

ANÁLISE DECENAL DA EFICIÊNCIA E DEGRADAÇÃO DE USINA FOTOVOLTAICA EM REGIÃO SEMIÁRIDA

Nicolas Rubens Silva de Sena¹ e Romênia Gurgel Vieira²

Resumo: Nos últimos anos, a busca por fontes de energia sustentáveis e a preocupação com os impactos ambientais dos combustíveis fósseis vêm impulsionando o crescimento da energia solar fotovoltaica no Brasil, que se destaca como uma alternativa promissora no cenário energético global. Considerando a necessidade de monitoramento e manutenção de usinas solares, torna-se fundamental compreender como a eficiência e o desempenho dessas instalações evoluem ao longo do tempo. Neste contexto, o presente estudo realizou uma análise decenal da eficiência e do desempenho de uma usina fotovoltaica instalada em 2013 no campus Mossoró da UFERSA, com potência de 3,43 kWp, composta por 14 módulos de 245 Wp conectados em uma *string* única. A metodologia envolveu a coleta e comparação dos principais parâmetros elétricos da usina, como tensão, corrente, potência, taxa de distorção harmônica (TDH) e fator de potência, avaliando dados obtidos ao longo de dez anos de operação. O principal objetivo do trabalho foi quantificar as perdas e identificar tendências de degradação do sistema, buscando indicar intervenções necessárias para mitigar perdas e aprimorar a eficiência do conjunto fotovoltaico. Como resultados, foram observadas reduções graduais na eficiência e alterações nos parâmetros analisados ao longo do período estudado, associadas a fatores como acúmulo de sujeira, sombreamento e degradação natural dos módulos. O monitoramento contínuo e a adoção de práticas de manutenção preventiva mostraram-se essenciais para corrigir desvios e garantir o melhor desempenho do sistema ao longo do tempo.

Palavras-chave: *Eficiência energética, Desempenho fotovoltaico, Degradação de módulos fotovoltaicos, Monitoramento de usinas fotovoltaicas.*

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a crescente demanda por fontes de energia sustentáveis e a preocupação com os impactos ambientais causados pelas fontes tradicionais, como os combustíveis fósseis, têm impulsionado o desenvolvimento e a adoção de tecnologias limpas e renováveis.

Nesse contexto, a energia solar, especialmente na forma de energia fotovoltaica, tem se destacado como uma das alternativas mais promissoras no cenário energético mundial (BRITO; GALDINO, 2011).

O setor de energia solar no Brasil continua em forte crescimento, colocando o país entre os líderes globais no aproveitamento dessa fonte limpa e renovável. De acordo com projeções, a expectativa é que, até 2025, sejam adicionados cerca de 13,2 GW à capacidade instalada nacional, o que representa um crescimento de aproximadamente 25% em relação aos atuais 51,5 GW. (ABSOLAR, 2025).

Nos últimos anos, esses projetos de energia solar vêm ganhando cada vez mais espaço no mundo por apresentar diversas vantagens como a abundância do recurso solar, a baixa emissão de poluentes, a modularidade das instalações e a viabilidade em diferentes escalas, desde sistemas residenciais até grandes usinas solares (EPE, 2020). Além disso, é uma fonte estratégica para países como o Brasil, que possuem elevada incidência solar em grande parte do território nacional (PEREIRA et al., 2006).

Com o aumento da potência instalada das usinas fotovoltaicas, as inspeções regulares tornam-se necessárias para garantir que os equipamentos funcionem conforme especificado. Existem diversos fatores que podem reduzir a eficiência e a potência dos painéis, especialmente se a manutenção adequada não for realizada, como sombreamento, acúmulo de sujeira, entre outros. Fazer um monitoramento dos equipamentos para verificar quais são os fatores que levam a esta diminuição de geração de energia é essencial para corrigir e prevenir essas perdas, melhorando, assim, a eficiência do sistema.

Diante deste contexto, este trabalho tem como objetivo analisar o impacto da degradação da usina fotovoltaica instalada na UFERSA, campus Mossoró, no ano de 2014. As análises serão realizadas utilizando os parâmetros tensão, corrente, potência, taxa de distorção harmônica (TDH) e fator de potência, comparando-os com dados coletados após 10 anos de operação da usina, buscando quantificar as perdas, identificar tendências e indicar possíveis intervenções necessárias.

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira: A seção 1 apresenta e contextualiza o tema como também explica o motivo e o objetivo do trabalho. A seção 2 trata sobre os aspectos operacionais e sobre a degradação das usinas solares. A seção 3 trata sobre materiais e métodos, trazendo todas as especificações da usina fotovoltaica que serviu de estudo, como também o método que foi usado para a coleta dos dados. Na seção 4, resultados e discussões, são apresentados e comparados todos os resultados encontrados. A seção 5, conclusão, é dedicada à

finalização do trabalho, dando ênfase aos resultados mais importantes como também, às estratégias para a mitigação de perdas da usina fotovoltaica. Ainda na seção 5, fala-se sobre melhorias a serem adotadas para trabalhos futuros.

2. ASPECTOS OPERACIONAIS E DESAFIOS DA DEGRADAÇÃO EM USINAS FOTOVOLTAICAS

As usinas solares fotovoltaicas são sistemas projetados para converter a energia da radiação solar em eletricidade, por meio do efeito fotovoltaico. A estrutura básica de uma usina solar inclui os módulos fotovoltaicos, os inversores, as estruturas de suporte, os cabos de conexão, os dispositivos de proteção elétrica e os sistemas de monitoramento e controle remoto.

Os módulos fotovoltaicos são formados por células solares que geram corrente contínua (CC). Essa energia é então convertida em corrente alternada (CA) pelos inversores, possibilitando o uso da energia na rede elétrica. As estruturas de suporte garantem o posicionamento adequado dos módulos para maximizar a captação solar, enquanto os sistemas de monitoramento permitem o acompanhamento remoto da operação e identificação de falhas ou quedas de desempenho.

Existem diferentes topologias de arranjo dos módulos, organizados em *strings* (conjuntos de módulos conectados em série), que por sua vez se conectam em paralelo em *arrays* fotovoltaicos. A escolha da topologia influencia diretamente a eficiência e a flexibilidade do sistema, devendo considerar sombreamento, espaço físico e características elétricas do projeto (GREEN, 2021). Alguns fatores influenciam a eficiência operacional de uma usina, entre os principais pode-se destacar: temperatura ambiente e dos módulos, níveis de irradiância solar, orientação e inclinação dos módulos, perdas por sombreamento, sujeira e eficiência dos inversores.

Outro fator importante a ser considerado em uma usina solar é a degradação dos módulos solares, que trata-se de um fenômeno natural e esperado ao longo da vida útil da instalação. Ela resulta da exposição prolongada dos materiais a fatores ambientais como radiação UV, variações térmicas, umidade e poeira, além de fatores mecânicos como vibrações e impactos. Os principais mecanismos de degradação incluem:

- Delaminação das camadas do módulo
- Descoloração das células e do encapsulaste
- Corrosão de contatos metálicos
- Formação de pontos quentes (*hotspots*)
- Microfissuras nas células solares

De acordo com estudos técnicos, os módulos fotovoltaicos apresentam uma taxa média de degradação anual que varia entre 0,5% e 1% (JORDAN; KURTZ, 2013). No entanto, equipamentos de maior qualidade tendem a apresentar perdas menores ao longo do tempo. Esse índice é um dos principais parâmetros considerados na projeção do desempenho da usina ao longo de sua vida útil, geralmente estimada em 25 anos.

Lembrando que condições climáticas adversas como granizo, chuvas ácidas e grandes variações de temperatura podem intensificar a degradação dos módulos. Por isso, a escolha criteriosa dos materiais e a implementação de medidas de proteção contra intempéries são fundamentais para prolongar a durabilidade e eficiência do sistema.

Um ponto fundamental para maior eficiência e confiabilidade da usina é o seu monitoramento contínuo. Através de plataformas de supervisão e aquisição de dados, é possível acompanhar em tempo real variáveis como geração instantânea, tensões, correntes, temperatura dos módulos e alertas de falha. Entre os métodos e tecnologias de inspeção e diagnóstico, destacam-se: análise termográfica para identificação de *hotspots*, análise de curvas IV e o monitoramento remoto por *software*, com alarmes automáticos.

As manutenções preventivas e corretivas são importantes para o bom funcionamento e contribuem para a eficiência de geração das usinas fotovoltaicas. A manutenção preventiva em sistemas fotovoltaicos abrange práticas como a limpeza regular dos módulos, verificação do aperto de conexões e parafusos, inspeção visual dos componentes e análise das curvas de desempenho. Já a manutenção corretiva consiste na substituição de peças com defeito, reparo de cabos danificados e ajustes ou reconfigurações nos inversores, quando necessário. Quando essas manutenções são negligenciadas ou realizadas de forma inadequada, o desempenho da usina pode ser seriamente afetado, resultando em prejuízos financeiros consideráveis (INEL, 2020).

Avaliar o desempenho da usina é de extrema importância, pois garante maior eficiência e confiabilidade. Para avaliar o desempenho de uma usina fotovoltaica, são utilizados diversos parâmetros elétricos, tais como tensão, corrente e potência ativa gerada em *strings* e inversores. Devem-se considerar também potência reativa, fator de potência e distorção harmônica.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A usina fotovoltaica conectada à rede utilizada para o estudo está localizada na UFRSA campus Mossoró/RN, e tem potência instalada de 3,43 kWp, sendo constituída por 14 módulos de 245 Wp cada, ligados em série, compondo uma única *string*, como mostra a Figura 1. Os módulos são da fabricante Yingli Solar, modelo YL245P – 29b. O inversor utilizado nessa usina é da fabricante SMA, modelo Sunny boy 3000HF US, com potência nominal de 3 kW. Um disjuntor de 25A é ligado na saída do inversor para proteção e manobra do sistema. Na Figura 1 é possível ver o inversor junto com o disjuntor. Na saída do disjuntor, os fios são ligados no QDT (quadro de distribuição do térreo), e de lá a energia é distribuída para as salas.

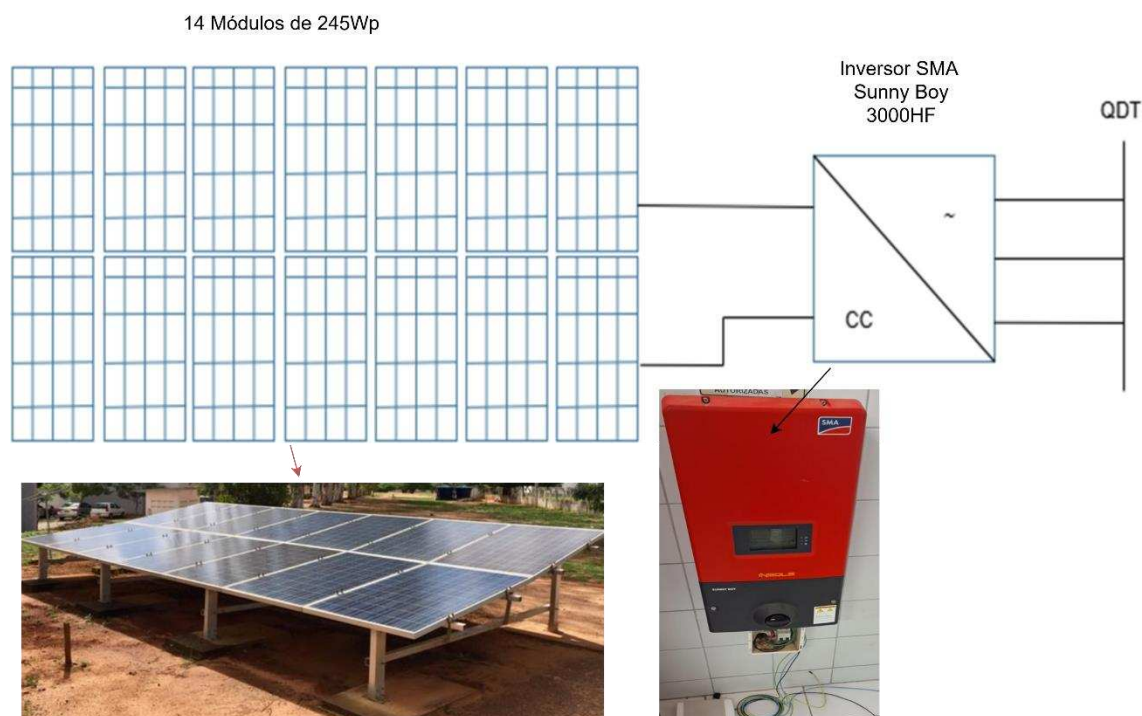


Figura 1 – Diagrama unifilar da usina estudada (Fonte: Autoria própria).

A usina fotovoltaica foi instalada em 2014, localizada em uma região de clima semiárido. Os parâmetros de tensão, corrente e potência foram medidos em 2015 e novamente em 2023, permitindo observar as mudanças após dez anos de operação contínua. Realizar o acompanhamento desses parâmetros ao longo de dez anos de operação contínua, especialmente em uma região semiárida, é fundamental para compreender o comportamento dos módulos sob condições climáticas extremas, como alta incidência solar, grandes variações de temperatura e baixos índices de precipitação. Essa análise permite identificar fatores de degradação específicos do ambiente semiárido, otimizar estratégias de manutenção e garantir maior confiabilidade e eficiência do sistema ao longo de sua vida útil.

Para obter os dados do sistema fotovoltaico, utilizou-se um analisador de energia modelo ET5061C, capaz de registrar parâmetros da rede ou do sistema acoplado. Na Figura 2 mostra-se o esquema que deve ser utilizado para realizar a ligação. O *software* TOPVIEW foi empregado para extrair e transferir os dados obtidos a um programa de análise, possibilitando a geração de gráficos para avaliação do sistema.

O analisador foi instalado na saída do inversor, onde permaneceu em operação por sete dias, no período de 1º a 8 de dezembro de 2023. Para fins comparativos, foram considerados também os dados coletados no mesmo intervalo de dias, de 1º a 8 de dezembro de 2015. Em ambas as campanhas de medição, utilizou-se o mesmo equipamento, assegurando a padronização do procedimento e a confiabilidade dos resultados obtidos. As leituras foram realizadas em intervalos de 15 minutos, conforme registrado pelo próprio equipamento. Para a ligação, utilizou-se um sensor de corrente Rogowski para a fase e três conectores tipo garra de jacaré nos condutores de neutro, terra e fase, conforme mostra a Figura 2.

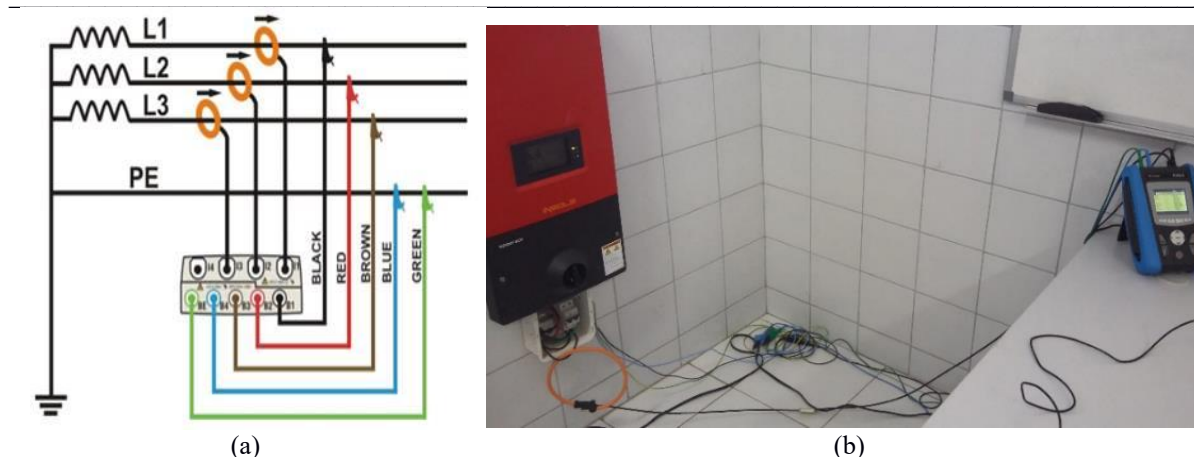


Figura 2- Ligação do analisador de energia (a) esquema de ligação ET5061C e (b) Ligação do analisador ao inversor (Fonte: Santiago, 2017)

É importante destacar que por falha do equipamento analisador ou falta de energia por parte da concessionária não foi possível obter medições durante alguns dias como também outros dias não tiveram medições completas. Então foi usado o mesmo número de amostras para que os gráficos fiquem coerentes e organizados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores obtidos do analisador mostram aumento da tensão fase-neutro em comparação com medições anteriores conforme a Figura 3. Esse aumento se dá provavelmente pela diminuição da corrente que também sofreu razoável diferença, como mostra a Figura 4. Essa diminuição da corrente se dá provavelmente pela falta de manutenção dos módulos fotovoltaicos, aliada à degradação natural dos equipamentos. Alguns fatores mais comuns são acúmulos de sujeira e poeira, sombreamentos e às vezes até defeitos nas próprias placas como microfissuras ou células danificadas. Como consequência dessa diminuição da corrente, a potência também diminuiu, como mostra a Figura 5.

Para se ter uma melhor perspectiva dos valores obtidos, calculou-se a média de ambos os gráficos para melhor compará-los. A Tabela 1 mostra as comparações.

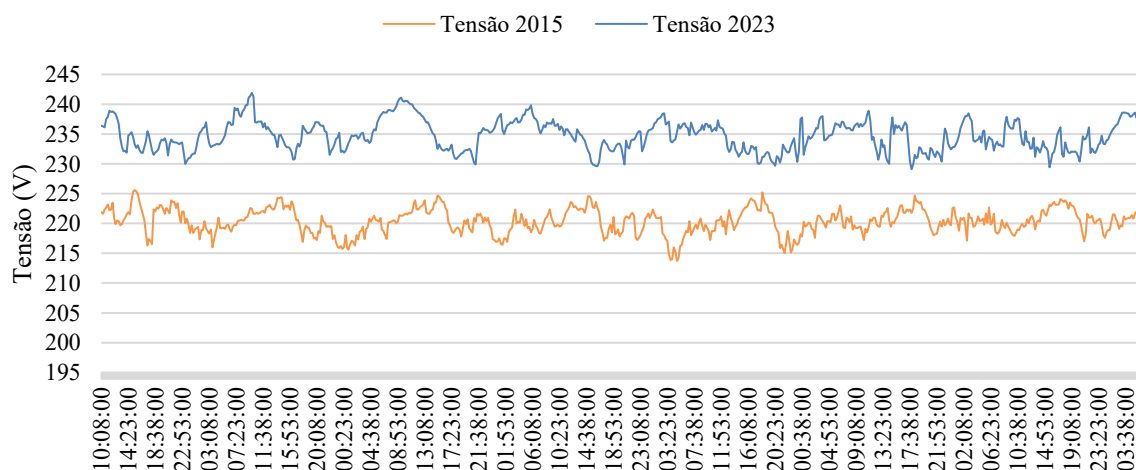


Figura 3 - Comparação dos valores médios de tensão fase-neutro registrados nas medições (Fonte: Autoria própria)

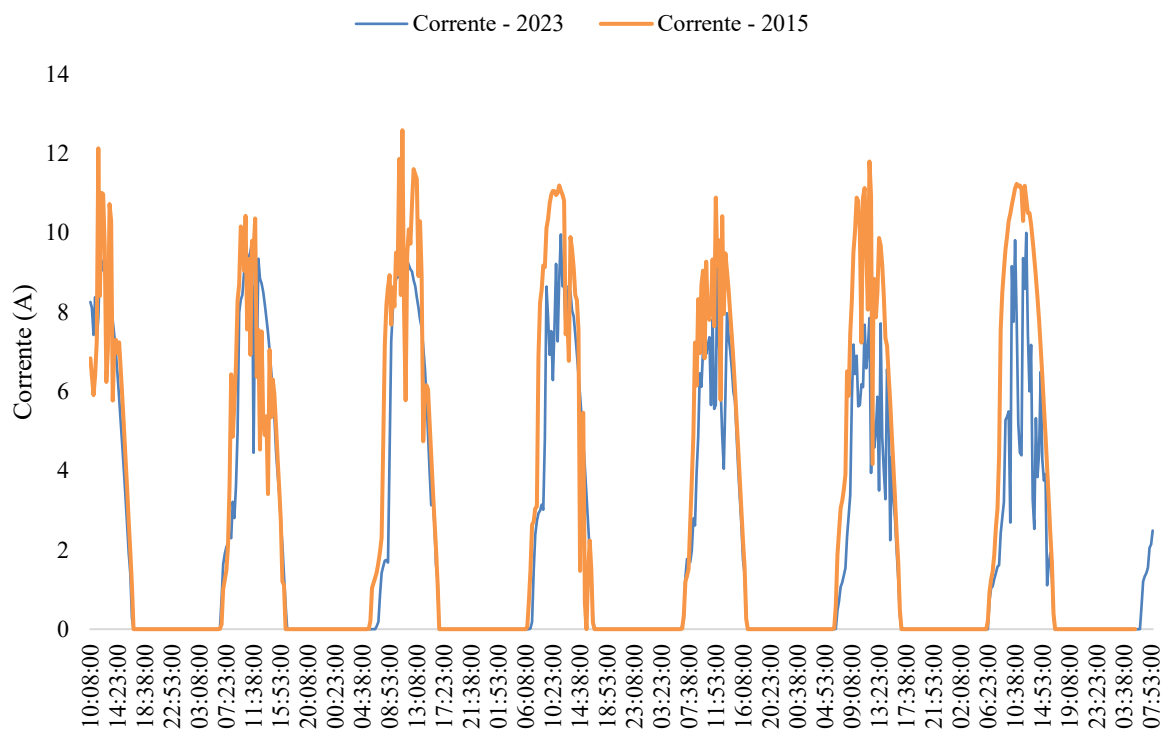


Figura 4 - Comparação das médias de corrente elétrica registradas nas diferentes medições (Fonte: Autoria própria)

O aumento da tensão média registrada (de 220,37 V em 2015 para 234,69 V em 2023) pode ser interpretado como resultado direto da redução da corrente média (de 6,67 A para 5,01 A). Essa relação inversa entre corrente e tensão sugere que, com menor geração de corrente pelos módulos, a tensão aumenta, provavelmente devido ao menor consumo instantâneo ou à própria característica dos inversores em manter a potência estável mesmo com quedas de geração.

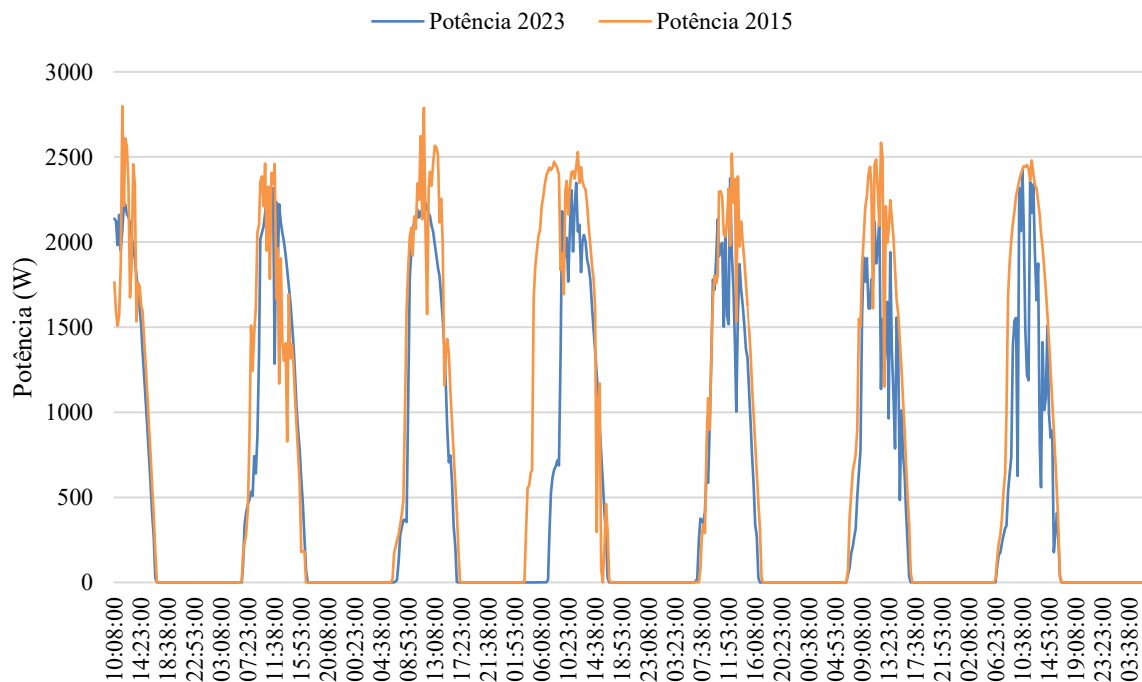


Figura 5 – Variação da potência medida durante os períodos analisados. (Fonte: Autoria própria)

Tabela 1 - Valores médios de tensão, corrente e potência (Fonte: Autoria própria)

Ano Base	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
2023	234,69	5,01	1250,86
2015	220,37	6,67	1572,95

A análise comparativa dos dados médios de corrente e potência referentes aos anos de 2023 e 2015 evidencia uma redução significativa na potência média fornecida pela usina solar ao longo do tempo, uma queda de 20,47%. Essa diminuição pode ser atribuída a fatores como envelhecimento dos módulos, degradação dos componentes do sistema ou condições ambientais menos favoráveis no período mais recente.

Outro parâmetro bastante importante para avaliação de uma usina solar é sua taxa de distorção harmônica. A taxa de distorção harmônica é uma medida que expressa o quanto uma forma de onda elétrica está distorcida em relação à sua forma ideal senoidal. Ela representa a presença de harmônicas, que são frequências múltiplas da frequência fundamental. Quanto maior a TDH, mais distorcida é a onda, o que pode causar aquecimento de cabos, mau funcionamento de equipamentos eletrônicos e perdas no sistema elétrico. Idealmente, a TDH deve ser a menor possível. Valores abaixo de 5% são geralmente aceitáveis em sistemas de baixa tensão, conforme normas como a IEEE 519.

Na Figura 6 mostra-se a comparação da TDHI (taxa de distorção harmônica de corrente) entre os dados de 2023 e 2015, é possível notar que o valor recomendado pela IEEE 519 é ultrapassado consideravelmente em ambas as medições. A elevada taxa de distorção harmônica, acima do recomendado pela IEEE 519 em ambos os períodos analisados, é motivo de preocupação. A presença excessiva de harmônicas pode levar a aquecimento de cabos e componentes elétricos, reduzindo sua vida útil e aumentando riscos de falha. Além disso, é possível que haja interferência no funcionamento de equipamentos sensíveis conectados à mesma rede e perdas adicionais de energia no sistema, impactando ainda mais a eficiência global da usina. Essa situação pode decorrer de fatores como a qualidade dos inversores, a presença de cargas não lineares próximas ao ponto de medição ou até problemas na rede de distribuição da concessionária.

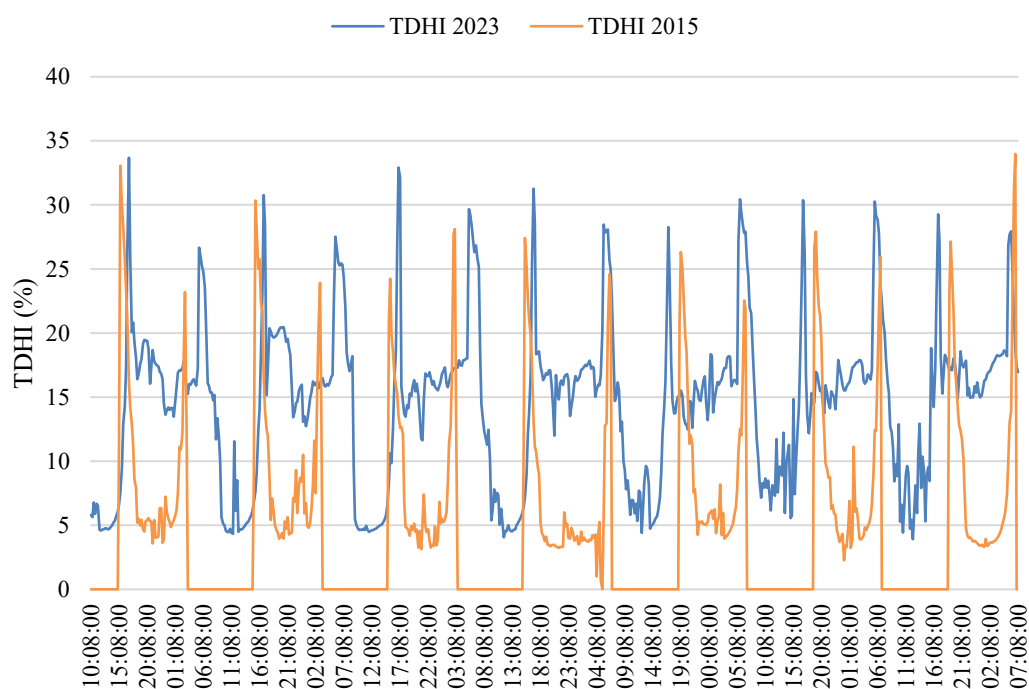


Figura 6 - Comparativo da Taxa de Distorção Harmônica de corrente Total (TDHI) entre 2015 e 2023. (Fonte: Autoria própria)

O fator de potência é fundamental para avaliar uma usina fotovoltaica pois através dele é verificado o quanto de potência ativa está sendo gerado. Lembrando que fator de potência baixo pode gerar multas pela concessionária que exige pelo menos o fator maior que 0,92. A Figura 7 mostra a comparação dos fatores de potência dos dados de 2023 e 2015 onde é possível notar que houve uma queda do fator de potência em comparação aos dados de 2015. Isso ocorreu provavelmente pelo também aumento da taxa de distorção harmônica, mas, como o inversor controla o fator de potência, a média de ambas ficou acima dos 0,92 exigido pela concessionária.

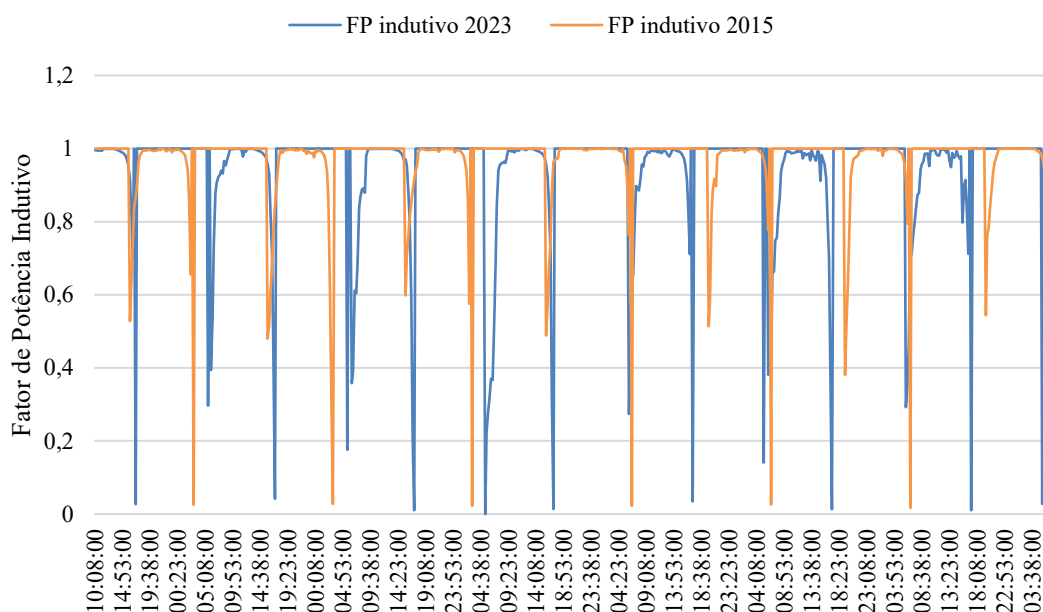


Figura 7 – Comparação dos fatores de potência medidos em 2015 e 2023 (Fonte: Autoria própria)

O fator de potência manteve-se em média acima do limite mínimo exigido (0,92), o que indica que a maior parte da energia fornecida é útil para consumo, com baixa quantidade de energia reativa circulando na rede. No entanto, a ligeira queda observada do fator de potência de 2015 para 2023 pode estar associada ao aumento da distorção harmônica, exigindo atenção para evitar penalidades impostas pela concessionária e garantir máxima eficiência operacional.

Ao considerar o desempenho da usina fotovoltaica ao longo de uma década de operação, é essencial ressaltar o impacto cumulativo de fatores ambientais e operacionais, especialmente em uma região de clima semiárido como o Semiárido potiguar, onde se localiza a UFERSA. Em ambientes semiáridos, a radiação solar abundante favorece a geração de energia, porém condições como altas temperaturas, acúmulo de poeira e baixa umidade relativa do ar podem acelerar a degradação dos módulos fotovoltaicos e dificultar a dissipação de calor, afetando a eficiência do sistema ao longo do tempo.

A análise dos dados colhidos entre 2015 e 2023 revela os efeitos combinados do envelhecimento natural dos componentes e das condições locais adversas. Após dez anos de operação, observa-se uma redução significativa de potência média fornecida, cerca de 20,5%, reflexo direto da degradação dos módulos e da possível insuficiência de manutenção, especialmente a limpeza regular, fundamental nessas regiões.

Ao mesmo tempo, o aumento na taxa de distorção harmônica e a leve queda do fator de potência indicam o surgimento de problemas de qualidade da energia, agravados pelo envelhecimento dos equipamentos e por possíveis sobrecargas decorrentes de cargas não lineares conectadas à rede.

Esses resultados evidenciam como, em regiões de clima semiárido, o desafio não é apenas aproveitar a alta incidência solar, mas manter a operação eficiente do sistema ao longo dos anos, enfrentando desgaste acelerado e exigindo estratégias de manutenção mais rigorosas e adaptadas ao contexto ambiental. Medidas como limpeza mais frequente dos módulos, monitoramento contínuo de desempenho e substituição programada de componentes degradados tornam-se essenciais para prolongar a vida útil da usina e garantir que o potencial solar da região seja convertido em energia de forma sustentável e confiável.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo medir parâmetros de uma usina fotovoltaica instalada no ano de 2013 na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) compará-los com dados antigos medidos em 2015. Os parâmetros utilizados para efeito de comparação foram cinco, sendo eles: tensão, corrente, potência, taxa de distorção harmônica de corrente e fator de potência.

Observando as variações de tensão, houve aumento da tensão de saída no inversor em comparação com os dados antigos. Isso ocorre provavelmente pela diminuição da corrente. Analisando as curvas das correntes, também é de fácil percepção a diminuição dela, isso ocorre provavelmente pela falta de manutenção dos módulos fotovoltaicos, aliada à degradação natural dos equipamentos. Outro parâmetro que diminuiu bastante foi a potência, já que a corrente diminuiu razoavelmente. Usando valores médios de potência foi calculada uma redução de 20,67%. Já no gráfico de taxa de distorção harmônica foi notado um leve aumento já que ambos os resultados estão bastante acima do recomendado que é de até 5%. No gráfico de fator de potência é possível notar alguns vales com valores baixos, mas ligeiramente corrigidos pelo inversor que manteve a média do fator de potência acima do recomendado.

Estes resultados reforçam a necessidade de atenção contínua à manutenção preventiva e ao monitoramento sistemático do sistema fotovoltaico, de modo a preservar a eficiência energética e evitar possíveis penalidades por descumprimento de normas técnicas. Entre os fatores que mais contribuíram para as perdas identificadas, destacam-se a falta de limpeza regular dos módulos e a degradação natural dos componentes, fatores estes que podem ser mitigados com ações simples e de baixo custo. Destaca-se ainda a importância de um projeto elétrico bem dimensionado, aliado à utilização de equipamentos eficientes e de alta qualidade, para garantir a segurança e a produtividade da usina.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a adoção de intervalos menores na coleta de dados e a ampliação do tempo de monitoramento, possibilitando análises mais detalhadas e robustas. Sugere-se, ainda, a realização de novos levantamentos após intervenções de manutenção, a fim de avaliar o impacto das ações corretivas sobre o desempenho do sistema. Essas abordagens permitirão o desenvolvimento de estratégias mais eficientes para garantir a longevidade e a confiabilidade das instalações fotovoltaicas, além de contribuir para o avanço do conhecimento técnico na área de energias renováveis.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Energia solar em 2025: crescimento, novas oportunidades e avanços tecnológicos. ABSOLAR – Notícias, São Paulo, 27 jan. 2025. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/https-jornalvisaodenegocios-com-br-energia-solar-em-2025-crescimentonovas-oportunidades-e-avancos-tecnologicos/>. Acesso em: 20 jul. 2025.

COSERN. Companhia Energética do Rio Grande do Norte. Conexão de microgeradores ao sistema de distribuição em baixa tensão – VR01.01-00.12. COSERN, 3ªed., 2016.

DE MORAIS, Adriana Correia et al. ANÁLISE DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EXISTENTES EM USINA FOTOVOLTAICA DE UMA UNIVERSIDADE PÚBLICA DO SEMIÁRIDO POTIGUAR. In: **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2024.

GREEN, M. A. *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 2021.

IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Std 519™-2022, Approved 13 May 2022, published 5 August 2022.

INEL – Instituto Nacional de Energia Limpa. *Manual de Operação e Manutenção de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede*. Brasília: INEL, 2020. Disponível em: <https://inelsolar.org.br>. Acesso em: 24 jul. 2025.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC. *IEC 61724-1: Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurement, data exchange and analysis – Part 1: Monitoring*. Genebra: IEC, 2021.

JORDAN, D. C.; KURTZ, S. R. *Photovoltaic Degradation Rates—An Analytical Review*. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, USA, 2013. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51664.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2025.

MINIPA. Analisador de energia ET-5061C, 2015. Disponível em: . Acesso em: 18 jun. 2015.

BAPTISTA, José. A Distorção Harmônica (Conceitos, causas, efeitos e soluções mitigadoras). 2019.

OLIVEIRA, Giulia de Souza. *A evolução da energia solar e sua contribuição socioambiental no Brasil*. Revista FT, ISSN 1678-0817. Disponível em: revistaft.com.br/a-evolucao-da-energia-solar-e-sua-contribuicao-socioambiental-no-brasil/. Acesso em: 20 jul. 2025.

RODRIGUES, José Arnaldo Lima. Análise do fator de potência de unidades consumidoras com a inserção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. 2023.

SANTIAGO, Gregory Luid Souza. Microgeração solar fotovoltaica conectada à rede: análise da qualidade da energia. 2017. Dissertação (Mestrado em sistemas de comunicação e automação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2017.

TANIGUCHI, Vitor Hugo Slongo. Análise de distorção harmônica em sistema de geração fotovoltaico conectado a rede: estudo de caso USF–Mineirão. 2019.