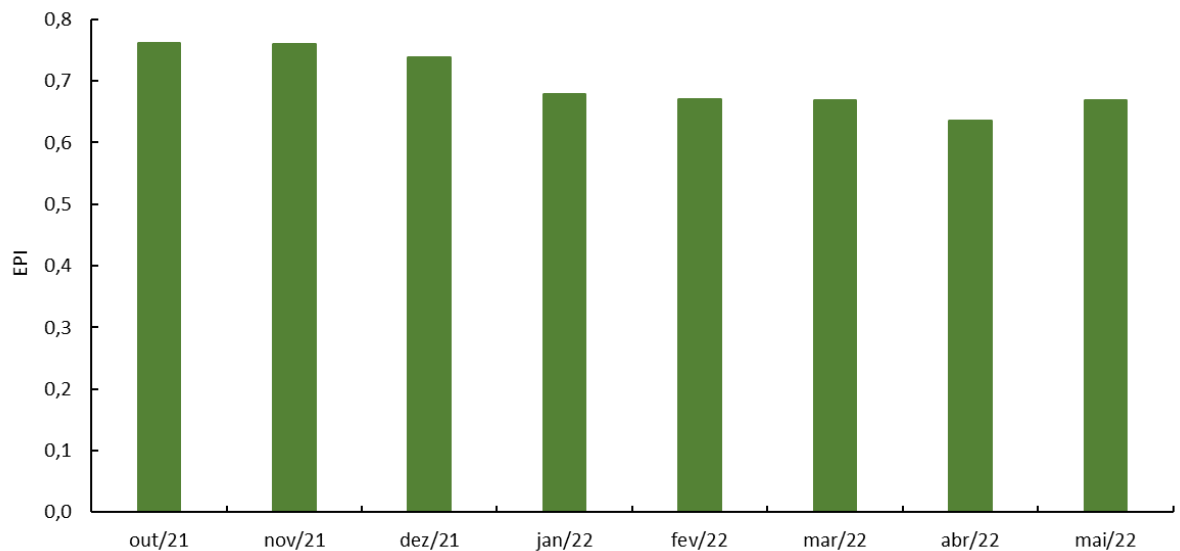
Figura 17 - PR medido e simulado inversor 15 kW.



Fonte: Autores (2022).

A Figura 18 apresenta o EPI do cenário II, a relação entre a energia medida e simulada apresentou média de 70%, esse valor representa que a energia esperada foi maior que a medida na saída do inversor, apresentando comportamento diferente do EPI do inversor de 60 kW da mesma usina, que obteve média 104%.

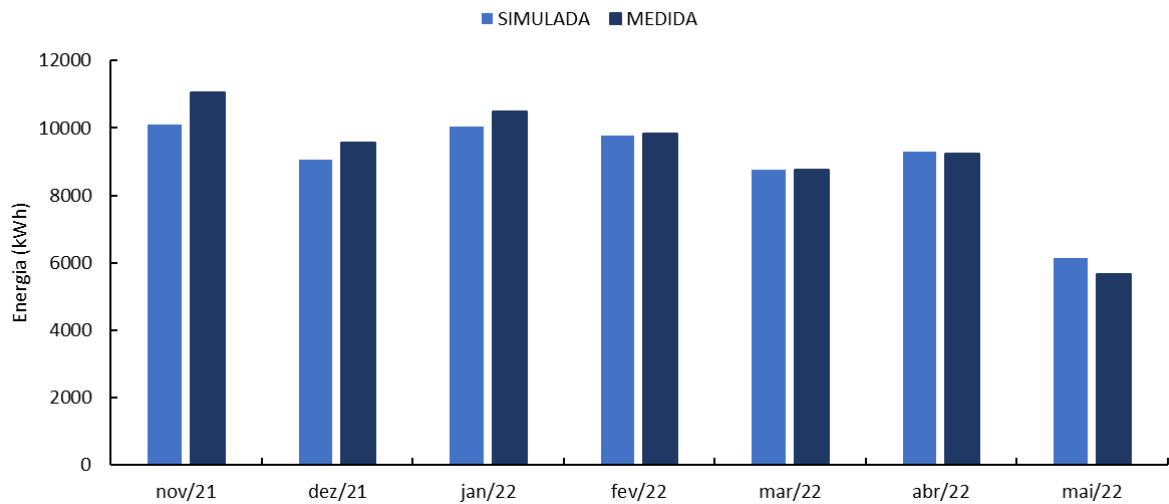
Figura 18 - EPI inversor 15 kW.



Fonte: Autores (2022).

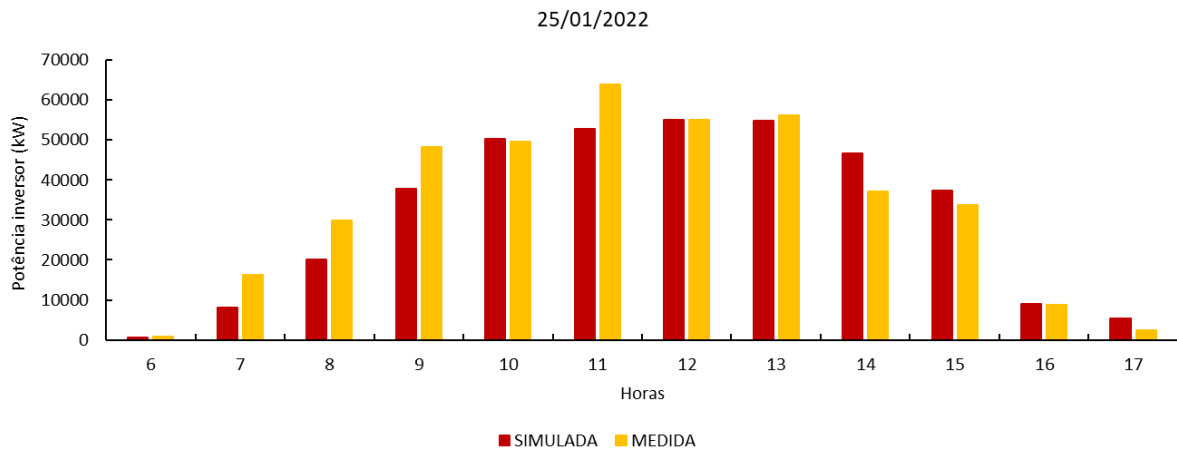
O resultado da operação do sistema fotovoltaico do cenário III é apresentado na Figura 19, a diferença entre a relação de energia medida e simulada, é menor em relação a análise do cenário I, o resultado pode ser atribuído aos dados de entrada de GHI e temperatura ambiente. O inversor de 60 kW da Usina II, apresentou a mesma limitação de potência que o inversor de 60 kW da Usina I mostrado na Figura 20.

Figura 19 - Energia medida e simulada inversor 60 kW.



Fonte: Autores (2022).

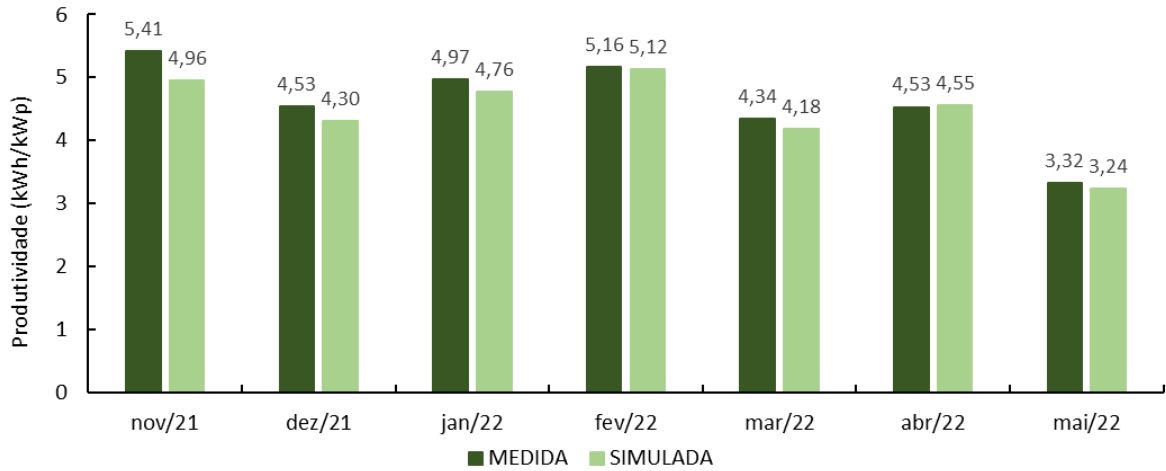
Figura 20 - Operação do inversor simulada e medida.



Fonte: Autores (2022).

A Figura 21 apresenta a Produtividade média diária da operação real e simulada, observa-se que os valores esperados encontram-se próximos aos medidos na geração de energia, em valores médios do período analisado (novembro de 2021 a maio de 2022), a produtividade correspondeu 4,44 kWh/kWp no sistema simulado e 4,61 kWh/kWp no sistema medido.

Figura 21 - Produtividade medida e simulada Usina B.

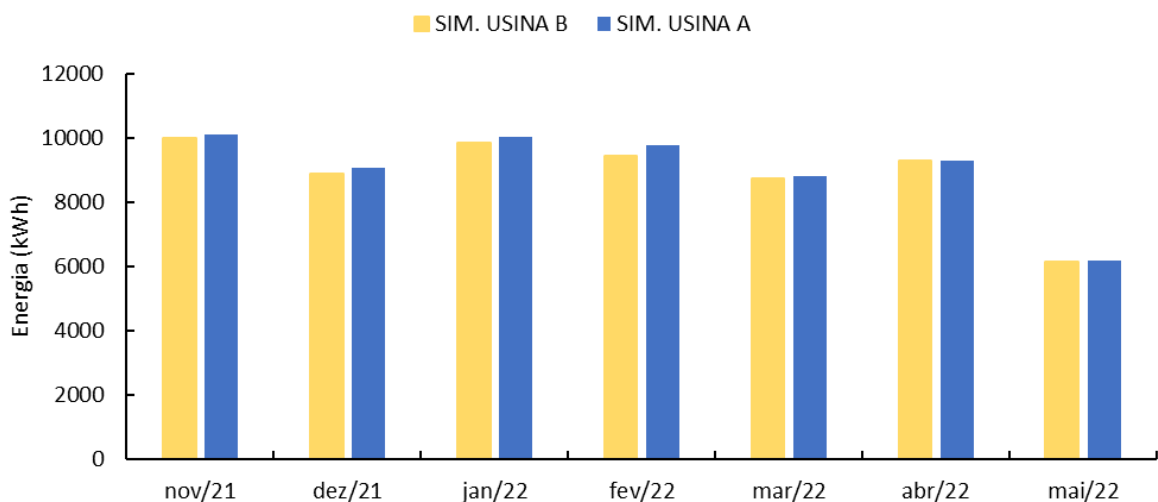


Fonte: Autores (2022).

4.3 Cenário III e IV

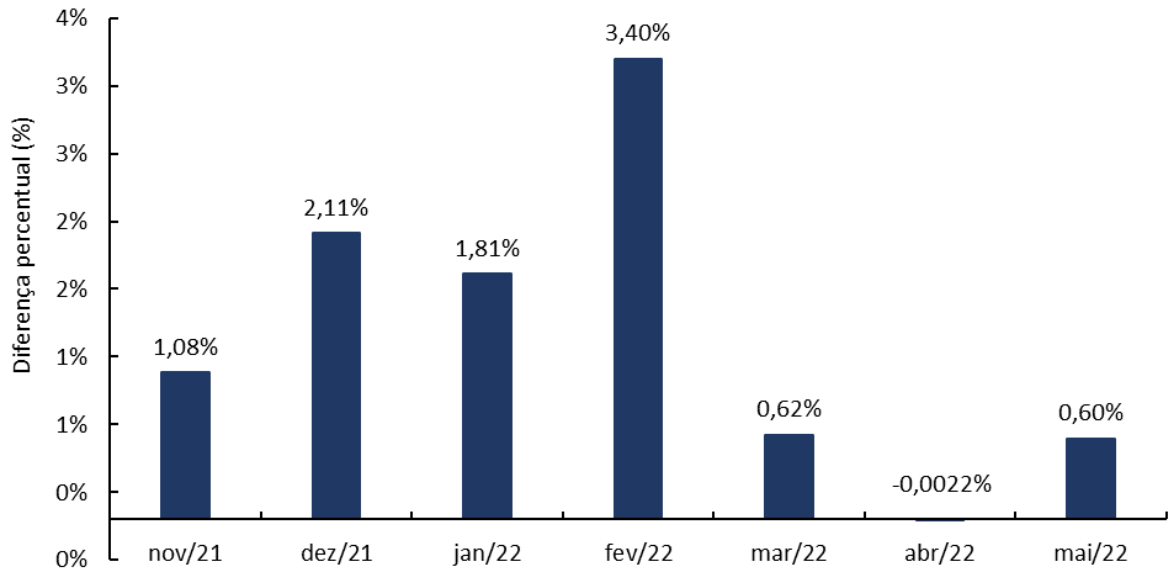
A Figura 22 apresenta análise do cenário III (Usina B) e IV (Usina A), a comparação realizada entre os sistemas permite visualizar um padrão de energia gerada simulada com dados de GHI e temperatura ambiente medidos na usina A e utilizados como dados de entrada para simular a operação da usina B. A diferença percentual de energia entre os cenários III e IV, obtida na Figura 23, apresenta valores abaixo de 4%.

Figura 22 - Energia mensal Usina A e Usina B.



Fonte: Autores (2022).

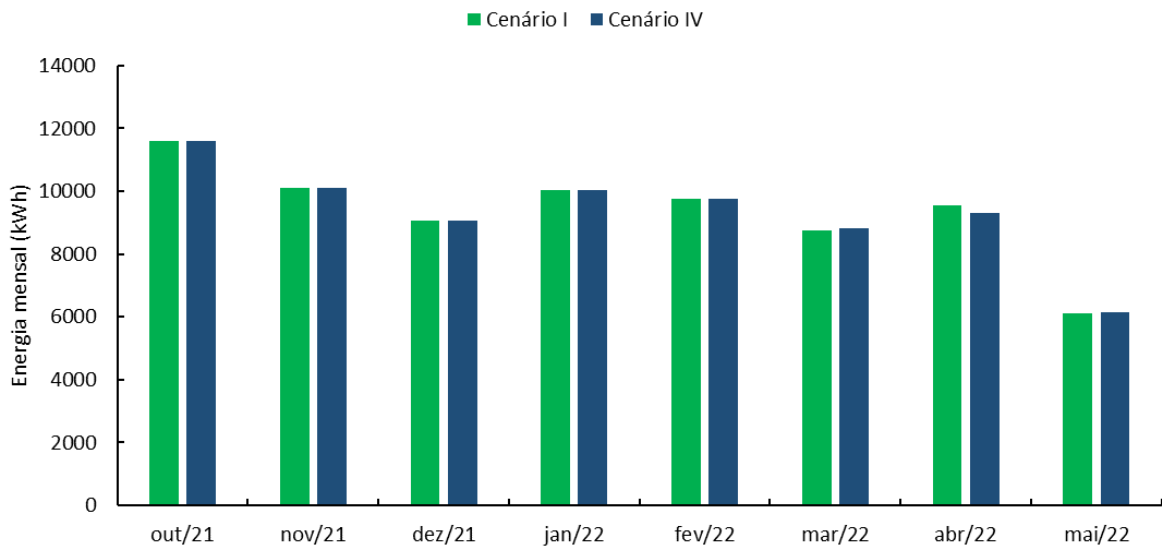
Figura 23 - Diferenças percentuais entre as Usinas A e B.



Fonte: Autores (2022).

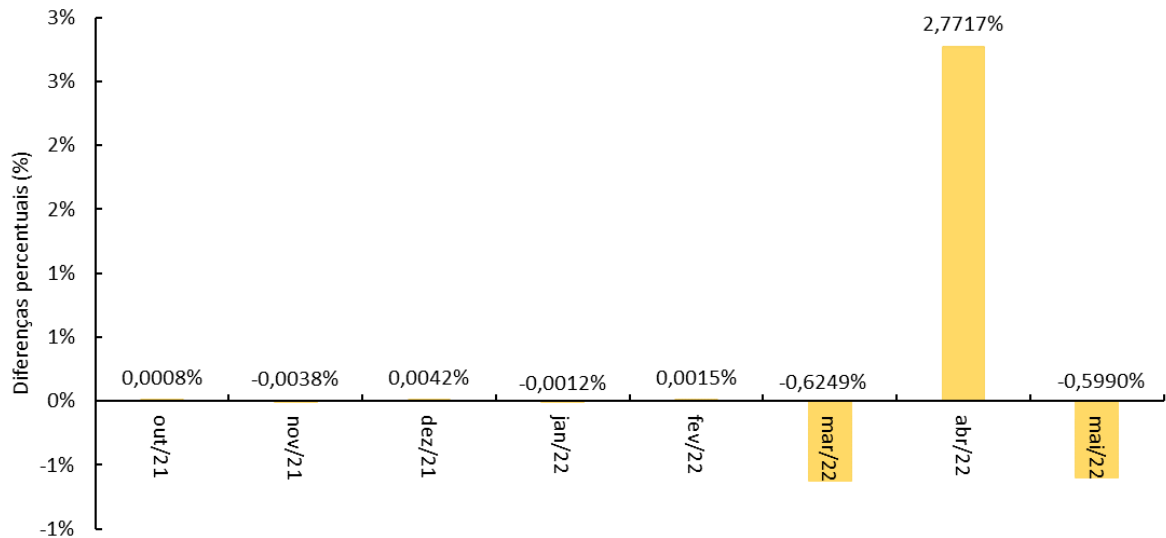
A Figura 24 demonstra a energia mensal nos cenários I e IV, é possível observar que na Figura 25 a geração de energia apresenta diferenças de menos de 3% entre os dois cenários.

Figura 24 - Energia mensal cenário I e cenário IV.



Fonte: Autores (2022).

Figura 25 - Diferenças percentuais entre os cenários I e IV.



Fonte: Autores (2022).

5 CONCLUSÕES

A análise de cenários de plantas fotovoltaicas simuladas e medidas foi apresentada de forma a verificar a operação dos sistemas de geração e a relação entre a energia que é produzida e a esperada a partir de projeções realizadas no programa PVsyst. Os cenários apresentaram resultados que atenderam a operação real da Usina, como também aos parâmetros que o simulador utiliza, quando trabalha com dados medidos na localidade das plantas fotovoltaicas.

O cenário I na operação real apresenta desempenho acima de 0,8 para o medido e simulado, mesmo com a falta de geração de 7 dias do mês de dezembro, o resultado apresentado do EPI apresenta média mensal superior a 100%, esse resultado é válido para o mês de maio que apresentou a menor geração tanto medida quanto simulada. O cenário II apresenta inversor com problemas na operação, visualizadas nas Figuras apresentados no cenário II, que resulta em perdas diárias significativas, e coloca o PR do sistema na média de 0,7.

A análise do cenário III, não apresenta percalços de operação durante o período de análise do sistema, obteve-se energia simulada muito próxima a medida na saída do inversor com diferença abaixo de 4%, o que demonstrou viabilidade em utilizar dados medidos em outras localidades próximas, para a previsão de geração de energia fotovoltaica por meio de ferramenta de simulação.

A simulação realizada com as combinações de dados entrada de GHI e T_{amb} e GHI e T_{mod} , apresentaram diferenças percentuais abaixo de 3% de energia gerada simulada para cenário I em relação ao IV. A análise do gráfico de diferenças percentuais Figura 24 possibilita a utilização de ambas as combinações de entradas disponíveis nas Etapas I e II, apresentadas na Tabela 1, para simular energia e obter as Figuras de mérito em sistemas fotovoltaicos. E dessa forma foi demonstrado que para outras análises de sistemas fotovoltaicos a utilização de muitos sensores, como os utilizados na metodologia deste trabalho não se faz necessário, o que viabiliza o

acompanhamento de usinas por meio da simulação com dados de entrada medidos com um sensor de temperatura e um de irradiância.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT., 2014. NBR 16274: Sistemas fotovoltaicos conectados a rede – Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho. Rio de Janeiro, 2014.

ANEEL. Resultados de Leilões. 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/resultados-deleiloes> >. Acesso em: 19/03/2021.

BEHURA, A. K; KUMAR, A; RAJAK, D. K; PRUNCU, C. I; LAMBERTI, L. Towards better performances for a novel rooftop solar PV system. **Solar Energy**, v. 216, p. 518-529, 2021.

CASSINI, D. A.; OLIVEIRA, M. C.C.; SOARES, L.G.; VIANA, M.M.; LINS, V. F. C.; DINIZ, A.S. A.C.; ZILLES, R.; KARMERSKI, L.L. Avaliação experimental do desempenho da degradação de módulos fotovoltaicos de Si cristalino após 15 anos de exposição em campo. In: **VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS**, Gramado. 2018.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE., 2020. Balanço Energético Nacional 2021: Ano Base 2019. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em: 11 nov. 2021.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE., 2021. Balanço Energético Nacional 2021: Ano Base 2020. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>>. Acesso em: 11 nov. 2021.

KROTH, G; RAMPINELLI, G. A. Análise de Indicadores de Desempenho de um Sistema Fotovoltaico com Distintos Fatores de Dimensionamento de Inversor e Diferentes Ângulos Azimutais. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. Fortaleza. 2020.

MARTINS, J. G. A; LIMA, L. C; MORAIS, F. H. B. L; SILVA, C. D. N.. Comparação das eficiências entre sistemas fotovoltaicos instalados na UECE. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. Fortaleza. 2020.

MELLO, A.; RAMPINELLI, G. Determinação de Índices de Mérito para Avaliar o desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. In: **VI Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. Belo Horizonte. 2016.

NASCIMENTO, L. M. A.; FERREIRA, R. A. F. Otimização de um sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica: considerações sobre a eficiência do sistema e análise de posicionamento. **Revista de Engenharia e Tecnologia**.v.10, N° 3. Dez/2018.

OKELLO, D.; VAN DYK, E. E.; VORSTER, F. J. Analysis of measured and simulated performance data of a 3.2 kWp grid-connected PV system in Port Elizabeth, South Africa. **Energy conversion and management**, v. 100, p. 10-15, 2015.

SILVA, A. M.; MELO, F.C.; FREITAS, L.C.G.; SOUZA, A.C.; FARIAS, V.J. Estudo dos métodos de avaliação de módulos fotovoltaicos em condições reais de operação. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. Gramado. 2018.

SILVA, R. X.; PEDROSA FILHO, M. H. O. Utilização de ferramenta de simulação de plantas fotovoltaicas com dados de entrada medidos. In: **IX Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS**. Florianópolis. 2022.

TORRES, I. C; TIBA, C; BARBOSA, E. M. S. Análise de desempenho de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, instalado em um escritório comercial. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA**, v. 19, p. 61-67, 2015.

ZHU, Y.; XIAO, W. A comprehensive review of topologies for photovoltaic I–V curve tracer. **Solar Energy**, v. 196, p. 346-357, 2020.

ZILLES, R. et al. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. 2012.