

Avaliação do Desempenho das Usinas Fotovoltaicas do GESEP

1st Luiz Felipe Fonseca
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Viçosa
Viçosa, Brasil
luiz.f.fonseca@ufv.br

2nd Victor Pellanda Dardengo
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Viçosa
Viçosa, Brasil
victor.dardengo@ufv.br

Resumo—Este trabalho apresenta uma análise comparativa do desempenho das usinas fotovoltaicas do GESEP (Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência) da Universidade Federal de Viçosa. O objetivo foi avaliar o comportamento operacional das usinas com base em indicadores técnicos de eficiência, como o rendimento específico (RE) e o fator de capacidade (FC), além de desenvolver uma ferramenta interativa para visualização dos resultados. Os dados de geração foram obtidos por meio da API GoodWe, tratados e organizados para a realização das análises de desempenho. Os resultados demonstraram diferenças operacionais entre as usinas, variações sazonais e distintos níveis de aproveitamento energético, evidenciando a importância do monitoramento contínuo e da análise de indicadores para o aprimoramento da eficiência e da gestão das usinas fotovoltaicas do GESEP.

Palavras-chave—Usinas fotovoltaica, energia renovável, energia solar, interface gráfica, GESEP, monitoramento, python

I. INTRODUÇÃO

Diante dos significativos desafios ambientais decorrentes do aquecimento global, impulsionado pelas emissões de gases poluentes de fontes não renováveis, e com a crescente demanda energética mundial, é fundamental a adoção de soluções sustentáveis. Nesse contexto, as energias renováveis, em especial a solar, destacam-se como alternativas viáveis para reduzir emissões e garantir segurança energética [1].

No geral, o setor global de energia renovável experimentou um crescimento notável em 2023, marcado por um aumento de 54% nas adições de capacidade de energia renovável, atingindo 536 GW. A energia solar fotovoltaica sozinha foi responsável por mais de três quartos das adições, conforme mostrado na Fig. 1 [2].

O Brasil, dotado de elevado potencial solar, tem acompanhado a tendência global de expansão da energia fotovoltaica, embora enfrente desafios técnicos e operacionais que exigem atenção. Nas últimas décadas, o crescimento dessa fonte renovável no país tem sido significativo, impulsionado sobretudo pela regulamentação setorial. Em 17 de abril de 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu a Resolução Normativa nº 482/2012, que permitiu aos consumidores gerar sua própria energia a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada, impulsionada pela necessidade de diversificar a matriz elétrica e mitigar as mudanças climáticas [3]. Conforme ilustrado na Fig. 2, que mostra a evolução

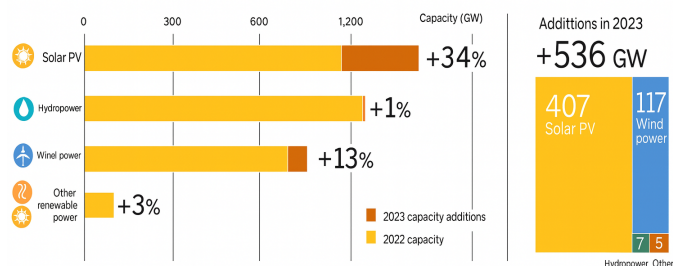


Figura 1. Capacidade total instalada e adições de energia renovável, por tecnologia, 2023 (Global) [2].

da geração solar fotovoltaica no Brasil entre 2015 e 2023, observa-se um salto exponencial de 20 GWh para 30 TWh, reflexo dos expressivos investimentos direcionados ao setor [4]. Ressalta-se que a categoria “Outras”, apresentada na Fig. 2, corresponde à geração proveniente de fontes residuais não classificadas como solares, principalmente pequenas térmicas a óleo/diesel e unidades de geração em sistemas isolados. A EPE (Empresa de Pesquisa Energética) agrupa essas fontes nessa categoria por representarem participação pouco significativa frente ao crescimento da geração fotovoltaica.

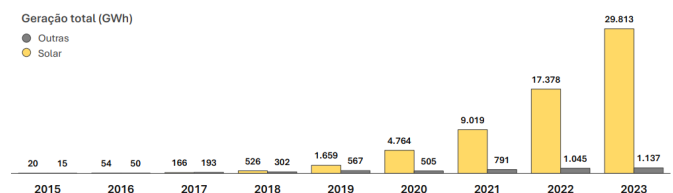


Figura 2. Evolução da geração solar fotovoltaica no Brasil (2015–2023) [4].

Esse crescimento ocorre em um cenário em que o Brasil já se destaca mundialmente pelo alto grau de renovabilidade de sua oferta interna de energia. Na Fig. 3, observa-se que, em 2023, quase 50% da energia disponibilizada internamente provém de fontes renováveis, contra aproximadamente 15% na média global e 12,6% na OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) [4].

Na composição da geração elétrica brasileira, a contribuição da energia solar ainda é inferior à de outras fontes, mas cresce

Participação das renováveis na OIE

Fonte: Agência Internacional de Energia (AIE) e EPE para o Brasil. Elaboração: EPE

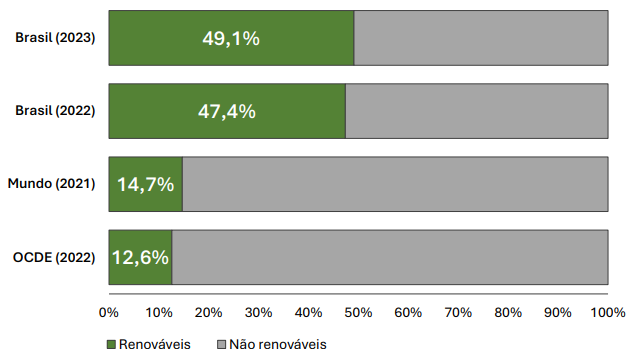


Figura 3. Participação Percentual das Fontes Renováveis na Oferta Interna de Energia (OIE) Global, da OCDE e do Brasil (2021-2023) [4].

em ritmo acelerado. A Fig. 4 compara a evolução da geração de eletricidade por fonte (eólica, biomassa, nuclear e solar) entre 2007 e 2023, evidenciando o forte crescimento da energia solar e sua aproximação aos níveis de produção das demais fontes renováveis.

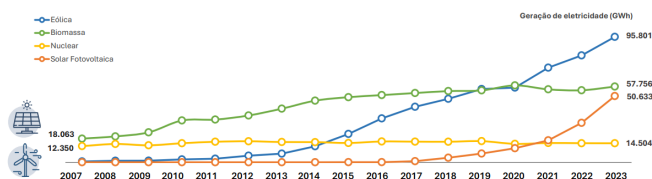


Figura 4. Geração de eletricidade por fonte no Brasil (2007-2023) [4].

Além disso, a participação na capacidade instalada também reflete o investimento crescente no setor. Na Fig. 5, a fonte solar já corresponde a 5,8% da potência total, enquanto a hidrelétrica continua dominante, seguida pela eólica e biomassa [4].

Gráfico 1.1.4 - Participação das fontes na capacidade instalada
Chart 1.1.4 - Participation of energy sources in the installed capacity

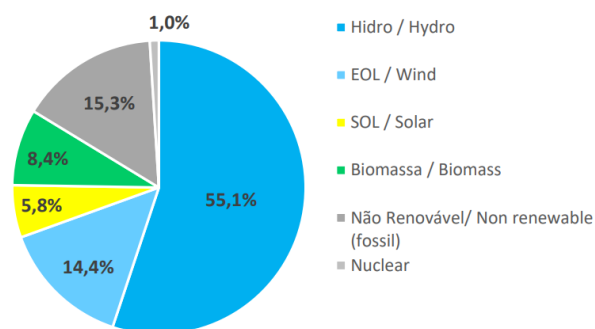


Figura 5. Participação das fontes na capacidade instalada em 2023 [4].

O desempenho real das usinas fotovoltaicas pode variar

significativamente em função de fatores técnicos, ambientais e operacionais. Aspectos como irradiância, temperatura, sombreamento, acúmulo de sujeira nos módulos, falhas em inversores e manutenção inadequada impactam diretamente a eficiência dos sistemas [5]. Dessa forma, a avaliação contínua do desempenho é essencial para diagnosticar perdas, identificar anomalias e orientar ações de otimização.

No contexto de expansão da geração distribuída, o GESEP (Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) implantou e mantém um conjunto de usinas fotovoltaicas para o monitoramento. Ressalta-se que as usinas analisadas utilizam inversores PHB, que possuem interface própria de monitoramento via portal SEMS. Entretanto, essa ferramenta restringe-se à análise individual de cada usina.

Como diferencial metodológico, este trabalho desenvolve uma abordagem integrada que viabiliza a comparação simultânea entre todas as usinas do GESEP, por meio de indicadores padronizados que permitem avaliação equitativa de sistemas com diferentes características. A partir de dados reais de operação, buscou-se compreender a influência de fatores técnicos e ambientais no desempenho das usinas, complementando a análise com uma interface gráfica interativa que facilita a visualização dinâmica e a comparação intuitiva dos resultados.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar e comparar o desempenho das usinas fotovoltaicas do GESEP, por meio da análise de indicadores técnicos como o rendimento específico (RE), fator de capacidade (FC) e métricas complementares de produtividade. A partir do tratamento e interpretação dos dados históricos de geração, busca-se compreender o comportamento energético das usinas e identificar oportunidades de melhoria e otimização no desempenho global do sistema fotovoltaico.

II. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho consiste na análise comparativa do desempenho das usinas fotovoltaicas do GESEP, com base em dados reais de geração. Para isso, foram utilizadas ferramentas computacionais que permitiram o tratamento dos dados, o cálculo de indicadores de desempenho e a criação de uma interface interativa para visualização e interpretação dos resultados.

A seguir são descritas as principais etapas do processo metodológico.

A. Coleta e Organização dos Dados

A primeira etapa da metodologia consistiu na coleta de dados de geração de energia das usinas fotovoltaicas mantidas pelo GESEP.

Para garantir uma coleta confiável e automatizada, foi desenvolvido um script em Python capaz de se conectar à API (Application Programming Interface) da GoodWe. Embora o conjunto de usinas analisadas utilize exclusivamente inversores da fabricante PHB, a metodologia proposta não se restringe a esse modelo. O procedimento pode ser aplicado a quaisquer

inversores que disponibilizem dados via API com estrutura compatível. Assim, a abordagem é generalizável para outros sistemas fotovoltaicos, desde que seus dados sejam acessíveis e padronizados de forma equivalente.

Essa API permite o acesso remoto aos registros de geração de energia elétrica em intervalos regulares. O código executa autenticação nas contas de cada usina, envia requisições à API e armazena as respostas no formato CSV (Comma-Separated Values), o que facilita a manipulação posterior dos dados.

O intervalo de amostragem definido foi de cinco minutos, o que garante uma resolução temporal adequada para análises detalhadas de desempenho e identificação de variações rápidas na produção de energia. Conforme ilustrado na Tabela I, cada arquivo contém as colunas de data, hora e potência (W), referentes aos valores instantâneos de geração. Os arquivos são organizados individualmente por usina, utilizando nomes padronizados.

Tabela I
REPRESENTAÇÃO DE ARQUIVO.CSV EXTRAÍDO ATRAVÉS DA API

Data	Hora	Pot (W)
2022-01-01	12:00	110400
2022-01-01	12:05	111310
2022-01-01	12:10	32680

Em cenários de ausência de registros, sejam eles decorrentes de falhas de comunicação ou períodos sem produção, o script realiza a imputação automática de valor zero à potência. Essa estratégia mantém a uniformidade das séries temporais, evitando lacunas que possam comprometer os cálculos de energia e os indicadores de desempenho.

Os dados coletados representam medições reais e contínuas de geração das usinas fotovoltaicas do GESEP, cobrindo um período suficiente para a análise de variações sazonais, tendências anuais e comportamentos operacionais específicos.

Essa base de dados constitui o núcleo analítico do trabalho, fornecendo a matéria-prima para todas as etapas posteriores de processamento e avaliação.

B. Tratamento e Processamento dos Dados

Após a extração inicial dos dados, foi necessário ajustá-los para possibilitar sua integração ao código principal da interface gráfica, ampliando a base com novas variáveis, entre elas a energia gerada em kWh. Para isso, a coluna de potência, originalmente expressa em watts (W), foi convertida para quilowatts (kW) por meio da divisão dos valores por 1.000. Em seguida, aplicou-se a relação fundamental:

$$Energia = Potência \times \Delta t, \quad (1)$$

onde Δt é 5 minutos, ou seja, $\frac{5}{60}$ hora. Assim, cada registro de potência passou a ter sua correspondente energia calculada como

$$Energia (kWh) = Potência (kW) \times \frac{5}{60}. \quad (2)$$

O resultado desse processamento foi salvo em um novo arquivo CSV.

Além disso, adicionou-se a coluna “Usina”, atribuindo-se a cada planta uma identificação, o que permite distinguir e agrupar de forma clara os registros de produção de cada unidade, conforme ilustrado na Tabela II.

Tabela II
REPRESENTAÇÃO DE ARQUIVO.CSV COM ADIÇÃO DE COLUNA “USINA”

Data	Hora	Pot (kW)	Energia (kWh)	Usina
2022-01-01	12:00	110,40	9,20	Usina Sueli
2022-01-01	12:05	111,31	9,28	Usina Sueli
2022-01-01	12:10	32,68	2,72	Usina Sueli

Esse banco de dados unificado, passou a ser a principal base de entrada para a interface gráfica.

C. Cálculo dos Indicadores de Desempenho

Para uma avaliação abrangente do desempenho das usinas fotovoltaicas do GESEP, foram adotados dois indicadores técnicos principais: o rendimento específico (RE) e o fator de capacidade (FC). Estes indicadores permitem uma análise padronizada, independente da escala ou localização das usinas.

1) *Rendimento Específico (RE)*: O indicador RE, mensura a eficiência de uma usina fotovoltaica ao comparar a energia gerada em um dado período (kWh) com sua capacidade instalada (kWp). Seu cálculo é dado por

$$RE = \frac{E_{gerada} (kWh)}{P_{instalada} (kWp)}, \quad (3)$$

Onde:

- E_{gerada} corresponde à soma das energias intervalares;
- $P_{instalada}$ é a potência nominal total dos módulos;

Este indicador normaliza a produção pela capacidade nominal expresso em kWh/kWp, permitindo comparações justas entre usinas de diferentes portes e tecnologias [6].

2) *Fator de Capacidade (FC)*: O FC, quantifica o grau de utilização da potência nominal da usina em relação ao tempo total do período analisado. Ele indica quanto da energia máxima possível foi efetivamente produzida, considerando as limitações naturais e técnicas do sistema.

Seu cálculo é expresso pela Equação (4):

$$FC = \frac{E_{gerada} (kWh)}{P_{instalada} (kWp) * T}, \quad (4)$$

Onde:

- E_{gerada} é a energia total produzida no período (kWh);
- $P_{instalada}$ é a potência nominal da usina;
- T é o número total de horas do período considerado.

O Fator de Capacidade é adimensional, geralmente expresso em percentual, e reflete a eficiência global de operação. Valores mais altos de FC indicam maior aproveitamento da radiação solar e menor ocorrência de perdas [7].

3) *Aplicação dos Indicadores na Análise Comparativa*: A utilização conjunta destes dois indicadores permite:

- Avaliação de eficiência operacional via rendimento específico
- Análise de utilização do potencial energético via fator de capacidade
- Identificação de usinas subdesempenhantes através da comparação com valores de referência do setor
- Detecção de oportunidades de melhoria baseada no desempenho relativo entre as usinas

A Tabela III apresenta as potências nominais de cada uma das usinas fotovoltaicas utilizadas neste estudo, expressas em quilowatt-pico (kWp). Esses valores foram utilizados como base para o cálculo do indicador de desempenho RE e do FC, permitindo a comparação padronizada entre as diferentes plantas, independentemente de sua escala ou configuração.

Tabela III
POTÊNCIA INSTALADA NOMINAL DAS USINAS

Usina	Potência Instalada (kWp)
Usina Ailton	6,300
Usina Alemar	11,445
Usina Dailton	3,400
Usina Eduardo	6,900
Usina José	7,200
Usina Luciano	6,960
Usina Marconi	5,360
Usina Renato	6,780
Usina Sueli	4,800

Tabela IV
CLASSIFICAÇÃO DE DESEMPENHO COM BASE EM INDICADORES TÉCNICOS

Classificação	Rendimento Específico (kWh/kWp/ano)	Fator de Capacidade (%)
Ótimo	> 1300	> 15%
Moderado	1100 – 1300	12% – 15%
Baixo	< 1100	< 12%

Os valores de referência apresentados na Tabela IV foram definidos a partir do Atlas Solarimétrico de Minas Gerais, que indica para Viçosa uma média anual de 1271 kWh/kWp e, para a região da Zona da Mata, 1258 kWh/kWp. Para o rendimento específico anual, adotou-se como faixa de desempenho satisfatório o intervalo de 1100 a 1300 kWh/kWp/ano, conforme recomendado em [8]. Valores acima de 1300 kWh/kWp/ano caracterizam desempenho excelente, enquanto índices inferiores a 1100 kWh/kWp/ano apontam possíveis perdas ou necessidade de otimização operacional.

Embora a Nota Técnica nº 67/2022-SRM/ANEEL [9] apresente para o estado de Minas Gerais um fator de capacidade médio de 16,8%, esse valor corresponde a uma média estadual que inclui regiões com irradiância significativamente superior à da Zona da Mata, onde estão localizadas as usinas analisadas. Por esse motivo, adotou-se o limite de 15% para a classificação “Ótimo”, uma vez que valores acima desse patamar já representam desempenho superior ao esperado para as condições climáticas de Viçosa e região.

Além disso, o critério adotado mantém coerência com o rendimento específico considerado de alto desempenho (RE > 1300 kWh/kWp/ano). Ao converter esse valor anual de RE para o fator de capacidade equivalente, obtém-se aproximadamente 14,84%, conforme a relação:

$$FC = \frac{RE}{365 \text{ dias} \times 24 \text{ horas}} \quad (5)$$

Dessa forma, fatores de capacidade superiores a 15% correspondem a sistemas que, teoricamente, alcançam ou superam um RE acima de 1300 kWh/kWp/ano, reforçando a consistência entre os indicadores utilizados na classificação.

A combinação das Tabelas III e IV com os indicadores calculados fornece uma base sólida para comparar usinas de diferentes portes de forma equitativa, identificar se o desempenho está relacionado à escala ou a fatores operacionais, estabelecer metas de melhoria com base em referências do setor e direcionar investigações mais aprofundadas sobre as causas das variações de desempenho [10].

D. Criação da Interface Gráfica Interativa

Com o intuito de tornar a análise dos resultados mais acessível e dinâmica, foi desenvolvida uma interface gráfica interativa em Python, utilizando as bibliotecas Dash e Plotly. Essa interface foi projetada para permitir a visualização intuitiva dos indicadores de desempenho das usinas fotovoltaicas do GESEP, possibilitando a exploração dos dados em diferentes escalas de tempo e a comparação direta entre as plantas analisadas.

O principal objetivo dessa etapa não foi apenas o desenvolvimento de um sistema computacional, mas sim a criação de uma ferramenta visual que facilitasse a interpretação e a comunicação dos resultados obtidos nas análises anteriores.

1) *Filtros de Seleção e Interatividade*: Os filtros permitem ao usuário selecionar o período (ano e mês) e as usinas de interesse, atualizando automaticamente todos os gráficos e tabelas exibidos na tela, conforme ilustrado na Fig. 6. Essa interatividade é garantida pelos callbacks do Dash, que reagem em tempo real às mudanças feitas pelo usuário, gerando uma experiência semelhante à de um painel profissional de monitoramento [11].

Essa funcionalidade é essencial para permitir uma análise exploratória dos dados, permitindo identificar padrões e anomalias sem a necessidade de editar manualmente os códigos de análise.

2) *Visualização Gráfica dos Indicadores*: A visualização gráfica foi implementada para apresentar tendências e comparações de desempenho de forma eficaz. Utilizando a biblioteca Plotly, foram desenvolvidos os seguintes tipos de gráficos interativos:

- Gráficos de Desempenho Mensal: Exibem o indicador rendimento específico ao longo dos meses selecionados, permitindo a comparação visual do desempenho das usinas em um período anual, como pode ser visto na Fig. 7.

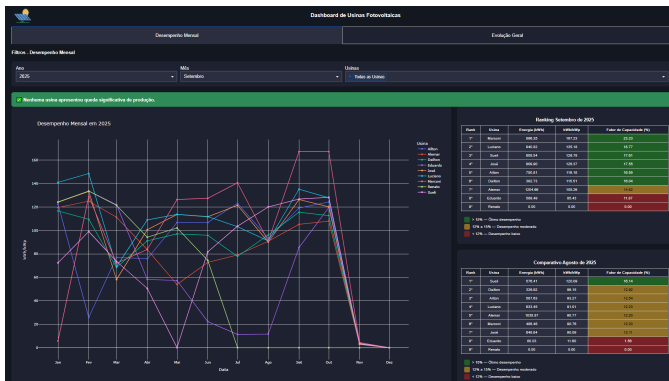


Figura 6. Interface do Dashboard.

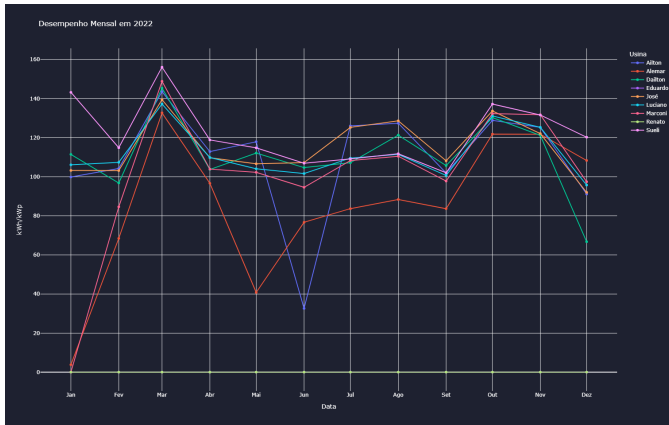


Figura 7. Gráfico de Desempenho Mensal.

- Gráficos de Desempenho Geral: Oferecem uma visão de longo prazo do desempenho das usinas, abrangendo todo o período de dados disponível (2022 a 2025), o que é essencial para identificar padrões de longo prazo, sazonalidades e anomalias, evidenciado na Fig. 8.
- Gráfico de Barras: apresentam o fator de capacidade de cada usina em um determinado período, permitindo comparações diretas de desempenho entre elas. As barras utilizam cores indicativas, verde (acima de 15%), laranja (12–15%) e vermelho (abaixo de 12%), facilitando a identificação visual de usinas com baixo aproveitamento ou possíveis anomalias operacionais, conforme ilustrado na Fig. 9.

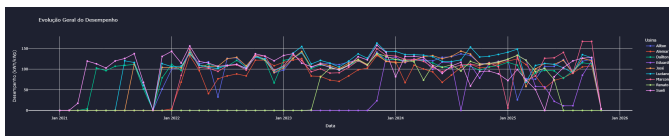


Figura 8. Gráfico de Desempenho Geral.

- Alertas de Queda de Produção: destaca quedas de produção acima de 30% de um mês para o outro, auxiliando na identificação de possíveis falhas ou necessidade de manutenção, como mostrado na Fig. 10. Esses alertas

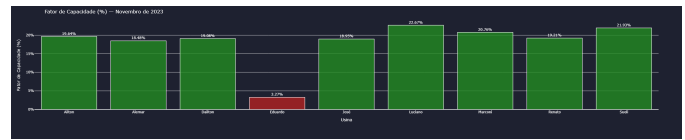


Figura 9. Gráfico de Barras.

são utilizados exclusivamente para o controle interno do GESEP, não sendo enviados automaticamente aos responsáveis pelas usinas.

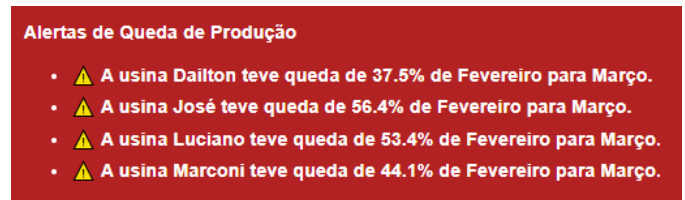


Figura 10. Alerta de Quedas de Produção.

Todos os gráficos possuem recursos interativos como zoom, destaque por seleção, exibição de valores ao passar o cursor (tooltips) e exportação de imagens, o que proporciona uma exploração detalhada e amigável dos resultados [12].

3) *Tabelas de Rankings e Indicadores Numéricos*: Complementando as visualizações gráficas, tabelas foram integradas ao dashboard para fornecer dados numéricos precisos e rankings detalhados de desempenho. Essas tabelas são atualizadas dinamicamente com base nos filtros selecionados pelo usuário no dashboard principal. As principais funcionalidades das tabelas incluem:

- Rankings de Desempenho: Tabelas que classificam as usinas com base no indicadores técnicos, mas também é fornecido os dados de energia gerada no mês, como ilustrado na Fig. 11. Isso permite uma identificação rápida das usinas com melhor e pior desempenho.
- Dados Detalhados: Apresentação clara dos valores numéricos que embasam os gráficos, oferecendo precisão para análises mais aprofundadas.
- Comparativos: Facilidade para comparar diretamente os valores de desempenho entre as usinas em um formato tabular.

4) Benefícios e Aplicações da Visualização Interativa:

A adoção de uma interface gráfica interativa contribuiu diretamente para:

- facilitar a interpretação dos resultados, tornando a análise mais intuitiva mesmo para usuários não especialistas;
- agilizar a identificação de anomalias e tendências, com base em representações visuais;
- permitir a atualização contínua dos dados, à medida que novas medições forem adicionadas aos arquivos CSV;
- e possibilitar o uso da ferramenta em atividades de pesquisa e ensino, dentro do próprio GESEP, como apoio a projetos relacionados à energia solar e sistemas elétricos.

Ranking Outubro de 2025				
Rank	Usina	Energia (kWh)	kWh/kWp	Fator de Capacidade (%)
1º	Marconi	896.05	167.17	22.47
2º	Sueli	615.83	128.30	17.24
3º	Luciano	890.13	127.89	17.19
4º	Ailton	782.63	124.23	16.70
5º	José	865.02	120.14	16.15
6º	Eduardo	825.45	119.63	16.08
7º	Dailton	383.12	112.68	15.15
8º	Aleamar	1235.11	107.92	14.50
9º	Renato	0.00	0.00	0.00

■ > 15% — Ótimo desempenho
■ 12% a 15% — Desempenho moderado
■ < 12% — Desempenho baixo

Figura 11. Tabela Rank.

Dessa forma, a interface gráfica não apenas complementa as análises estatísticas realizadas, mas também representa um passo importante na transformação dos dados em informações visuais úteis para a tomada de decisão e o monitoramento contínuo das usinas fotovoltaicas.

Como limitações do estudo, destaca-se a ausência de informações detalhadas sobre manutenções corretivas e preventivas, bem como de dados meteorológicos locais. A indisponibilidade desses registros restringe a análise causal das variações de desempenho, limitando a correlação direta entre eventos operacionais, condições ambientais e a produção das usinas.

III. RESULTADOS

A análise dos resultados foi conduzida a partir do tratamento e consolidação dos dados de geração de energia das usinas fotovoltaicas do GESEP, abrangendo o período de 2022 a 2025. Ressalta-se que os dados de 2025 compreendem o período de janeiro a outubro, sendo portanto uma análise parcial do ano. Os indicadores de rendimento específico em kWh/kWp e fator de capacidade em % foram calculados para cada usina, permitindo identificar padrões de desempenho, sazonalidade e variações operacionais entre as plantas.

A. Desempenho Médio Anual

As Tabelas V e VI apresentam a evolução temporal do fator de capacidade e do rendimento específico das nove usinas fotovoltaicas do GESEP. A análise desses dados permite identificar tendências de desempenho e variações operacionais significativas ao longo do período estudado.

A média de desempenho da Tabela VI foi calculada considerando apenas o período de 2022 a 2024. Os dados de 2025 foram excluídos da média anual por representarem um período incompleto (acumulado até outubro), evitando, assim, a subestimação do desempenho médio global.

Embora a metodologia tenha adotado um recorte temporal fixo para a padronização da tabela geral, reconhece-se que

Tabela V
FATOR DE CAPACIDADE ANUAL DAS USINAS FOTOVOLTAICAS DO GESEP (%)

Usina	2022	2023	2024	2025	Média
Ailton	14,97	16,19	16,89	13,53	15,40
Aleamar	11,72	13,83	13,46	13,10	13,03
Dailton	15,14	16,01	15,25	13,62	15,01
Eduardo	0,00	1,73	14,22	10,35	8,76
José	15,74	16,05	17,05	15,27	16,03
Luciano	15,30	17,61	18,12	15,98	16,75
Marconi	13,84	15,47	15,45	15,42	15,05
Renato	0,00	10,23	15,04	9,02	11,43
Sueli	16,74	16,73	14,06	11,89	14,86

Tabela VI
RENDIMENTO ESPECÍFICO ANUAL DAS USINAS FOTOVOLTAICAS DO GESEP (kWh/kWp).

Usina	2022	2023	2024	2025	Média
Ailton	1311,60	1418,26	1479,34	977,72	1403,07
Aleamar	1026,66	1211,54	1179,36	951,85	1139,19
Dailton	1326,40	1402,89	1335,84	984,23	1355,04
Eduardo	0,00	151,85	1245,36	748,31	465,74
José	1379,15	1406,14	1493,83	1102,39	1426,37
Luciano	1339,99	1542,42	1587,00	1154,19	1489,8
Marconi	1212,27	1355,25	1353,60	1114,81	1307,04
Renato	0,00	896,64	1317,53	650,10	738,06
Sueli	1466,60	1465,78	1231,80	859,75	1388,06

isso penaliza os indicadores médios das Usinas Eduardo e Renato. A média inferior reflete o início tardio da operação, e não um baixo desempenho técnico. Para uma avaliação justa da eficiência destas usinas, observa-se isoladamente o ano de 2024, período em que operaram plenamente e atingiram FC de 14,22% e 15,04%, respectivamente, alinhando-se à média das demais unidades.

B. Comparação Direta entre Usinas

1) *Ranking de Desempenho:* Conforme ilustrado nas Figs. 12 – 14, a Usina Luciano liderou a maioria dos períodos analisados, apresentando fator de capacidade superior a 20%. Observa-se também que a Usina Sueli apresenta maior variabilidade em sua produção, com períodos de queda acentuada. Além disso, as posições no ranking variaram ao longo dos meses. A Usina Luciano manteve-se na liderança na maior parte do período, exceto em março de 2022, quando a Usina Sueli assumiu o primeiro lugar, e em outubro de 2025, quando a liderança foi da Usina Marconi. Nota-se ainda alternância nas posições seguintes, com destaque para a Usina José, Marconi e Ailton, que se revezaram nas colocações subsequentes.

2) *Análise por Porte:* A comparação entre usinas de diferentes potências instaladas teve como objetivo avaliar se o porte do sistema influencia diretamente o seu desempenho energético. Essa análise foi conduzida com base nos indicadores RE e FC, calculados para cada uma das usinas do GESEP no período de 2022 a 2025.

Os resultados indicam que uma maior potência instalada não se traduz, necessariamente, em maior eficiência operacional. A Usina Aleamar, apesar de possuir a maior potência

Ranking Março de 2023				
Rank	Usina	Energia (kWh)	kWh/kWp	Fator de Capacidade (%)
1º	Luciano	1076.87	154.72	20.80
2º	José	1028.95	142.91	19.21
3º	Dailton	479.28	140.97	18.95
4º	Ailton	877.89	139.35	18.73
5º	Aleamar	1438.24	125.67	16.89
6º	Marconi	648.09	120.91	16.25
7º	Sueli	549.55	114.49	15.39
8º	Eduardo	0.00	0.00	0.00
9º	Renato	0.00	0.00	0.00
> 15% — Ótimo desempenho 12% a 15% — Desempenho moderado < 12% — Desempenho baixo				

Figura 12. Ranking Março 2023.

Ranking Setembro de 2024				
Rank	Usina	Energia (kWh)	kWh/kWp	Fator de Capacidade (%)
1º	Luciano	1068.95	153.58	21.33
2º	José	982.00	136.39	18.94
3º	Ailton	837.55	132.94	18.46
4º	Renato	806.29	118.92	16.52
5º	Aleamar	1280.44	111.88	15.54
6º	Marconi	599.43	111.83	15.53
7º	Eduardo	762.61	110.52	15.35
8º	Dailton	363.68	106.96	14.86
9º	Sueli	283.87	59.14	8.21
> 15% — Ótimo desempenho 12% a 15% — Desempenho moderado < 12% — Desempenho baixo				

Figura 13. Ranking Setembro 2024.

Ranking Fevereiro de 2025				
Rank	Usina	Energia (kWh)	kWh/kWp	Fator de Capacidade (%)
1º	Luciano	1033.90	148.55	22.11
2º	Renato	905.91	133.62	19.88
3º	Eduardo	921.87	133.60	19.88
4º	José	959.53	133.27	19.83
5º	Marconi	691.45	129.00	19.20
6º	Aleamar	1430.34	124.98	18.60
7º	Dailton	372.23	109.48	16.29
8º	Sueli	475.69	99.10	14.75
9º	Ailton	162.34	25.77	3.83
> 15% — Ótimo desempenho 12% a 15% — Desempenho moderado < 12% — Desempenho baixo				

Figura 14. Ranking Fevereiro 2025.

nominal (11,445 kWp), apresentou desempenho inferior em diversos períodos quando comparada a sistemas de menor porte, como as Usinas Luciano (6,96 kWp) e Marconi (5,360 kWp). Conforme observado nas Tabelas V e VI, estas últimas mantiveram fatores de capacidade e rendimentos específicos consistentemente acima da média.

A Fig. 15 evidencia essa discrepância, embora a Usina Aleamar gere maior montante absoluto de energia, raramente superou a eficiência relativa da Usina Luciano. As Figs. 12–14 corroboram esse comportamento, reforçando que o dimensionamento da planta não é o único determinante para o aproveitamento energético.



Figura 15. Comparação da Usina Aleamar com a Usina Luciano.

Essa tendência pode ser explicada por fatores operacionais e de instalação, como:

- orientação e inclinação dos módulos, que afetam a captação solar direta;
- sombras parciais causadas por edificações ou vegetação próximas;
- diferenças nos inversores (modelo, eficiência e dimensionamento);
- e variações na limpeza e manutenção preventiva entre as usinas.

Ao normalizar a produção pela potência instalada, o indicador RE e FC demonstrou que o tamanho do sistema não é um fator determinante para o melhor aproveitamento energético. Usinas menores, quando bem dimensionadas, podem alcançar desempenhos iguais ou superiores aos de sistemas maiores.

C. Análise Temporal e Tendências

1) *Evolução do Desempenho*: Na Fig. 8 observa-se que o Gráfico de Desempenho Geral, que abrange o período de 2022 a 2025, forneceu uma visão macro da operação das usinas. Notou-se uma certa estabilidade geral na produção ao longo dos anos para a maioria das usinas. Contudo, este gráfico também evidenciou a presença de dados faltantes ou períodos de baixa produção para algumas usinas, que podem indicar interrupções operacionais ou falhas no sistema de coleta.

Destacando a Usina Sueli, como mostrado na Fig. 16, observa-se uma queda gradual na produção ao longo do tempo. O maior rendimento ocorreu em 2022, seguido de uma redução contínua nos anos seguintes. Essa diminuição pode estar relacionada à degradação dos módulos fotovoltaicos, acúmulo de sujeira ou falhas em componentes do sistema. Como a taxa de desempenho é calculada em períodos mensais ou anuais, é essencial que defeitos em módulos, inversores e demais equipamentos sejam corrigidos rapidamente, minimizando o impacto desses fatores nas taxas de desempenho.



Figura 16. Gráfico de Evolução de Desempenho da Usina Sueli.

No caso das Usinas Renato e Eduardo, suas operações tiveram início em momentos distintos de 2023: a Usina Renato iniciou sua geração em maio, enquanto a Usina Eduardo passou a operar em novembro do mesmo ano. A partir de 2025, verifica-se uma queda na produção da Usina Eduardo e a interrupção da coleta de dados da Usina Renato a partir de julho, em ambos os casos devido a falhas de comunicação, conforme ilustrado na Fig. 17.



Figura 17. Gráfico de Evolução de Desempenho das Usinas Eduardo e Renato.

2) *Sazonalidade e Padrões Climáticos*: Os resultados mensais mostraram comportamentos distintos entre as usinas, refletindo tanto fatores técnicos quanto ambientais. De modo geral, observou-se uma tendência de maior geração nos meses de verão (novembro a março), quando há maior incidência solar, e uma redução natural durante o período de inverno (junho a agosto), associada à menor irradiância e maior nebulosidade.

A análise comparativa entre março e junho, apresentada na Fig. 18 e Fig. 19, revela um padrão sazonal marcante, com a produção média das usinas apresentando redução de aproximadamente 35% no indicador RE, consistente com a diminuição da irradiância solar característica do período.

A Fig. 20 ilustra claramente a influência da sazonalidade na produção de energia.

A análise visual evidencia uma forte correlação entre o rendimento específico e o regime de insolação, com picos de geração entre outubro e março, e reduções entre maio e agosto. Esses resultados confirmam a importância de considerar o fator climático na avaliação de desempenho e reforçam a necessidade de acompanhamento contínuo ao longo do ano.

D. Análise de Períodos Críticos

A queda de produção registrada em março de 2025, conforme ilustrado na Fig. 21 representa um caso particularmente interessante, pois contraria o padrão sazonal estabelecido nos anos anteriores, onde este mês consistentemente apresentava os maiores picos de geração. Esta anomalia, que afetou a maioria das usinas de forma homogênea, sugere a influência de fatores externos comuns, possivelmente relacionados às condições climáticas regionais atípicas ou a eventos ambientais específicos que merecem investigação adicional.

Ranking Março de 2022				
Rank	Usina	Energia (kWh)	kWh/kWp	Fator de Capacidade (%)
1º	Sueli	749.21	156.08	20.98
2º	Marconi	797.81	148.85	20.01
3º	Dailton	494.26	145.37	19.54
4º	Ailton	904.21	143.53	19.29
5º	José	1004.16	139.47	18.75
6º	Luciano	955.02	137.22	18.44
7º	Alemar	1518.46	132.67	17.83
8º	Eduardo	0.00	0.00	0.00
9º	Renato	0.00	0.00	0.00

■ > 15% — Ótimo desempenho
■ 12% a 15% — Desempenho moderado
■ < 12% — Desempenho baixo

Figura 18. Tabela Rank de Março de 2022.

Ranking Junho de 2022				
Rank	Usina	Energia (kWh)	kWh/kWp	Fator de Capacidade (%)
1º	José	771.97	107.22	14.89
2º	Sueli	513.21	106.92	14.85
3º	Dailton	355.88	104.67	14.54
4º	Luciano	707.52	101.66	14.12
5º	Marconi	506.99	94.59	13.14
6º	Alemar	877.90	76.71	10.65
7º	Ailton	205.60	32.64	4.53
8º	Eduardo	0.00	0.00	0.00
9º	Renato	0.00	0.00	0.00

■ > 15% — Ótimo desempenho
■ 12% a 15% — Desempenho moderado
■ < 12% — Desempenho baixo

Figura 19. Tabela Rank de Junho de 2022.

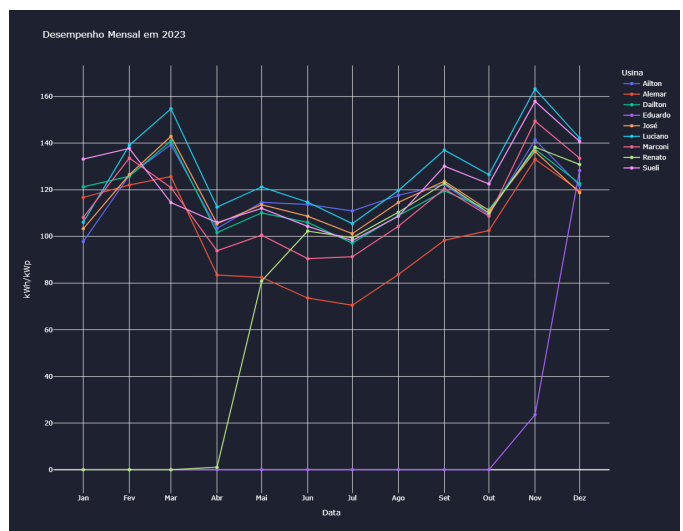


Figura 20. Gráfico de Desempenho Mensal de 2023.

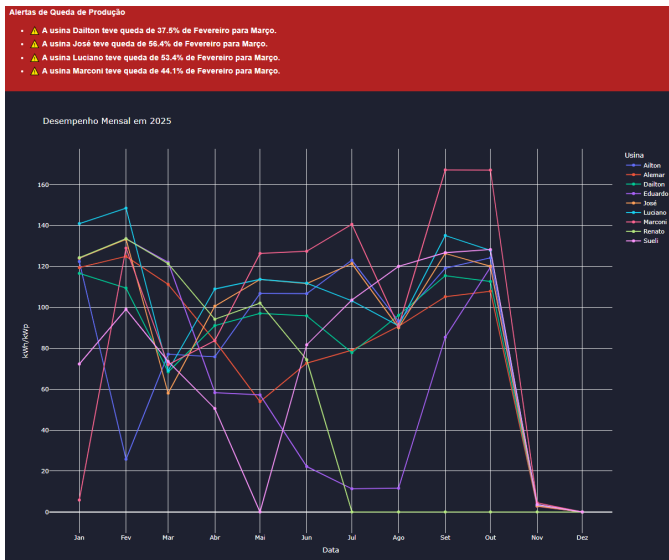


Figura 21. Queda de Produção Março 2025.

A Fig. 22 corrobora esta análise, mostrando que a redução afetou a maioria das usinas de forma consistente, sugerindo uma causa comum externa às instalações.

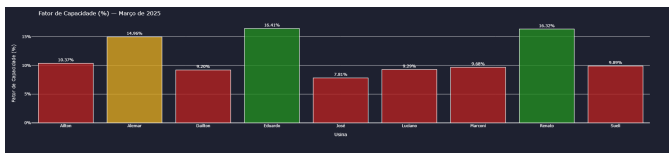


Figura 22. Gráfico de Barras Fator de Capacidade Março 2025.

A Fig. 23 apresenta uma queda abrupta na produção da Usina Eduardo, chegando a zerar a geração. A equipe de manutenção verificou que a causa foi uma falha de internet, embora fatores como sujeira ou sombreamento também pudessem ter ocasionado o problema. O mesmo padrão é verificado na Fig. 24, onde as Usinas Ailton e Alemar também exibem quedas abruptas em suas curvas de produção.

E. Aplicação dos Indicadores de Desempenho

1) *Avaliação pelo Rendimento Específico*: A aplicação do rendimento específico possibilitou uma avaliação normalizada do desempenho energético das usinas, independentemente de suas potências instaladas. Com base nos dados consolidados de 2022 a 2025, observam-se os seguintes padrões de desempenho:

Conforme os dados apresentados na Tabela VI, a maioria das usinas do GESEP manteve desempenho consistentemente superior a 1300 kWh/kWp/ano, classificando-se na categoria "Ótimo" para o contexto energético da região de Viçosa e Zona da Mata [8]. Entretanto, a Usina Alemar apresentou resultados inferiores à média regional, indicando a necessidade de investigação mais aprofundada sobre possíveis fatores limitantes de natureza operacional, ambiental ou técnica.

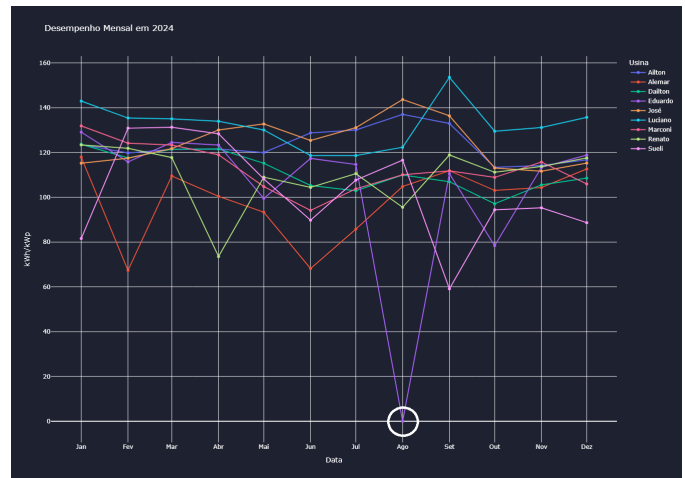


Figura 23. Queda de Produção Usina Eduardo Agosto 2024.

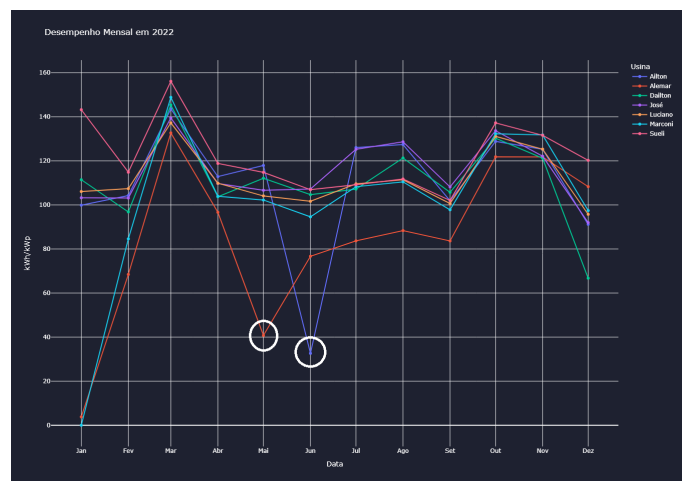


Figura 24. Quedas de Produção Usinas Ailton e Alemar 2022.

Um caso que merece destaque é o da Usina Sueli. Apesar de sua média histórica situar-se em 1388,06 kWh/kWp/ano, observa-se uma tendência decrescente preocupante em seu rendimento específico ao longo dos anos, como analisado anteriormente. Projeções baseadas na trajetória recente indicam que, mantido o atual padrão, a usina poderá atingir um RE de aproximadamente 1031,7 kWh/kWp em 2025, valor significativamente abaixo do potencial esperado para a região.

2) *Avaliação pelo Fator de Capacidade*: O fator de capacidade complementou a análise ao indicar o nível de aproveitamento do potencial máximo de geração de cada usina. Conforme mostrado na Tabela V, as usinas Luciano e José apresentaram os melhores resultados, com valores médios anuais de 16,75% e 16,03%, respectivamente. Esses índices estão alinhados ao desempenho esperado para sistemas fotovoltaicos instalados em Minas Gerais, reforçando a consistência dos resultados obtidos [9].

Além disso, as Usinas Ailton, Marconi e Dailton também apresentaram desempenho consistente, mantendo médias de FC superiores a 15% ao longo do período analisado, o que

demonstra estabilidade e boa utilização da capacidade instalada.

Por outro lado, as demais usinas registraram fatores de capacidade inferiores à média regional, indicando a existência de oportunidades de melhoria.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma avaliação abrangente do desempenho das usinas fotovoltaicas do GESEP/UFV, com base em dados reais de geração coletados no período de 2022 a 2025. Por meio da análise sistemática de indicadores técnicos normalizados, rendimento específico e fator de capacidade, foi possível caracterizar o comportamento operacional das nove usinas monitoradas, identificar padrões de eficiência e detectar oportunidades de otimização.

Os resultados demonstraram que as Usinas Luciano e José apresentaram os melhores desempenhos, com fatores de capacidade consistentemente superiores a 16% e rendimentos específicos médios acima de 1400 kWh/kWp, valores que se alinham com as referências técnicas para a região de Minas Gerais. É importante destacar que outras usinas, como Ailton, Dailton e Marconi, também apresentaram desempenho excelente, com médias anuais de FC acima de 15% e RE superiores a 1300 kWh/kWp.

Constatou-se que o porte da usina não foi um fator determinante para a eficiência, conforme evidenciado pela Usina Alemar que, apesar de possuir a maior potência instalada (11,445 kWp), apresentou resultados inferiores aos de usinas menores, possivelmente devido a fatores como orientação, sombreamento ou manutenção.

A análise temporal revelou padrões sazonais esperados, com reduções de aproximadamente 35% na produção de energia e no rendimento específico durante os meses de inverno, além de permitir a identificação de anomalias operacionais significativas, como a queda generalizada de produção em março de 2025 e falhas pontuais em inversores específicos. A ferramenta de dashboard interativo desenvolvida mostrou-se valiosa para a visualização dinâmica desses resultados, facilitando a interpretação dos dados e a identificação de tendências.

Ressalta-se que a análise foi limitada pela indisponibilidade de dados meteorológicos e de registros de manutenção, já apontada na metodologia, o que restringiu a investigação detalhada das causas das variações de desempenho observadas.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a integração de dados meteorológicos, como irradiância e temperatura, a fim de permitir uma correlação mais precisa com o desempenho das usinas.

Em síntese, este trabalho contribui para o avanço do monitoramento e gestão de usinas fotovoltaicas, demonstrando a importância da análise sistemática de indicadores técnicos para a otimização do desempenho e a maximização do retorno energético de sistemas fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

- [1] W. P. B. Filho, W. R. Ferreira, A. C. S. Azevedo, A. L. Costa e R. B. Pinheiro, "Expansão da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Impactos Ambientais e Políticas Públicas," *R. gest. sust. ambient.*, n. esp., pp. 628-642, dez. 2015.
- [2] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), "GSR 2024 – Renewables in Energy Supply." Disponível em: <https://www.ren21.net/gsr-2024/>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- [3] Agência Nacional de Energia Elétrica, "Geração Distribuída." Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- [4] Empresa de Pesquisa Energética, "Balanço Energético Nacional 2024 – Síntese." Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- [5] V. M. N. Mavungo, "Proposta de Implementação de um Sistema de Monitoramento com Uso de Microinversor para Detectar Defeitos nos Módulos Fotovoltaicos da Central Híbrida no Longonjo," Relatório Final de Curso, Instituto Superior Politécnico da Caála, Caála, Angola, 2024.
- [6] VOLPATO, Evandro Luis. Análise do rendimento na conversão de energia solar em energia elétrica, de quatro tecnologias de células fotovoltaicas, na cidade de Campo Mourão – Estado do Paraná. 2022. 96 f. Dissertação (Mestrado em Inovação Tecnológica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2022.
- [7] HIRASSAKI, V.; NASPOLINI, H. F.; ABREU, J. P. F.; SOUZA NETO, L. H.; RÜTHER, R. Fator de capacidade representativo da operação de múltiplas unidades de geração fotovoltaica distribuída. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 10., 2024, Natal. Anais [...]. Natal, 2024. p. 1-9.
- [8] REIS, Rulbran Januário dos; TIBA, Chiguero (Org.). Atlas Solarimétrico de Minas Gerais: Volume II. Belo Horizonte: Futura Express, 2016. 236 p.
- [9] Agência Nacional de Energia Elétrica, "Nota Técnica nº 67/2022-SRM/ANEEL." [S.l.], 2022. Disponível em: https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/consultas-publicas?p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&p_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_id=Documento=46796&p_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_tipoFaseReuniao=fase&p_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_jspPage=%2Fhtml%2Fpp%2Fvisualizar.jsp. Acesso em: 11 nov. 2025.
- [10] D. P. Hilgert, A. C. Cordeiro, N. P. Cremasco, R. L. Yang, C. de O. Silveira, e J. Urbanetz Junior, "Analysis of PV Systems Installed in Paraná," *Braz. Arch. Biol. Technol.*, vol. 64, no. e21200100, pp. 1-10, 2021, doi: 10.1590/1678-4324-2021200100.
- [11] T. E. Pasquali, V. R. da Silva, F. S. Ribeiro, I. T. S. de Santana, J. Jankowitsch, R. A. T. Costa, F. Silveira, e W. S. Pinheiro, "Criação de dashboards analíticos em Python para tomada de decisão," *REVISTA CADERNO PEDAGÓGICO - Studies Publicações e Editora Ltda.*, Curitiba, v. 21, n. 8, pp. 01-51, 2024, doi: 10.54033/cadpedv21n8-084.
- [12] G. Datt, "Visualização de Dados Interativa com Plotly: Guia Prático em Python." Medium. [Online]. Disponível em: <https://medium.com/@guilhermedatt/visualiza%C3%A7%C3%A3o-de-dados-interativa-com-plotly-guia-pr%C3%A1tico-em-python-f46cef6065f2>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- [13] DIAS, C. L. A.; BRANCO, D. A. C.; AROUCA, M. C.; LE-GEY, L. F. L. Performance estimation of photovoltaic technologies in Brazil. *Renewable Energy*, [S. l.], v. 114, p. 367-375, 2017. DOI: 10.1016/j.renene.2017.07.033.