

# Análise de desempenho da usina fotovoltaica do IFRS Campus Farroupilha utilizando dados de irradiação e temperatura remotos

Rafael Luiz Casa  
Instituto Federal de Educação, Ciência  
e Tecnologia do Rio Grande do Sul - IFRS  
Av. São Vicente, 785  
Farroupilha, RS, Brasil  
Email: rafaelluizcasa@gmail.com

Ivan Jorge Gabe  
Instituto Federal de Educação, Ciência  
e Tecnologia do Rio Grande do Sul - IFRS  
Av. São Vicente, 785  
Farroupilha, RS, Brasil  
Email: ivan.gabe@farroupilha.ifrs.edu.br

**Resumo**—Este artigo trata dos resultados da disciplina de Trabalho de Conclusão II do curso de Engenharia de Controle e Automação do IFRS Campus Farroupilha. A quantidade de usinas elétricas fotovoltaicas tem aumentado consideravelmente nos últimos anos. Isso se deve, em parte, pela busca por fontes de energia renováveis e limpas e, também, pelos incentivos do sistema de compensação de créditos de energia para instalações de geração distribuída. A quantidade de energia gerada por sistemas desse tipo depende diretamente das condições meteorológicas. Logo podem sofrer grandes variações. O cálculo do índice de desempenho permite avaliar as condições operacionais da usina, calculado com base nos dados meteorológicos e de geração de energia. Este Trabalho de Conclusão de Curso propõe calcular o índice de desempenho da usina fotovoltaica do IFRS Campus Farroupilha com base em dados de irradiação e temperatura de uma estação meteorológica do INMET, avaliando sua variação dentro do período de três anos de operação.

**Palavras Chave**—energia fotovoltaica, índice de desempenho, irradiação

## I. INTRODUÇÃO

Segundo a Resenha Energética Brasileira [1], documento anual do Ministério de Minas e Energia que apresenta a situação da malha energética, a capacidade instalada de geração elétrica no Brasil em 2022 era de 206,4 GW. Dessa capacidade, 11,9% se referem a geração fotovoltaica. Quando se compara a matriz energética de 2021 com a de 2022, a energia solar foi a fonte energética que teve o maior aumento: 11 GW de acréscimo de capacidade instalada. Além disso, 75% desse acréscimo da capacidade solar está na modalidade de geração distribuída. Nessa modalidade os consumidores podem instalar os módulos de geração em sua propriedade e serem compensados pela injeção na rede elétrica da energia sobressalente.

O Programa de Eficiência Energética do IFRS tem como objetivo reduzir custos dos campi reforçando o compromisso ambiental da instituição [2]. A principal iniciativa do programa é a instalação de usinas de geração fotovoltaica nos campi do IFRS. Com essa ação, estima-se obter uma economia de aproximadamente R\$ 1 milhão anuais, produzindo cerca de 65% da energia consumida pelo IFRS.

O projeto iniciou em 2019 com o plano de adquirir usinas fotovoltaicas para 16 campi do IFRS e reitoria. Com o elevado custo da iniciativa, esse programa foi dividido em etapas. Na primeira etapa foram adquiridas 24 usinas de 18,48 kWp, atendendo 9 campi. Na segunda etapa, mais 15 usinas de 25 Kw e 9 usinas de 75 kWp foram instaladas. A Tab. I apresenta a potência instalada de usinas fotovoltaicas nos campi do IFRS atualmente. O campus Farroupilha possui uma usina de 55,44 kWp proveniente da primeira etapa operando desde junho de 2021. Além disso, o campus possui uma usina de 25 kWp obtida na segunda etapa do programa em operação desde outubro de 2023.

Tabela I  
POTÊNCIA DAS USINAS FOTOVOLTAICAS INSTALADAS NOS CAMPI DO IFRS ATÉ JUNHO DE 2024

Campi do IFRS	Potência instalada (kWp)
Alvorada	36,96
Bento Gonçalves	75
Canoas	75
Caxias do Sul	80,44
Erechim	100
Farroupilha	80,44
Feliz	100
Ibirubá	100
Osório	100
Porto Alegre	100
Restinga	100
Rio Grande	180,44
Rolante	61,96
Sertão	180,44
Vacaria	61,96
Veranópolis e Reitoria	100
Total	1532,64

A geração de energia elétrica a partir da radiação solar é feita com células fotovoltaicas. Essas células são dispositivos construídos em material semicondutor que são capazes de transformar a radiação proveniente do sol em eletricidade. Essas células são arranjadas em circuitos série-paralelos criando módulos fotovoltaicos, que são as placas disponíveis

comercialmente [3].

Esses módulos geram energia elétrica proporcionalmente à incidência de radiação solar sobre elas. A intensidade da irradiância solar varia conforme múltiplas situações: a posição do Sol no céu, ângulo de inclinação do módulo, direcionamento do módulo, cobertura de nuvens, etc. Portanto, existem dificuldades em determinar a irradiação solar sobre o módulo para verificar se o módulo produziu eletricidade com a eficiência esperada. Adicionalmente, por se tratar de um dispositivo semiconductor, as células fotovoltaicas têm suas características modificadas em função de sua temperatura. Portanto, mesmo sabendo a irradiação incidente sobre a placa, a quantidade de energia gerada pode ser diferente do projetado por conta da temperatura da placa, que é influenciada pela temperatura ambiente, ventos e sombreamentos [4].

O monitoramento de uma usina fotovoltaica é crucial para garantir a continuidade da produção de energia, bem como para realizar análises precisas de desempenho e identificar necessidades de manutenção. Através de sistemas de monitoramento avançados, é possível detectar rapidamente quaisquer anomalias ou falhas nos componentes da usina, como inversores ou módulos solares, permitindo intervenções imediatas que minimizam o tempo de inatividade e a perda de produção. Além disso, o acompanhamento constante dos dados de performance facilita a implementação de programas de manutenção, prolongando a vida útil dos equipamentos e assegurando um retorno de investimento mais robusto e sustentável ao longo do tempo [5].

Os dados de irradiância e temperatura são fundamentais para a análise do desempenho de uma usina fotovoltaica, pois eles influenciam diretamente a eficiência e a capacidade de geração de energia dos painéis solares. A irradiância, que é a densidade superficial de potência da radiação solar, é um indicador crucial da potência que os painéis podem gerar em condições ideais. Já a temperatura afeta a eficiência dos módulos fotovoltaicos, uma vez que com o aumento da temperatura ocorre a redução da eficiência de conversão da irradiação solar em eletricidade. Ao monitorar essas variáveis, é possível ajustar os modelos de previsão de produção e identificar desvios de desempenho que possam indicar problemas ou oportunidades de otimização. Dessa forma, a coleta e análise contínua desses dados permitem uma gestão mais precisa e eficiente da usina, assegurando que ela opere de maneira ideal e com o máximo rendimento possível [6].

A obtenção desses dados para os cálculos de previsão de geração pode ser feita de algumas formas diferentes, como: uso de dados meteorológicos históricos, instalação de sensores e coleta de dados junto à usina ou uso de dados de estações meteorológicas. No primeiro caso, será possível analisar se a geração da usina é condizente com a média esperada, porém não será possível identificar se os desvios de geração foram causados por condições meteorológicas atípicas ou problemas na usina. Já para o segundo caso, existe a necessidade de adquirir, instalar, calibrar e manter os sensores e a instrumentação necessária para realizar as medições. Essas condições geram a necessidade de um investimento maior e o aumento da

manutenção do sistema a fim de se obter dados confiáveis. Por fim, o uso de dados de estações meteorológicas se mostra uma alternativa mais viável para o uso de dados reais nas análises. O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) mantém uma rede de estações automáticas que geram, de hora em hora, dados meteorológicos, como temperatura e irradiação solar. Esses dados ficam disponíveis para consulta gratuita no site da instituição [7].

#### A. Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho da usina fotovoltaica do IFRS Campus Farroupilha utilizando como base o cálculo do índice de desempenho da usina comparados mês a mês, fazendo uso dos dados de irradiação medidos pela estação meteorológica do INMET de Bento Gonçalves.

#### B. Objetivos Específicos

- 1) Obter dados solares da estação do INMET de Bento Gonçalves;
- 2) Obter os dados de geração elétrica da usina a partir do sistema de monitoramento do inversor solar;
- 3) Calcular o índice de desempenho da usina fotovoltaica com base na produção real da usina e os dados de irradiância da estação do INMET;
- 4) Analisar os resultados de índice de desempenho durante os três anos de operação da usina e discutir os efeitos que levaram a sua redução;
- 5) Analisar maneiras de detectar diminuições da performance da usina com base em dados diários;

Esse artigo está organizado da seguinte maneira: Na seção II será apresentada a fundamentação teórica dos tópicos pertinentes ao trabalho. Na seção III será apresentada a metodologia utilizada nesse trabalho. Na seção IV será apresentado o desenvolvimento desse trabalho, na seção V serão apresentados os resultados e as discussões levantadas por esse trabalho e na seção VI está a conclusão do trabalho.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### A. Radiação Solar

A radiação solar é a energia emitida pelo Sol na forma de ondas eletromagnéticas. Esta energia é produzida através de reações nucleares no núcleo do Sol, onde átomos de hidrogênio se fundem para formar hélio, liberando enormes quantidades de energia [8]. A radiação solar abrange uma ampla gama de comprimentos de onda, incluindo luz visível, ultravioleta (UV) e infravermelha (IV) [9].

A energia solar que atinge o topo da atmosfera terrestre é chamada de radiação solar extraterrestre [10]. Parte desta radiação, ao penetrar a atmosfera da Terra é absorvida ou refletida pelo vapor de água e outros gases existentes na atmosfera, outra parte consegue atingir diretamente a superfície terrestre. A parte da radiação que atinge a superfície terrestre sem sofrer influências das partículas da atmosfera é chamada de Radiação direta. Já a parte da radiação que atinge a superfície após ser refletida por partículas da atmosfera é chamada de radiação

difusa. A soma destas duas frações é chamada de radiação global [9].

### B. Conversão Fotovoltaica de Energia

A conversão fotovoltaica de energia é um processo no qual a radiação solar é convertida diretamente em eletricidade através de células solares. Este processo baseia-se no efeito fotovoltaico, descoberto por Alexandre Edmond Becquerel em 1839, que consiste na geração de uma corrente elétrica quando a radiação incide sobre um material semicondutor [3].

Atualmente, o material mais comum utilizado para a produção de células solares é o silício e as células são compostas por uma junção p-n, onde duas camadas de semicondutores com diferentes tipos de dopagem (p para positivo e n para negativo) são colocadas em contato. A interface entre essas camadas cria o campo elétrico necessário para o efeito fotovoltaico [11].

Como as células são elementos pequenos e frágeis, elas são montadas em estruturas chamadas de módulos solares. Os módulos são estruturas compostas de várias células solares conectadas, uma estrutura metálica e películas de proteção. As células são conectadas em série, assim suas tensões são somadas e é possível obter tensões mais elevadas nas saídas dos módulos [11].

### C. Sistemas de Geração Fotovoltaica

Os sistemas de geração fotovoltaica podem ser separados em 3 tipos: *ongrid*, híbrido e *offgrid*. Os sistemas *offgrid* são sistemas isolados da rede elétrica. Nesses sistemas, a energia elétrica excedente é armazenada em baterias para ser utilizada em momentos que a geração solar não supre a demanda de consumo. Já os sistemas *ongrid* são sistemas que estão conectados à rede elétrica e injetam o excedente de energia gerado na rede. Por último, os sistemas híbridos são sistemas conectados à rede, mas que também possuem armazenamento de energia por baterias. Essa estratégia pode ser usada para evitar o consumo de energia da rede elétrica nos horários de pico, caso a unidade consumidora esteja sujeita a tarifas maiores nesses momentos [12].

Um sistema típico de geração fotovoltaica *ongrid* é composto pelos módulos solares, um inversor e a conexão à rede elétrica da concessionária, por meio de um medidor bidirecional [13]. Um exemplo de sistema fotovoltaico é mostrado na Fig. 1

Conforme definições da lei 14.300 de 2022, são definidos sistemas de microgeração de energia elétrica aqueles cuja potência nominal é igual ou inferior a 75 kW. Além disso, sistemas acima de 75 kW até 5 MW são classificados como minigeração e ambos podem aderir a modalidade de compensação de energia elétrica, onde os excedentes são injetados na rede elétrica e são ponderados como crédito energético para a instalação [15]. Conforme informações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) existem 2,6 milhões de usinas fotovoltaicas conectadas à rede elétrica na modalidade de geração distribuída, com uma potência total instalada de 29,3 GW [16].

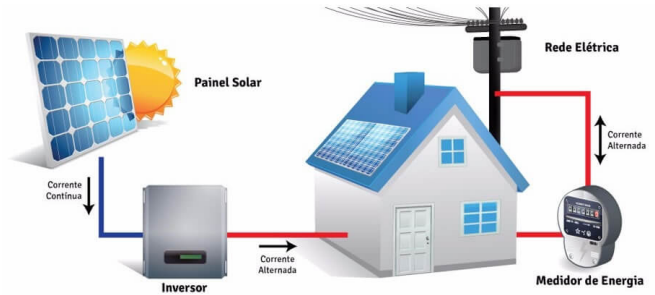


Figura 1. Ilustração de um sistema de geração fotovoltaico [14]

A eletricidade gerada pelos módulos solares é em corrente contínua. O inversor é responsável por converter essa energia para corrente alternada, compatível com os dispositivos elétricos e a rede elétrica da concessionária [17].

A análise do desempenho de uma usina fotovoltaica pode ser obtida com o cálculo do índice de desempenho (*Performance Ratio* - PR - da sigla em inglês). O PR apresenta a razão entre a energia gerada pelo sistema durante o período analisado e a energia incidente no plano do sistema durante o mesmo período. Com isso, essa métrica permite comparar o desempenho da conversão fotovoltaica de energia do sistema em diferentes períodos, mitigando a interferência da diferença de irradiação solar entre os períodos. A fórmula básica para calcular o PR é apresentada na Eq. (1). Onde  $E_{gerada}$  é a quantidade de energia gerada pela usina e  $E_{teorica}$  é a quantidade de energia calculada a partir da irradiação incidente nos módulos, corrigida pela influência da temperatura, conforme calculado pela Eq. (2). O cálculo da  $E_{teorica}$  é feito com base na irradiação ( $I_{\beta}$ ), a potência de pico instalada ( $P_p$ ), a temperatura da célula ( $T_c$ ), o período de análise ( $t$ ) e mais alguns parâmetros informados pelo fabricante dos módulos. A irradiação de referência ( $I_{ref}$ ), igual a  $1000 \text{ W/m}^2$  e a temperatura de referência ( $T_{ref}$ ), iguais a  $25^{\circ}\text{C}$ . Além disso, é necessário o valor do coeficiente de temperatura de potência máxima dos módulos ( $\gamma$ ), que para os módulos desta usina vale  $-0,37 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ . A temperatura da célula ( $T_c$ ) é estimada pela Eq. (3) com base na temperatura ambiente ( $T$ ), a irradiação global e a temperatura nominal de operação da célula ( $TNOC$ ), que, conforme o fabricante dos módulos, é de  $45^{\circ}\text{C}$ . Uma queda nos valores de PR sugere a presença de ineficiências, que podem ser causadas por problemas técnicos, sombreamento, sujeira nos módulos, entre outros [18].

$$PR = \frac{E_{gerada}}{E_{teorica}} \quad (1)$$

$$E_{teorica} = P_p \left( \frac{I_{\beta}}{I_{ref}} \right) (1 + \gamma(T_c - T_{ref})) t \quad (2)$$

$$T_c = T + I_\beta \left( \frac{TNOC - 20}{800} \right) 0,9 \quad (3)$$

#### D. Obtenção de Dados de Radiação Solar

Medir a quantidade de radiação solar que atinge a superfície da Terra é de fundamental importância para os estudos necessários para a simulação de energia elétrica gerada pelas usinas fotovoltaicas. Para medir a radiação solar disponível na superfície terrestre podem ser usados um piranômetro ou uma célula de referência. Estes instrumentos são capazes de medir a radiação solar global que incidem sobre eles. Os modelos mais comuns de piranômetros são os termoeletrônicos e os fotovoltaicos [8], [9].

Os piranômetros termoeletrônicos possuem um receptor pintado de preto, que consegue absorver a radiação solar incidente sobre ele. Esse receptor é conectado a um sensor de temperatura e a variação de temperatura é utilizada pelo sensor para obter o valor da radiação absorvida [8], [9]. Já os piranômetros fotovoltaicos são construídos com uma célula fotovoltaica. O sensor obtém o valor da radiação solar com base na queda de tensão do módulo próxima a corrente de curto-circuito [8], [9].

Além da radiação disponível na superfície terrestre, alguns cálculos de radiação solar necessitam dos dados de radiação extraterrestre, ou seja, a radiação solar total que chega ao planeta Terra antes de ser impactada pela atmosfera. Essa observação é feita por satélites meteorológicos, que podem medir a radiação solar antes de ela ser influenciada pela atmosfera [9].

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) possui uma rede de estações automatizadas de coleta de dados meteorológicos por todo o país. Os dados ficam disponíveis para consulta no próprio site do Instituto de forma horária. Entre os dados coletados por essas estações está a radiação solar global incidente no plano horizontal. Um mapa das estações disponíveis no estado do Rio Grande do Sul é apresentado na Fig. 2.

### III. METODOLOGIA

Este trabalho analisa o desempenho de uma usina fotovoltaica instalada no IFRS Campus Farroupilha. A usina tem uma potência instalada de 55,44 kWp e é composta por 144 módulos JA Solar JAM72S09-385/PR. Desses, 54 módulos estão direcionados à leste e o resto à oeste. Todos os módulos estão com inclinação de 10 graus em relação a horizontal. Essa usina nunca recebeu manutenção desde sua entrada em funcionamento.

A estação do INMET utilizada neste trabalho é a estação de Bento Gonçalves, identificada pelo código A840. Localizada na latitude -29,164581, longitude -51,534202 e com altitude de 623 metros acima do nível do mar, essa estação está localizada à 18,44 quilômetros do IFRS Campus Farroupilha, conforme mostra o mapa da Fig. 3.

<sup>2</sup>Imagem criada pelo autor com base nos dados disponíveis em [7].

<sup>3</sup>Imagem criada pelo autor.

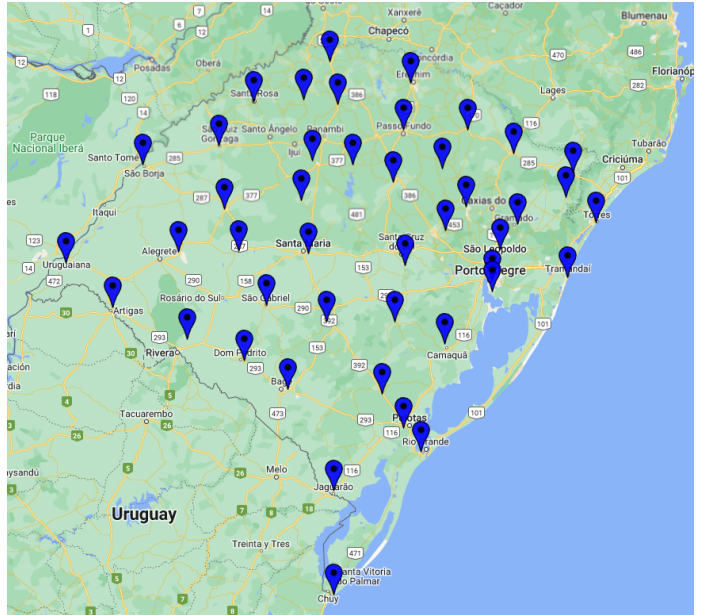


Figura 2. Mapa das estações automáticas do INMET no Rio Grande do Sul<sup>2</sup>

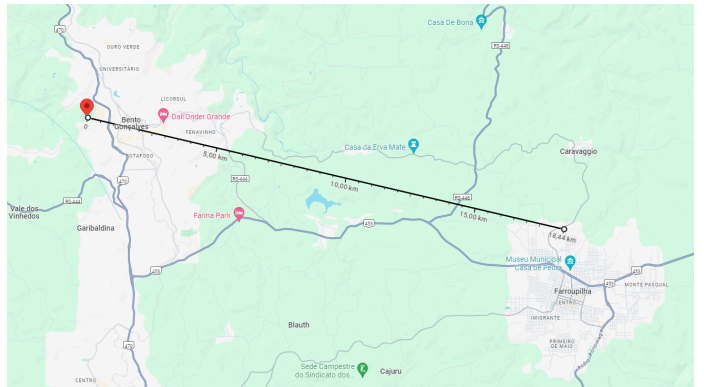


Figura 3. Mapa da Estação do INMET e do IFRS Campus Farroupilha<sup>3</sup>

O software Microsoft Excel foi utilizado para manipular os dados obtidos, fazer os cálculos descritos nesse artigo, analisar os resultados obtidos e gerar os gráficos exibidos nesse trabalho.

O cálculo da geração esperada da usina fotovoltaica está em função da irradiância solar que atinge os módulos. O valor de irradiância solar obtida da estação do INMET

A estação meteorológica do INMET coleta o dado de irradiância solar que incide sobre uma superfície horizontal, porém, como os módulos fotovoltaicos estão inclinados em relação ao solo, a irradiância solar que incide sobre eles é diferente daquela medida pelo INMET. E, para calcular a geração esperada da usina fotovoltaica, é necessário utilizar a irradiância solar que incide sobre os módulos.

Para converter a irradiância global horizontal ( $I$ ) para a irradiância global sobre superfície inclinada ( $I_{\beta}$ ), primeiro é necessário separar a irradiância global horizontal em irradiância direta horizontal ( $I_b$ ) e irradiância difusa horizontal ( $I_d$ ).

A relação entre a irradiação difusa e a irradiação global é dada pela correlação de Erbs, Kelin e Duffie [19] mostrada na Eq. (4). Trata-se de uma equação definida por partes em função do índice de claridade  $K_t$ . Já o índice de claridade é calculado pela Eq. (5), em função da irradiação global horizontal ( $I$ ) e a irradiação global extraterrestre ( $I_0$ ).

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0,09k_T; & k_T \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604k_T + 4,388k_T^2 - 16,638k_T^3 + \\ \quad + 12,336k_T^4; & 0,22 < k_T \leq 0,8 \\ 0,165; & k_T > 0,8 \end{cases} \quad (4)$$

$$K_t = \frac{I}{I_0} \quad (5)$$

Os dados de irradiação global extraterrestres podem ser obtidos no *SOLPOS Calculator* [20], site do Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos Estados Unidos (NREL). Os dados são obtidos por meio de algoritmos desenvolvidos pelo NREL com base em dados de satélite.

Com isso, a irradiação difusa horizontal ( $I_d$ ) é obtida pela Eq. (6) e a irradiação direta horizontal ( $I_b$ ) pela Eq. (7)

$$I_d = I \cdot \frac{I_d}{I} \quad (6)$$

$$I_b = I - I_d \quad (7)$$

Agora, para converter esses valores de irradiância horizontal para a irradiância que incide na superfície inclinada dos módulos fotovoltaicos, é preciso calcular diversos parâmetros do posicionamento solar no céu. A declinação solar ( $\delta$ ), em graus, para cada dia do ano  $d_n$  é calculada pela Eq. (8).

$$\delta = 23,45 \sin \left[ \frac{360}{365} (d_n + 284) \right] \quad (8)$$

Já o ângulo do dia ( $\Gamma$ ) para cada dia do ano  $d_n$  é obtido pela Eq. (9). Esse valor é necessário para se calcular o valor da equação do tempo ( $E_t$ ), conforme Eq. (10), em minutos. A equação do tempo é um fator de correção do cálculo do horário solar.

$$\Gamma = \frac{2\pi}{365} (d_n - 1) \quad (9)$$

$$E_t = 229,18 \cdot (0,000075 + 0,001868 \cos \Gamma - 0,032077 \sin \Gamma - 0,014615 \cos 2\Gamma - 0,04089 \sin 2\Gamma) \quad (10)$$

Com isso, é possível calcular a hora solar verdadeira ( $TSV$ ), em minutos, a partir da hora oficial ( $TO$ ), a longitude ( $L$ ) e a equação do tempo, conforme Eq. (11). Assim, é possível calcular o ângulo horário ( $\omega$ ), a partir da Eq. (12).

$$TSV = TO + 4L + E_t \quad (11)$$

$$\omega = \frac{TSV}{4} - 180 \quad (12)$$

O ângulo de zênite solar ( $\theta_z$ ), calculado pela Eq. (13), se baseia nos valores de declinação solar ( $\delta$ ), latitude ( $\phi$ ) e ângulo horário ( $\omega$ ).

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (13)$$

Já o ângulo de azimute solar ( $\gamma_s$ ) é obtido com base nos valores de ângulo de zênite solar ( $\theta_z$ ), latitude ( $\phi$ ) e declinação solar ( $\delta$ ), conforme Eq. (14). Por fim, o ângulo de incidência dos raios solares ( $\theta_s$ ) é calculado pela Eq. (15). Ele depende dos valores de ângulo de zênite ( $\theta_z$ ), azimute solar ( $\gamma_s$ ), ângulo de inclinação ( $\beta$ ) e ângulo de azimute ( $\gamma$ ).

$$\cos \gamma_s = \frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \quad (14)$$

$$\cos \theta_s = \cos \beta \cos \theta_z + \sin \beta \sin \theta_z \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (15)$$

Com todos esses valores, é possível calcular a irradiância direta em uma superfície inclinada em  $\beta$  graus ( $I_{b\beta}$ ) com a Eq. (16). Além disso, a Eq. (17) calcula o valor da irradiância difusa em uma superfície inclinada em  $\beta$  graus ( $I_{d\beta}$ ).

$$I_{b\beta} = I_{bh} \left( \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_z} \right) \quad (16)$$

$$I_{d\beta} = 0,5 I_d (1 + \cos \beta) \quad (17)$$

Por fim, a irradiância global em uma superfície inclinada em  $\beta$  graus ( $I_\beta$ ) é calculada pela Eq. (18).

$$I_\beta = I_{b\beta} + I_{d\beta} \quad (18)$$

Por fim, utilizando os valores calculados de irradiância global na superfície inclinada é possível calcular a geração esperada da usina usando as Eq. (3), Eq. (2) e o índice de desempenho da usina usando a Eq. (1).

#### IV. DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento desse trabalho foi dividido nas seguintes partes: obtenção dos dados, limpeza dos dados obtidos, conversão da irradiância, validação de dias, cálculos de índice de desempenho.

##### A. Obtenção dos Dados

Os dados necessários para este trabalho foram obtidos de três fontes diferentes: INMET, SOLPOS e portal do inversor solar da usina. Todos os dados utilizados foram obtidos em intervalos de 60 minutos para o período entre 01/07/2021 e 30/09/2024, totalizando 1188 dias.

1) *INMET*: Os dados meteorológicos das estações automáticas do INMET estão disponíveis gratuitamente no site do Instituto. Após localizar a estação desejada, é possível baixar um arquivo de valores separados por vírgulas (CSV) contendo todos os dados medidos pela estação, em intervalos de, no máximo, seis meses. Para esse trabalho, foram utilizados os dados de temperatura ambiente e irradiação global horizontal.

2) *SOLPOS*: Os dados de irradiação extraterrestre foram obtidos no *SOLPOS Calculator*. Nesse portal do Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos Estados Unidos (NREL) é necessário preencher um formulário com os dados de latitude, longitude e período desejado dos dados. Na sequência, os dados de irradiação global extraterrestre são baixados em um arquivo CSV.

3) *Inversor Solar da Usina*: Os dados de geração da usina fotovoltaica foram adquiridos na plataforma Sems Portal do fabricante do inversor Goodwe®. Nessa plataforma foi possível exportar o arquivo CSV com a quantidade de energia gerada pelo sistema a cada hora.

### B. Limpeza dos Dados Obtidos

Após esses dados serem obtidos, estabeleceu-se um processo para verificar a existência de problemas nos dados obtidos com o objetivo de identificar os dias que esses problemas acontecem e não utilizar esses dados nos cálculos.

Primeiro, verificou-se que todos os dados de geração da usina e de radiação extraterrestre do *SOLPOS* estavam dentro do intervalo entre 6:00 e 20:00 horas. Porém, os dados do INMET possuíam pelo menos um valor de irradiação para as 24 horas do dia. Ao total, existiam 335 pontos de dados de irradiação solar entre 21:00 e 5:00 horas durante o período avaliado, com uma média de 0,24 W/m<sup>2</sup>. Por se tratar de períodos noturnos, esses dados foram substituídos por zeros nos cálculos.

Após, analisou-se os dias com dados de irradiação zerados durante o período diurno (6:00 e 20:00 horas) e percebeu-se a existência de dias que a estação meteorológica não enviou nenhum dado em algumas horas do dia. Para evitar a análise de dias incompletos, esses dias não foram utilizados nos cálculos. Ao total foram 44 dias do período estudado que possuíam algum horário sem dados, o equivalente a 1,94% dos dias do período.

Por fim, observou-se os dados de geração da usina fotovoltaica e concluiu-se que em 71 dias do período analisado a usina fotovoltaica do campus esteve desligada, sem gerar energia elétrica. Isso equivale a 5,98% dos dias analisados. Esses dias também foram excluídos da análise.

A Fig. 4 apresenta um gráfico da quantidade de dias em cada mês que restaram após a retirada dos dias com dados zerados. Os três meses com mais descartes foram Novembro/23, Maio/24 e Maio/23.

- Novembro/23 - a usina fotovoltaica ficou 25 dias desligada
- Maio/24 - a usina fotovoltaica ficou 15 dias desligada
- Maio/23 - a estação do INMET ficou 12 dias desligada

### C. Conversão da Irradiância

Com base no equacionamento descrito na fundamentação teórica, criou-se uma planilha eletrônica que calcula os valores de irradiação solar em uma superfície inclinada com base nos dados de irradiação e temperatura do INMET, irradiação extraterrestre do *SOLPOS* e os dados de latitude, longitude e inclinação angular dos módulos solares. A Fig. 5 mostra uma parte dessa planilha.

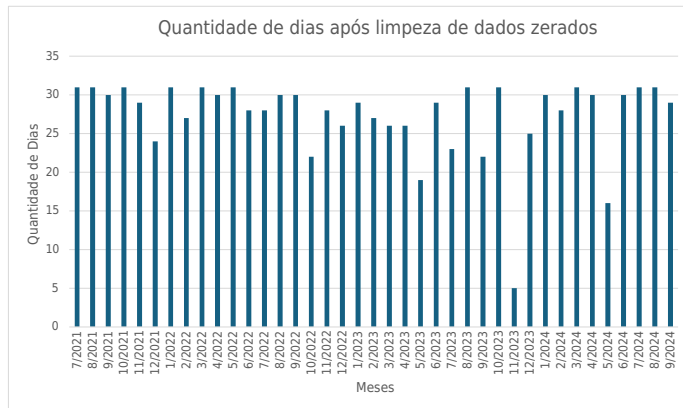


Figura 4. Quantidade de dias válidos por mês após limpeza de dados zerados

### D. Validação de Dias

Por conta da distância entre o local de medição da irradiação solar e o local da instalação da usina fotovoltaica, existe a possibilidade de ocorrer grandes divergências entre a radiação incidente na estação meteorológica e na usina solar. A principal razão para ocorrerem essas divergências significativas é a nebulosidade, que obstrui a passagem da radiação solar em momentos e intensidades diferentes nos dois locais.

Com o objetivo de evitar que os dados finais sejam afetados por essas diferenças de irradiação, usou-se o índice de claridade ( $K_t$ ) para analisar os dados de cada dia e ignorar os dias mais problemáticos. Chegou-se a conclusão de que utilizando apenas os dias que apresentam índice de claridade entre 0,3 e 0,7 consegue-se ignorar a maior parte dos dias com nebulosidade suficiente para causar grandes desvios nas medidas de irradiação.

Após aplicar esse filtro, restaram 601 dias válidos para os cálculos de índice de desempenho. Em média 15 dias válidos em cada mês. A Fig. 6 mostra um gráfico da quantidade de dias válidos encontrados em cada mês do período analisado.

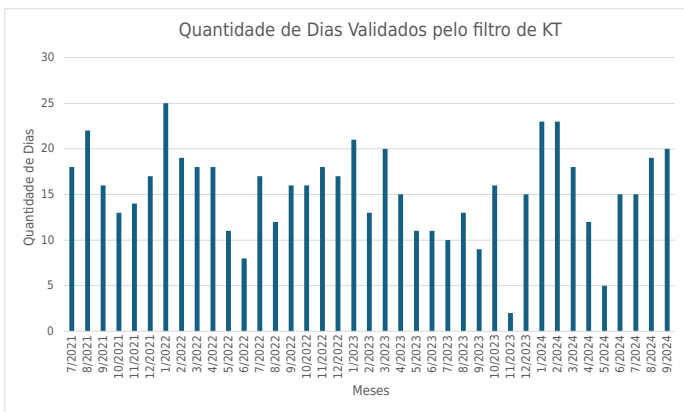
### E. Cálculo do Índice de Desempenho

Utilizando todos os dados obtidos e calculados até agora, preenchidos em uma planilha eletrônica, foi possível calcular o índice de desempenho da usina fotovoltaica para diferentes períodos. Primeiro, como forma de validar se os resultados obtidos seguem a lógica esperada, calculou-se o índice de desempenho mensal de todo o período analisado. A Fig. 7 apresenta um gráfico com os dados de PR mensais calculados.

Na sequência, calculou-se os valores de índice de desempenho para cada dia considerado válido após passar pelas etapas anteriores. Para analisar o desempenho de cada dia, foi definido um valor base para comparação. Utilizou-se os dados de PR mensais dos primeiros 12 meses. Para cada dia, o índice de desempenho calculado para o dia foi comparado com o índice de desempenho do mesmo mês, no período dos primeiros 12 meses de operação da usina. Nessa comparação, ainda foi considerada a perda esperada de 0,5% ao ano da capacidade de produção dos módulos solares.

72	Data	data completa	Temperatura	Radiação (kJ/m²)	Radiação (w/m²)	ETf global	Kt	Índice de claridade	Id1	Id	Ibh	Diã do Ano	Declinação Solar	Ângulo do dia	Eq do tempo	Hora atual (min)	Lat Solar	Long Solar	Cos Ang Zenith	Sen Ang Zenith
73	01/07/2021	01/07/2021 00:00	4,8	0	0	0	0	0	0	0	0	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	0	1230,40135	127,6003374	-0,68125467	0,731916
74	01/07/2021	01/07/2021 01:00	5	0	0	0	0	0	0	0	1	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	60	1230,40135	142,6003374	-0,82630374	0,55674
75	01/07/2021	01/07/2021 02:00	4,9	0	0	0	0	0	0	0	2	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	120	1330,40135	157,6003374	-0,93384639	0,35767
76	01/07/2021	01/07/2021 03:00	4,6	0	0	0	0	0	0	0	3	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	180	1410,40135	172,6003374	-0,98772978	0,15602
77	01/07/2021	01/07/2021 04:00	5,1	0	0	0	0	0	0	0	4	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	240	30,40134955	172,3996626	-0,98738639	-0,15833
78	01/07/2021	01/07/2021 05:00	4	0	0	0	0	0	0	0	5	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	300	90,40134955	157,3996626	-0,93277042	-0,30447
79	01/07/2021	01/07/2021 06:00	4,4	0	0	0	0	0	0	0	6	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	360	150,4013496	142,3996626	-0,82720736	-0,51217
80	01/07/2021	01/07/2021 07:00	5,2	0	0	0	0	0	0	0	7	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	420	210,4013496	127,3996626	-0,679125565	-0,73403
81	01/07/2021	01/07/2021 08:00	4,2	0	0	0	0	0	0	0	8	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	480	270,4013496	112,3996626	-0,497382317	-0,86750
82	01/07/2021	01/07/2021 09:00	4	0	0	0	0	0	0	0	9	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	540	330,4013496	97,39966261	-0,294783351	-0,95356
83	01/07/2021	01/07/2021 10:00	4,4	0	0	0	0	0	0	0	10	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	600	390,4013496	82,39966261	-0,05135842	-0,98306
84	01/07/2021	01/07/2021 11:00	4,9	56,5	15,707	155,3603	0,101100474	0,900090957	15,56408134	0,142918663	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	660	450,4013496	67,39966261	0,11727708	-0,98306	
85	01/07/2021	01/07/2021 12:00	6,9	615,2	171,0256	392,9174	0,435271128	0,783359486	133,9745261	37,05167934	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	720	510,4013496	52,39966261	0,29849577	-0,9545	
86	01/07/2021	01/07/2021 13:00	8,6	1201,7	334,0726	587,7462	0,568360199	0,509898333	170,3330386	165,7359514	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	780	570,4013496	42,39966261	0,476533146	-0,894	
87	01/07/2021	01/07/2021 14:00	10,6	1610,6	447,7468	725,6837	0,618999941	0,402352029	180,1353108	207,5904852	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	840	630,4013496	32,39966261	0,551138949	-0,84341	
88	01/07/2021	01/07/2021 15:00	12	1847,6	541,4328	797,1888	0,679170778	0,27855196	150,8320886	390,6205104	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	900	690,4013496	27,39966261	0,605405088	-0,76614	
89	01/07/2021	01/07/2021 16:00	14,2	2270,3	631,1434	797,3643	0,791537068	0,164883216	103,8756107	527,2877893	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	960	750,4013496	2,600337388	0,604677949	0,72641	
90	01/07/2021	01/07/2021 17:00	14,6	2074,1	576,5988	726,1992	0,794006584	0,104613133	64,91900341	481,6837986	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	1020	810,4013496	22,600337388	0,550925252	0,85152	
91	01/07/2021	01/07/2021 18:00	15,6	1828,4	508,2962	588,5535	0,863634657	0,165	83,688708	424,426462	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	1080	870,4013496	37,600337388	0,444200648	0,95956	
92	01/07/2021	01/07/2021 19:00	15,5	1344,5	373,771	393,9615	0,94870068	0,165	61,672215	312,098785	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	1140	930,4013496	52,600337388	0,296418065	0,95550	
93	01/07/2021	01/07/2021 20:00	14,8	899,5	183,341	156,5454	1,171882396	0,165	30,251266	153,089375	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	1200	990,4013496	67,600337388	0,114674427	0,93404	
94	01/07/2021	01/07/2021 21:00	13,3	46,2	23,8566	0	0	0	0	0	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	1260	1050,40135	82,600337388	0,087204538	0,89812	
95	01/07/2021	01/07/2021 22:00	12,5	0	0	0	0	0	0	0	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	1320	1110,40135	97,600337388	-0,297572048	0,86468	
96	01/07/2021	01/07/2021 23:00	11,9	0	0	0	0	0	0	0	1	182	23,12048412	3,115771344	-3,461842448	1380	1170,40135	112,6003374	-0,49988068	0,80693
97	02/07/2021	02/07/2021 00:00	11,7	0	0	0	0	0	0	0	0	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	0	1230,201354	127,5503386	-0,6505657	0,52274
98	02/07/2021	02/07/2021 01:00	11,2	0	0	0	0	0	0	0	1	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	60	1290,201354	142,5503386	-0,82869684	0,55969
99	02/07/2021	02/07/2021 02:00	10,9	0	0	0	0	0	0	0	2	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	120	1350,201354	157,5503386	-0,93416439	0,53679
100	02/07/2021	02/07/2021 03:00	10,6	0	0	0	0	0	0	0	3	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	180	1410,201354	172,5503386	-0,987527869	0,17474
101	02/07/2021	02/07/2021 04:00	10,4	0	0	0	0	0	0	0	4	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	240	30,20135443	172,4496614	-0,9874358	-0,15688
102	02/07/2021	02/07/2021 05:00	10	0	0	0	0	0	0	0	5	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	300	90,20135443	157,4496614	-0,932876132	-0,30013
103	02/07/2021	02/07/2021 06:00	9,9	0	0	0	0	0	0	0	6	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	360	150,2013544	142,4496614	-0,82783791	-0,50906
104	02/07/2021	02/07/2021 07:00	9,6	0	0	0	0	0	0	0	7	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	420	210,2013544	127,4496614	-0,67835574	-0,53378
105	02/07/2021	02/07/2021 08:00	8,8	0	0	0	0	0	0	0	8	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	480	270,2013544	112,4496614	-0,49783476	-0,86738
106	02/07/2021	02/07/2021 09:00	8,8	0	0	0	0	0	0	0	9	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	540	330,2013544	97,4496614	-0,29487624	-0,95555
107	02/07/2021	02/07/2021 10:00	8,8	0	0	0	0	0	0	0	10	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	600	390,2013544	82,4496614	-0,05220498	-0,99306
108	02/07/2021	02/07/2021 11:00	9	61,7	17,1536	155,538	0,110280251	0,900074237	16,98234737	0,170252635	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	660	450,2013544	67,4496614	0,11742749	-0,98306	
109	02/07/2021	02/07/2021 12:00	9,9	540,4	150,2312	393,3285	0,381848422	0,865439855	130,0160679	201,2151212	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	720	510,2013544	52,4496614	0,29890009	-0,95428	
110	02/07/2021	02/07/2021 13:00	11,4	1318,4	366,5152	588,4252	0,622874751	0,589753032	142,8504107	223,6647893	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	780	570,2013544	37,4496614	0,47078003	-0,88448	
111	02/07/2021	02/07/2021 14:00	12,2	1802,3	501,0384	726,0367	0,68852197	0,260811535	130,8767947	370,3635353	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	840	630,2013544	22,4496614	0,551817396	-0,83386	
112	02/07/2021	02/07/2021 15:00	13,3	2080,3	576,3234	796,4048	0,743486011	0,20889168	121,3838113	456,8368887	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	900	690,2013544	7,4496614	0,60520778	-0,79553	
113	02/07/2021	02/07/2021 16:00	15,9	2011,2	611,8336	798,8107	0,76605838	0,171924702	105,2056016	506,7270964	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	960	750,2013544	7,550338608	0,60574449	0,76565	
114	02/07/2021	02/07/2021 17:00	16,9	2121,9	689,8882	727,8223	0,810483823	0,165	97,313553	492,596647	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	1020	810,2013544	22,55033861	0,551277042	0,88343	
115	02/07/2021	02/07/2021 18:00	16,9	1857	516,246	596,3123	0,8743046	0,165	65,18059	431,05514	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	1080	870,2013544	37,55033861	0,446235011	0,8949	
116	02/07/2021	02/07/2021 19:00	15,8	1384,2	351,4352	399,4357	0,95230382	0,165	32,69854	204,66833	183	23,04862764	3,13298555	-3,661837569	1140	930,2013544	52,55033861	0,29230616	0,9549	

Figura 5. Imagem parcial da planilha de cálculo da irradiância em superfície inclorada



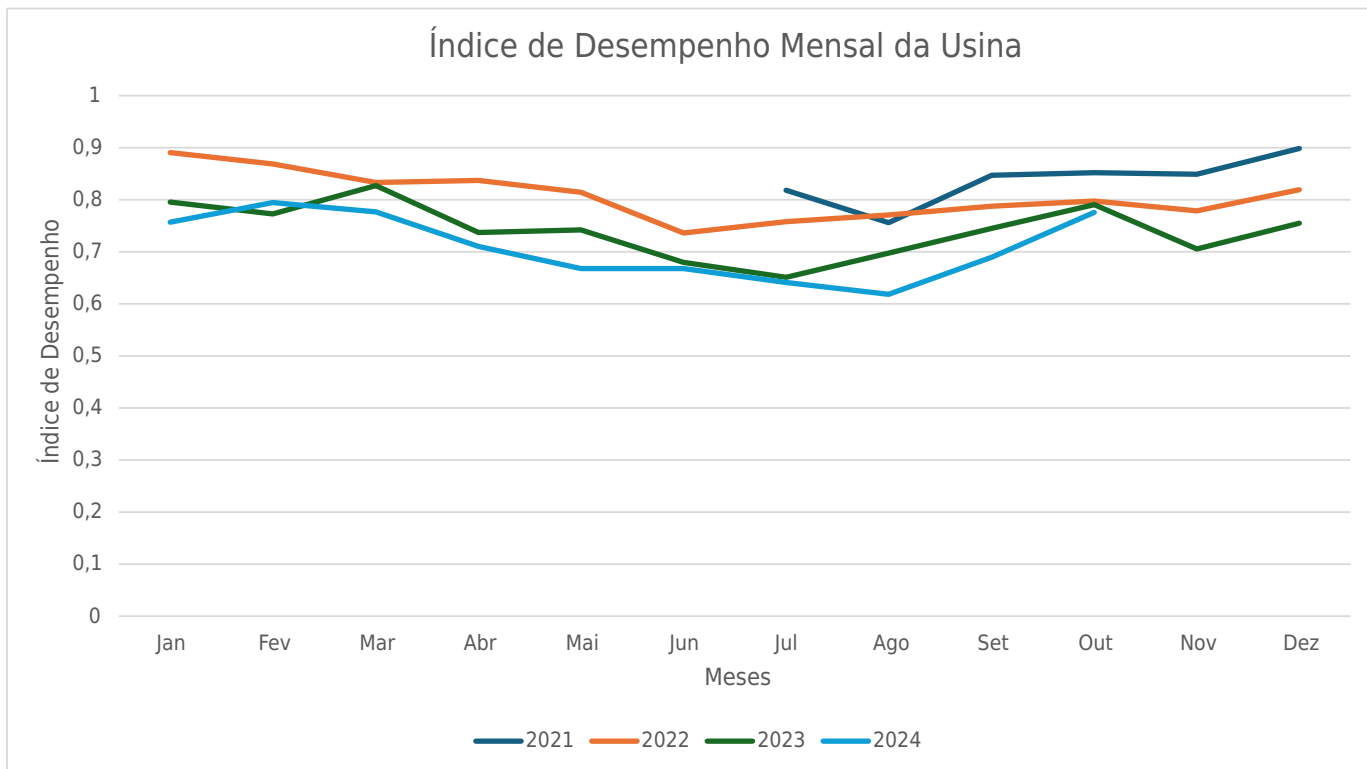


Figura 7. Valores do índice de desempenho mensal da usina para o período analisado

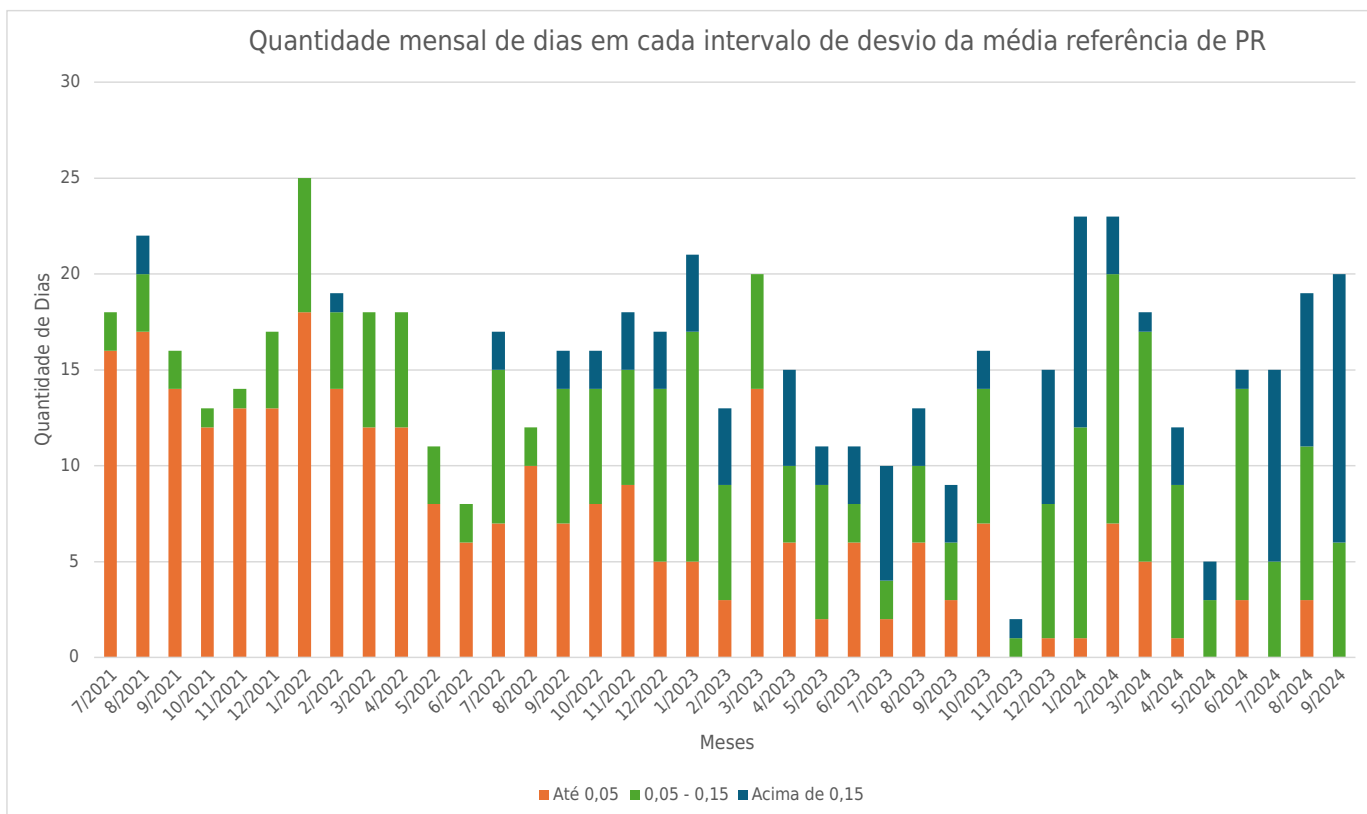


Figura 8. Quantidade de dias em cada intervalo de diferença entre o PR diário e o PR de referência

Tabela II  
ÍNDICE DE DESEMPENHO DA USINA FOTOVOLTAICA EM CADA MÊS ANALISADO

Mês	PR Mensal
7/2021	0,82
8/2021	0,76
9/2021	0,85
10/2021	0,85
11/2021	0,85
12/2021	0,90
1/2022	0,89
2/2022	0,87
3/2022	0,83
4/2022	0,84
5/2022	0,81
6/2022	0,74
7/2022	0,76
8/2022	0,77
9/2022	0,79
10/2022	0,80
11/2022	0,78
12/2022	0,82
1/2023	0,80
2/2023	0,77
3/2023	0,83
4/2023	0,74
5/2023	0,74
6/2023	0,68
7/2023	0,65
8/2023	0,70
9/2023	0,75
10/2023	0,79
11/2023	0,71
12/2023	0,75
1/2024	0,76
2/2024	0,80
3/2024	0,78
4/2024	0,71
5/2024	0,67
6/2024	0,67
7/2024	0,64
8/2024	0,62
9/2024	0,69

Tabela III  
QUANTIDADE DE DIAS EM CADA GRUPO DE DIFERENÇA ENTRE O PR DO DIA E O PR REFERÊNCIA

Mês	Até 0,05	0,05 - 0,15	Acima de 0,15
7/2021	16 89%	2 11%	0 0%
8/2021	17 77%	3 14%	2 9%
9/2021	14 88%	2 13%	0 0%
10/2021	12 92%	1 8%	0 0%
11/2021	13 93%	1 7%	0 0%
12/2021	13 76%	4 24%	0 0%
1/2022	18 72%	7 28%	0 0%
2/2022	14 74%	4 21%	1 5%
3/2022	12 67%	6 33%	0 0%
4/2022	12 67%	6 33%	0 0%
5/2022	8 73%	3 27%	0 0%
6/2022	6 75%	2 25%	0 0%
7/2022	7 41%	8 47%	2 12%
8/2022	10 83%	2 17%	0 0%
9/2022	7 44%	7 44%	2 13%
10/2022	8 50%	6 38%	2 13%
11/2022	9 50%	6 33%	3 17%
12/2022	5 29%	9 53%	3 18%
1/2023	5 24%	12 57%	4 19%
2/2023	3 23%	6 46%	4 31%
3/2023	14 70%	6 30%	0 0%
4/2023	6 40%	4 27%	5 33%
5/2023	2 18%	7 64%	2 18%
6/2023	6 55%	2 18%	3 27%
7/2023	2 20%	2 20%	6 60%
8/2023	6 46%	4 31%	3 23%
9/2023	3 33%	3 33%	3 33%
10/2023	7 44%	7 44%	2 13%
11/2023	0 0%	1 50%	1 50%
12/2023	1 7%	7 47%	7 47%
1/2024	1 4%	11 48%	11 48%
2/2024	7 30%	13 57%	3 13%
3/2024	5 28%	12 67%	1 6%
4/2024	1 8%	8 67%	3 25%
5/2024	0 0%	3 60%	2 40%
6/2024	3 20%	11 73%	1 7%
7/2024	0 0%	5 33%	10 67%
8/2024	3 16%	8 42%	8 42%
9/2024	0 0%	6 30%	14 70%

PR diário diminuem em comparação ao PR médio do mês equivalente do primeiro ano de operação da usina. Além disso, essa diferença entre os valores de PR diário e médio esperado aumenta conforme o passar dos meses e aumento das sujidades.

Porém, como todos os dados utilizados são de uma usina que nunca passou por processo de limpeza dos módulos, não há dados para comparação de resultados após os módulos serem limpos. Com isso não é possível validar a eficácia do método.

Portanto, mesmo o trabalho sendo conclusivo na tarefa de calcular o índice de desempenho da usina, acredita-se que existe material para realização de trabalhos futuros, com base nos resultados obtidos. Entre as possibilidades de trabalhos futuros estão o ajuste e validação da metodologia de detecção de níveis de sujidades nos módulos solares e o desenvolvimento de um sistema de monitoramento e alerta de manutenção e limpeza de usinas fotovoltaicas.

## REFERÊNCIAS

- [1] Ministério de Minas e Energia. (2023) Resenha energética brasileira. Edição 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/resenha-energetica-brasilera/resenhas/resenha-energetica-brasilera-2023> Acessado em 09/06/2024.
- [2] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul. (2023) Lançado o programa de eficiência energética do IFRS. [Online]. Disponível em: <https://ifrs.edu.br/lançado-o-programa-de-eficiencia-energetica-do-ifrs/> Acessado em 02/06/2024.
- [3] A. A. Lima, N. P. Menezes, S. Santos, B. Amorim, F. Thomazi, F. Zanella, A. Heilmann, E. Burkarter, e C. A. Dartora, "Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia," *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 42, p. e20190191, 2020.
- [4] D. dos Santos Ferreira Soares, "Impactos da dinâmica atmosférica na flutuação de potência em usinas fotovoltaicas," 2014.
- [5] S. R. Madeti e S. Singh, "Monitoring system for photovoltaic plants: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 67, p. 1180–1207, 2017.
- [6] A. Amelia, Y. Irwan, W. Leow, M. Irwanto, I. Safwati, e M. Zhafarina, "Investigation of the effect temperature on photovoltaic (pv) panel output performance," *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, v. 6, n. 5, p. 682–688, 2016.
- [7] Instituto Nacional De Meteorologia. (2024) Catálogo de estações

- automáticas. [Online]. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/paginas/catalogoaut/> Acessado em 14/10/2024.
- [8] M. Iqbal, *An Introduction To Solar Radiation*. Elsevier Science, 2012.
- [9] J. A. Duffie e W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. Wiley New York, 1980.
- [10] L. R. Tavares, T. S. Costa, K. B. de Melo, e M. G. Villalva, “Análise estatística de bancos de dados de radiação solar e temperatura para aplicação em sistema fotovoltaico,” in *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*, 2020.
- [11] H. M. F. da Silva e F. J. C. Araújo, “Energia solar fotovoltaica no Brasil: Uma revisão bibliográfica,” *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 8, n. 3, p. 859–869, Mar. 2022.
- [12] A. de Farias Leal, “Estudo de viabilidade técnica e econômica para implantação de sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid em uma indústria.” 2022.
- [13] M. de Oliveira Lage Alves, “Energia solar: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid.” 2019.
- [14] T. B. Ribeiro. (2022) Sistema on grid: O processo de produção de energia solar fotovoltaica. [Online]. Disponível em: <https://baoribeiro.com.br/blog/sistema-de-energia-on-grid-como-funciona/> Acessado em 08/06/2024.
- [15] Brasil, “Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022,” Diário Oficial da União, 2022.
- [16] Agência Nacional de Energia Elétrica. (2024) Unidades com geração distribuída. [Online]. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao> Acessado em 16/06/2024.
- [17] A. N. M. Silva. (2008) Sistema de conversão de energia solar fotovoltaica. [Online]. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59213/2/Texto%20integral.pdf> Acessado em 08/06/2024.
- [18] A. M. Khalid, I. Mitra, W. Warmuth, e V. Schacht, “Performance ratio—crucial parameter for grid connected pv plants,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 65, p. 1139–1158, 2016.
- [19] D. Erbs, S. Klein, e J. Duffie, “Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation,” *Solar energy*, v. 28, n. 4, p. 293–302, 1982.
- [20] National Renewable Energy Laboratory. (2024) Solpos calculator. [Online]. Disponível em: <https://midcdmz.nrel.gov/solpos/solpos.html> Acessado em 14/10/2024.