



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS VINICIUS BORGES DE FRANÇA

PROPOSTA DE PLANO DE MANUTENÇÃO PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Recife
2025

MATHEUS VINICIUS BORGES DE FRANÇA

PROPOSTA DE PLANO DE MANUTENÇÃO PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Zanoni Dueire Lins

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

França , Matheus Vinícius Borges de.

Proposta de plano de manutenção para sistemas fotovoltaicos / Matheus Vinícius Borges de França . - Recife, 2025.

90 : il., tab.

Orientador(a): Zanoni Dueire Lins

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices.

1. Energia Solar. 2. Sistemas Fotovoltaicos. 3. Manutenção. 4. Desempenho. 5. Confiabilidade. I. Lins, Zanoni Dueire. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

MATHEUS VINICIUS BORGES DE FRANÇA

PROPOSTA DE PLANO DE MANUTENÇÃO PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em: 12/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Zanoni Dueire Lins (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Prof. Dr. Eduardo José Barboza (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Eng. M.Sc. Valdemar Moreira Cavalcante Junior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder sabedoria, força e perseverança para chegar até aqui. Sem Sua presença em minha vida, esta conquista não seria possível.

Aos meus pais, Alberto e Marisa, minha eterna gratidão por todo amor, apoio e dedicação. Cada sacrifício feito por vocês foi essencial para que eu pudesse trilhar esse caminho e alcançar mais essa etapa. Espero poder retribuir todo o esforço com orgulho e realizações.

À minha companheira Laura, por estar ao meu lado em todos os momentos, oferecendo carinho, compreensão e incentivo mesmo nas fases mais desafiadoras. Essa vitória também é sua, por todo apoio e paciência ao longo dessa jornada.

Agradeço a todos os meus familiares e amigos, que de alguma forma contribuíram com palavras de incentivo, conselhos e gestos de amizade. Cada demonstração de apoio foi fundamental para que eu continuasse seguindo em frente.

À TR Energia, pela oportunidade de aprendizado e crescimento, e por me permitir desenvolver este trabalho em um ambiente de tanto profissionalismo e colaboração. Agradeço especialmente aos colegas e mentores que compartilharam conhecimento e experiência ao longo desse processo.

Registro também minha gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Zanoni Lins, pela orientação dedicada, pelo comprometimento e por toda a contribuição técnica e acadêmica que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Seu apoio foi fundamental para que este projeto alcançasse o nível desejado.

Encerro este ciclo com o coração cheio de gratidão por todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa trajetória.

RESUMO

A expansão acelerada dos sistemas fotovoltaicos no Brasil e o aumento de sua participação na matriz elétrica nacional tornam cada vez mais necessária a adoção de práticas estruturadas de manutenção que assegurem confiabilidade, desempenho e vida útil prolongada às usinas solares. Em virtude disso, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um plano estratégico de manutenção, fundamentado em normas técnicas e melhores práticas de operação. O principal objetivo é propor um modelo estratégico de manutenção preventiva, preditiva, detectiva e corretiva planejada, capaz de identificar causas de falhas, organizar rotinas operacionais e elevar a eficiência de geração. A metodologia empregada envolve um estudo de caso realizado em três usinas fotovoltaicas de microgeração, no qual foram aplicadas inspeções visuais, medições elétricas e avaliação de dados de monitoramento remoto, além da utilização de ferramentas de gestão da qualidade, como o Diagrama de Ishikawa e o Plano de Ação 5W2H, para estruturar e priorizar intervenções recomendadas. Os resultados revelam características recorrentes associadas à ausência de rotinas de manutenção formalizadas, erros de instalação, acúmulo de sujeira, problemas estruturais e alarmes recorrentes em inversores, indicando que a operação inadequada compromete diretamente o desempenho energético. A discussão evidencia que a adoção de indicadores de desempenho, monitoramento contínuo e práticas preditivas constitui um fator determinante para a redução de perdas de geração e aumento da disponibilidade dos sistemas estudados. Conclui-se que o plano de manutenção proposto apresenta aplicabilidade prática e potencial de replicação em diferentes tipologias de usinas fotovoltaicas, contribuindo para a profissionalização das rotinas de operação e manutenção no setor brasileiro.

Palavras-chave: Energia Solar; Sistemas Fotovoltaicos; Manutenção; Desempenho; Confiabilidade.

ABSTRACT

The accelerated expansion of photovoltaic systems in Brazil and their growing share in the national electricity matrix make it increasingly necessary to adopt structured maintenance practices that ensure reliability, performance, and extended service life for solar power plants. In this context, this work presents the development of a strategic maintenance plan grounded in technical standards and best operational practices. The main objective is to propose a strategic model of preventive, predictive, detective, and planned corrective maintenance capable of identifying failure causes, organizing operational routines, and improving generation efficiency. The methodology involves a case study conducted in three photovoltaic microgeneration plants, in which visual inspections, electrical measurements, and monitoring data evaluations were performed, along with the application of quality management tools such as the Ishikawa Diagram and the 5W2H plan to structure and prioritize recommended interventions. The results reveal recurring failures associated with the absence of formalized maintenance routines, installation errors, accumulation of soiling, structural issues, and repeated inverter alarms, indicating that inadequate operation directly compromises energy performance. The discussion highlights that implementing performance indicators, continuous monitoring, and predictive practices is a determining factor in reducing generation losses and increasing system availability. It is concluded that the proposed maintenance plan demonstrates practical applicability and potential for replication in different types of photovoltaic plants, contributing to the professionalization of operation and maintenance practices in the Brazilian solar sector.

Keywords: Solar Energy; Photovoltaic Systems; Maintenance; Performance; Reliability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1: Comparativo energético das matrizes brasileira e global, base de 2022 ... | 15 |
| Figura 2: Panorama da participação das energias renováveis por país em suas matrizes energéticas, base de 2022..... | 16 |
| Figura 3: Incidência solar no módulo fotovoltaico posicionado no norte geográfico.. | 27 |
| Figura 4: Possibilidades de inclinação dos módulos fotovoltaicos..... | 28 |
| Figura 5: Impacto da inclinação dos módulos fotovoltaicos ao longo das estações.. | 29 |
| Figura 6: Composição padrão de um módulo fotovoltaico monocristalino | 32 |
| Figura 7: Composição de um Sistema On-Grid, conectado à rede elétrica..... | 33 |
| Figura 8: Impacto da sujidade no processo de geração Fotovoltaica..... | 35 |
| Figura 9: Curvas de detalhamento I-V e P-V..... | 37 |
| Figura 10: Diagrama de Ishikawa – 6M's | 42 |
| Figura 11: Aspectos considerados para o preenchimento do Diagrama Ishikawa ... | 44 |
| Figura 12: Ilustração modelo da gestão de prioridades das manutenções definidas | 49 |
| Figura 13: Usina fotovoltaica 01 – Rooftop, Paudalho - PE | 54 |
| Figura 14: Módulo Canadian Solar – CS6W-545MS | 55 |
| Figura 15: Inversor Sungrow – SG110CX..... | 55 |
| Figura 16: Usina fotovoltaica 01 – Solo, Paudalho - PE..... | 56 |
| Figura 17: Inversor Sungrow – SG75CX..... | 56 |
| Figura 18: Usina fotovoltaica 01 – Solo, Gravatá - PE | 57 |
| Figura 19: Módulo Trina Solar – TSM-450NE | 58 |
| Figura 20: Inversor Fronius – FRONIUS ECO 25.0-3-S..... | 58 |
| Figura 21: Principais instrumentos de medição utilizados para a verificação elétrica | 59 |
| Figura 22: Interrupções e anomalias no processo de geração em horário de pico ... | 61 |
| Figura 23: Eventos de falha registrados pelo software de monitoramento..... | 61 |
| Figura 24: Eventos de falha registrados pelo software de monitoramento..... | 61 |
| Figura 25: Recomendações de Processamento do fabricante | 62 |
| Figura 26: Excesso de sujidade nos cabos de alimentação CA..... | 62 |
| Figura 27: Verificação das strings de módulos..... | 63 |
| Figura 28: Verificação do inversor On-Grid da usina fotovoltaica..... | 64 |
| Figura 29: Interrupções e anomalias no processo de geração em horário de pico ... | 65 |

| | |
|---|----|
| Figura 30: Eventos de falha registrados pelo software de monitoramento..... | 66 |
| Figura 31: Excesso de sujidade nos cabos de alimentação CA..... | 66 |
| Figura 32: Verificação das strings de módulos..... | 67 |
| Figura 33: Verificação do inversor On-Grid da usina fotovoltaica..... | 68 |
| Figura 34: Interrupções e anomalias no processo de geração em horário de pico ... | 69 |
| Figura 35: Excesso de sujidade nos cabos de alimentação CA..... | 70 |
| Figura 36 Verificação das strings de módulos..... | 71 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Parâmetros do módulo Canadian Solar – CS6W-545MS..... | 55 |
| Tabela 2: Parâmetros do Inversor Sungrow – SG110CX..... | 55 |
| Tabela 3: Parâmetros do Inversor Sungrow – SG75CX..... | 57 |
| Tabela 4: Parâmetros do módulo Trina Solar – TSM-450NE | 58 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1: Formas de Instalação de Sistemas Fotovoltaicos | 31 |
| Quadro 2: Aspectos de causa dos erros aplicáveis ao Diagrama Ishikawa | 45 |
| Quadro 3: Aspectos gerais do Plano de Ação 5W2H..... | 45 |
| Quadro 4: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Excesso de sujidade nos cabos de alimentação CA | 63 |
| Quadro 5: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Verificação das strings de módulos | 64 |
| Quadro 6: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Verificação do inversor On-Grid da usina fotovoltaica..... | 65 |
| Quadro 7: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Excesso de sujidade nos cabos de alimentação CA | 66 |
| Quadro 8: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Verificação das strings de módulos | 68 |
| Quadro 9: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Verificação do inversor On-Grid da usina fotovoltaica..... | 69 |
| Quadro 10: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Excesso de sujidade nos cabos de alimentação CA | 70 |
| Quadro 11: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Verificação das strings de módulos | 71 |
| Quadro 12: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Refrigeração do inversor On-Grid da usina fotovoltaica..... | 73 |
| Quadro 13: Aspectos do Plano de Ação 5W2H – Time de execução | 79 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|--|
| GW | GigaWatts |
| MW | MegaWatts |
| O&M | Operação e Manutenção |
| SFV | Sistema Fotovoltaico |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| UFV | Usina Fotovoltaica |
| NBR | Norma Brasileira Regulamentadora |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| CRM | Consumo Residencial Médio |
| SIGA | Sistema de Informações de Geração da ANEEL |
| PR | Performance Ratio |
| MPPT | Rastreamento do Ponto de Máxima Potência |
| P&D | Pesquisa e Desenvolvimento |
| CC | Corrente Contínua |
| CA | Corrente Alternada |
| GE | Gases do Efeito Estufa |
| STC | Condições Padrão de Teste |
| Isc | Corrente de Curto Circuito |
| Voc | Tensão de Circuito Aberto |
| Imp | Corrente de Máxima Potência |
| Vmp | Tensão de Máxima Potência |
| MPP | Ponto de Máxima Potência |
| MTBF | Tempo Médio Entre Falhas |
| MTTR | Tempo Médio Para Reparo |
| DPS | Dispositivo de Proteção Contra Surtos |
| NR | Norma Regulamentadora |
| EPI | Equipamento de Proteção Individual |
| PID | Degradação Induzida por Potencial |
| KPIs | Indicadores-Chave de Performance |
| FDI | Fator de Dimensionamento do Inversor |
| IRR | Taxa Interna de Retorno |

| | |
|-----|---|
| BEN | Balanço Energético Nacional |
| kWh | Quilowatt-Hora |
| IEC | Comissão Internacional de Eletrotécnica |

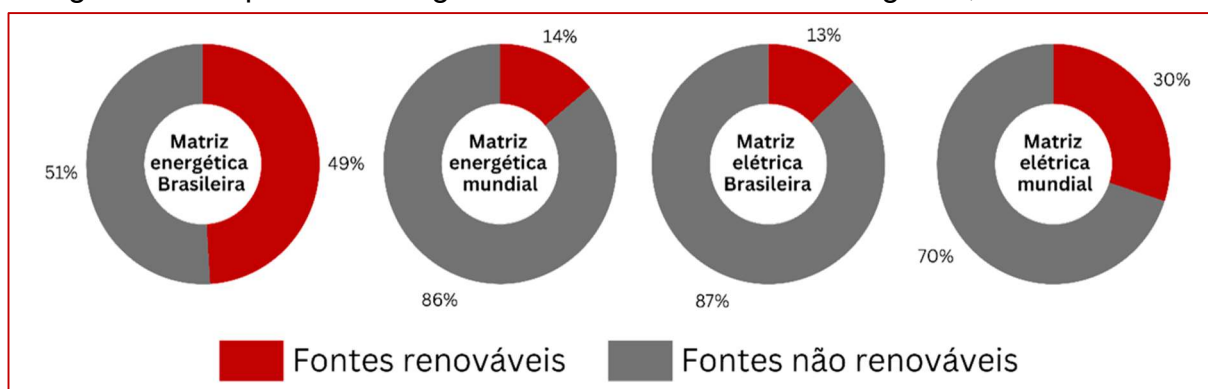
SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 18 |
| 1.1.1 | Geral..... | 18 |
| 1.1.2 | Específicos | 18 |
| 1.2 | METODOLOGIA..... | 19 |
| 1.3 | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO..... | 20 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 22 |
| 2.1 | FONTES RENOVÁVEIS E O PAPEL DA ENERGIA SOLAR NA MATRIZ ELÉTRICA NACIONAL | 22 |
| 2.1.1 | Evolução das fontes renováveis no Brasil | 22 |
| 2.1.2 | Potencial solar da região Nordeste e características técnicas..... | 24 |
| 2.2 | FUNDAMENTOS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS..... | 30 |
| 2.2.1 | Configurações típicas de sistemas fotovoltaicos | 30 |
| 2.3 | PERDAS E DEGRADAÇÕES EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS | 34 |
| 2.3.1 | Tipos de perdas: sombreamento, sujeira, temperatura e falhas elétricas..... | 34 |
| 2.3.2 | Efeitos da degradação natural e fatores de desempenho | 37 |
| 2.4 | FERRAMENTAS DE GESTÃO DA QUALIDADE APLICADAS À MANUTENÇÃO | 40 |
| 2.4.1 | Conceitos de melhoria contínua e eficiência operacional | 40 |
| 2.4.2 | Diagrama de Ishikawa (6M's) | 41 |
| 2.4.3 | Plano de Ação 5W2H | 43 |
| 2.5 | TIPOS E ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS..... | 50 |
| 2.5.1 | Manutenção corretiva, preventiva, preditiva e detectiva | 50 |
| 3 | APLICAÇÃO EM TRÊS USINAS FOTOVOLTAICAS ON-GRID | 54 |
| 3.1 | ANÁLISE DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS INICIAIS | 54 |
| 3.1.1 | Diagnóstico do estudo de caso – Usina Fotovoltaica 01 – Rooftop em Paudalho | 60 |
| 3.1.2 | Diagnóstico do estudo de caso – Usina 02 – Solo em Paudalho | 65 |
| 3.1.3 | Diagnóstico do estudo de caso – Usina 03 – Solo em Gravatá..... | 69 |
| 3.2 | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..... | 73 |
| 3.2.1 | Limitações da pesquisa e perspectivas de aperfeiçoamento..... | 81 |
| 4 | CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE | 82 |
| | REFERÊNCIAS..... | 84 |
| | APÊNDICE A – PLANO DE MANUTENÇÃO PROPOSTO - REV01 | 88 |

1 INTRODUÇÃO

A transformação no setor energético mundial tem promovido a diversificação da matriz elétrica mundial, diminuindo a dependência de combustíveis fósseis e colaborando para a diminuição dos impactos ambientais. O processo de geração solar fotovoltaica vem se consolidando como uma das alternativas renováveis de maior crescimento. No Brasil, esse setor apresenta expansão acelerada, destacando-se pela elevada participação na matriz elétrica, somente em 2022, houve uma participação de 50% na oferta interna de energia renovável, sendo superior em comparação a média mundial que foi de 14% no mesmo ano, o que se complementa em relação aos índices de emissões do setor de energia, como mostrado na Figura 1 [1,32].

Figura 1: Comparativo energético das matrizes brasileira e global, base de 2022



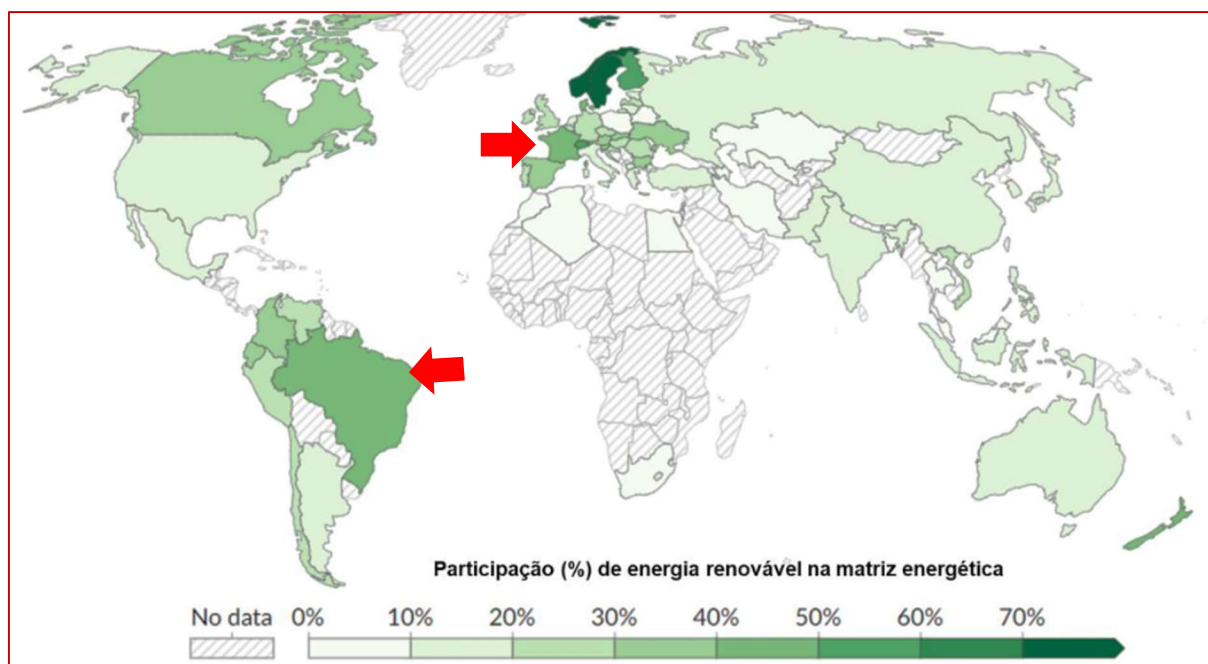
Fonte: Adaptado de [1,32].

Tanto no Brasil quanto na França, por exemplo, apesar das diferenças nos sistemas energéticos, observa-se uma expansão significativa da energia renovável, como mostrado na Figura 2, com destaque na energia fotovoltaica que é impulsionada por políticas de incentivo e pelo progresso tecnológico. É importante pontuar que no Brasil, a capacidade instalada de energia solar alcançou 60 gigawatts (GW) em agosto de 2025, posicionando-se como a segunda fonte mais relevante da matriz elétrica nacional [1,32].

O crescimento acelerado do setor torna imprescindível a adoção de práticas de Operação e Manutenção (O&M) eficientes, assegurando a confiabilidade operacional e prolongamento a vida útil dos sistemas elétricos em operação, ao mesmo tempo em que se reduzem os custos operacionais ainda na fase de execução. A manutenção

adequada permite, ainda, a redução de custos operacionais ao longo do ciclo de vida das usinas, sendo elemento fundamental para a sustentabilidade técnica e econômica desses empreendimentos [1,2].

Figura 2: Panorama da participação das energias renováveis por país em suas matrizes energéticas, base de 2022



Fonte: Adaptado de [1,32].

A O&M de um Sistema Fotovoltaico (SFV) compreende um conjunto contínuo de atividades realizadas após o início da operação da usina, abrangendo o monitoramento do desempenho, a identificação de falhas e a execução de ações de manutenção preventiva, corretiva e, sobretudo, preditiva. A ausência de uma gestão sistematizada dessas práticas pode acelerar a degradação dos componentes, provocar perdas de geração, comprometer a confiabilidade do sistema e elevar significativamente os custos de intervenção [2,3].

Estudos indicam que, em regiões submetidas a condições ambientais severas, como elevadas temperaturas, alta incidência de poeira e regimes irregulares de precipitação, características comuns em grande parte do território nordestino, a negligência quanto à manutenção pode resultar em reduções de desempenho superiores a 20%, afetando diretamente a rentabilidade dos investimentos em geração solar. Dessa forma, torna-se essencial a implementação de estratégias de

manutenção planejadas, capazes de considerar as particularidades ambientais, operacionais e normativas de cada instalação [1-3].

Dessa forma, mesmo com o avanço das técnicas de inspeção, ainda persiste o desafio de determinar quais métodos apresentam maior eficiência detectiva e estrutural. Entre os métodos empregados, encontram-se desde inspeções visuais simples até técnicas avançadas, como eletroluminescência e fotoluminescência em campo, espectroscopia, termografia infravermelha e medições elétricas por meio da análise da curva I-V, que descreve a relação entre a tensão e a corrente de saída de um módulo e/ou um conjunto de módulos (*string*), práticas que potencializam a eficácia na detecção de falhas e na tomada de decisão [3,4].

Diante desse contexto, este trabalho se justifica pela necessidade de desenvolver e estruturar um modelo aplicado de manutenção preventiva, preditiva e corretiva planejada para sistemas fotovoltaicos conectados à rede, com foco na confiabilidade, eficiência operacional e conformidade normativa. A relevância do estudo reside tanto no âmbito acadêmico, ao contribuir para a sistematização do conhecimento técnico, quanto no âmbito prático, ao oferecer subsídios aplicáveis a empresas de O&M e gestores de usinas fotovoltaicas.

Para atender a esse propósito, este estudo adota uma abordagem aplicada, fundamentada na análise de sistemas fotovoltaicos em operação na região Nordeste do Brasil, utilizando normas técnicas e ferramentas de gestão da qualidade como suporte à elaboração de um plano estratégico de manutenção. O desenvolvimento do trabalho contempla a análise do desempenho operacional, a identificação de falhas recorrentes, a proposição de ações de melhoria e a discussão dos resultados obtidos, culminando em conclusões e recomendações técnicas voltadas à otimização da gestão da manutenção em usinas fotovoltaicas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Analisar os principais fatores que impactam a eficiência operacional de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica e desenvolver uma proposta de um plano estratégico de manutenção preventiva, preditiva e corretiva planejada, com base nas normas técnicas NBR 16274, NBR 5410, NBR 14039, Resoluções ANEEL nº 482/2012 e nº 687/2015 e ferramentas de gestão da qualidade, com o intuito de otimizar o desempenho energético e aumentar a confiabilidade e a vida útil dos equipamentos de uma usina fotovoltaica na região Nordeste do Brasil.

1.1.2 Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são os seguintes:

- Diagnosticar os erros operacionais em três usinas fotovoltaicas em operação na região Nordeste, destacando os principais fatores de perda de eficiência e avaliando o desempenho com base no plano de manutenção proposto, considerando aspectos ambientais, elétricos, estruturais e humanos.
- Aplicar as ferramentas de gestão da qualidade como o Diagrama de Ishikawa (6M's) e o Plano de Ação 5W2H, na identificação das causas potenciais de limitantes e definir ações detectivas, preventivas, preditivas e/ou corretivas planejadas.
- Elaborar um plano de manutenção estratégico e sistematizado, contendo as etapas de detecção, análise, execução, documentação e recomendações para estudos futuros, alinhado às recomendações normativas conforme a NBR 16274, NBR 5410, NBR 14039 e Resoluções ANEEL nº 482/2012 e nº 687/2015.

1.2 Metodologia

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e descritiva, desenvolvido por meio de estudo de caso em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, localizados na região Nordeste do Brasil. O trabalho tem como foco a análise da eficiência operacional e a estruturação de um plano estratégico de manutenção preventiva, preditiva e corretiva planejada.

O objeto de estudo compreende três usinas fotovoltaicas de geração distribuída, sendo duas instaladas em solo e uma do tipo *rooftop*, todas com estruturas fixas. As usinas foram selecionadas a partir de critérios operacionais previamente definidos pela empresa responsável pela operação e manutenção, considerando histórico de falhas recorrentes, redução de desempenho energético e aumento da incidência de intervenções corretivas.

O procedimento metodológico foi estruturado em três etapas principais: (i) diagnóstico técnico dos sistemas fotovoltaicos, (ii) aplicação de ferramentas de gestão da qualidade para identificação de causas e definição de ações de manutenção e (iii) elaboração de um plano estratégico e sistematizado de manutenção. As análises foram fundamentadas em inspeções técnicas, dados de monitoramento operacional e medições elétricas, em consonância com as normas técnicas vigentes e recomendações de fabricantes.

As ferramentas de gestão da qualidade utilizadas incluem o Diagrama de Ishikawa (6M's), para identificação das causas potenciais de falhas, e o Plano de Ação 5W2H, para a organização e sistematização das ações de manutenção. O plano de manutenção proposto foi elaborado em conformidade com as normas NBR 16274, NBR 5410, NBR 14039 e com as Resoluções ANEEL nº 482/2012 e nº 687/2015, visando assegurar confiabilidade operacional, eficiência energética e aumento da vida útil dos sistemas analisados.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos, com a finalidade de atingir os objetivos propostos, conforme descrito a seguir.

A seção 2.1 aborda a inserção das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, com destaque para a energia solar fotovoltaica e sua crescente participação no país, apresentando a evolução da geração renovável, o potencial solar da região Nordeste e os principais aspectos técnicos e operacionais dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede, incluindo parâmetros de desempenho, perdas e funcionamento dos inversores, contextualizando a relevância da tecnologia no cenário energético nacional.

A seção 2.2, apresenta os fundamentos dos sistemas fotovoltaicos, abordando o princípio do efeito fotovoltaico, os principais componentes e o funcionamento dos sistemas de geração de energia solar, onde são descritas as configurações típicas de sistemas fotovoltaicos, considerando o grau de interação com a rede elétrica e o uso de armazenamento, bem como as diferentes formas de instalação e suas vantagens e limitações.

A seção 2.3 aborda os principais mecanismos de perdas e degradação que afetam o desempenho de sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo, destacando fatores ambientais, térmicos, elétricos e mecânicos. São discutidos os impactos do sombreamento, da sujeira, da temperatura e das falhas elétricas, bem como os efeitos da degradação natural dos componentes sobre a eficiência energética.

A seção 2.4 apresenta a aplicação de ferramentas de gestão da qualidade no planejamento e na execução da manutenção de sistemas fotovoltaicos, com foco na melhoria contínua e na eficiência operacional. São discutidos métodos estruturados de diagnóstico e organização das ações de manutenção, destacando-se o Diagrama de Ishikawa (6M's) para identificação das causas de falhas e o Plano de Ação 5W2H para definição, priorização e controle das atividades preventivas, preditivas e corretivas.

Por fim, a seção 2.5 discute os principais tipos e estratégias de manutenção aplicáveis a sistemas fotovoltaicos, abordando as modalidades corretiva, preventiva, preditiva e detectiva, enfatizando a importância da manutenção como elemento

estratégico para garantir a disponibilidade, a segurança e a eficiência operacional das instalações, considerando o elevado investimento inicial e a necessidade de continuidade da geração. São apresentados os conceitos, objetivos e aplicações práticas de cada estratégia, bem como a utilização de indicadores de desempenho para o monitoramento da confiabilidade e da eficácia das ações de operação e manutenção ao longo do ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os projetos, instalação e manutenção de SFV on-grid têm evoluído bastante desde a publicação da Resolução normativa 482/2012 da ANEEL. Isso tem proporcionado vários estudos que possibilitam otimizar e consolidar esta fonte energética na geração distribuída. Dentre os principais desafios e dificuldades, destacam-se a intensidade e variação da luz solar, a manutenção, o armazenamento de energia, os requisitos de instalação e regulamentação, os custos iniciais e a sobrecarga da rede.

2.1 FONTES RENOVÁVEIS E O PAPEL DA ENERGIA SOLAR NA MATRIZ ELÉTRICA NACIONAL

As fontes renováveis têm se consolidado como pilares da transição energética mundial, e no Brasil, a energia solar fotovoltaica destaca-se pelo elevado potencial de aproveitamento e pela crescente participação na matriz elétrica nacional. Favorecido por condições climáticas privilegiadas e avanços tecnológicos que reduziram custos de geração, o país tem expandido significativamente a capacidade instalada de SFV de micro e minigeração distribuída. Essa expansão contribui para a diversificação da matriz, a redução das emissões de gases do efeito estufa (GE) e o fortalecimento da segurança energética, posicionando a energia solar como elemento estratégico no desenvolvimento sustentável e no futuro energético brasileiro.

2.1.1 Evolução das fontes renováveis no Brasil

O Balanço Energético Nacional (BEN) de 2024 indica que a matriz energética brasileira ampliou a presença de fontes renováveis, alcançando 49,1% do total. Esse resultado decorre, principalmente, da expansão da biomassa e do avanço das fontes eólica e solar. Em contraste, o panorama mundial ainda apresenta participação significativamente inferior, com as renováveis representando cerca de 15% da matriz global. Embora a energia solar ainda ocupe uma fração modesta no contexto brasileiro, verifica-se uma trajetória de crescimento acelerado, tendência observada

tanto no país quanto internacionalmente, impulsionada pelos benefícios ambientais, econômicos e sociais associados a essa modalidade de geração [6].

Nos últimos anos, o crescimento da geração distribuída decorre, em grande parte, do aumento contínuo das tarifas de energia elétrica, o que incentiva consumidores residenciais, comerciais e industriais a buscarem alternativas capazes de mitigar seus custos tarifários. A partir das regulamentações da ANEEL, que estabeleceram o sistema de compensação de energia, a geração distribuída por fonte solar passou a constituir uma opção tecnicamente consolidada, permitindo menor dependência da rede elétrica tradicional e ampliando a viabilidade econômica e a autonomia energética dos usuários. [6,7].

Entretanto, ainda que haja avanços no uso de fontes renováveis, a demanda por energia continua a crescer, sobretudo em nações em desenvolvimento, o que pode agravar os impactos associados às mudanças climáticas. No contexto brasileiro, persistem dificuldades para suprir o aumento populacional e econômico de maneira ambientalmente responsável. Assim, a transição energética precisa ocorrer de forma gradual e equilibrada, articulando a expansão de matrizes limpas com a contenção das emissões de GE e a estabilidade climática global [7].

É relevante observar que em 2004 e 2023, o consumo de energia elétrica no segmento residencial brasileiro apresentou uma expansão média anual em torno de 4%. Esse avanço está associado à melhora das condições socioeconômicas da população e à ampliação do uso de aparelhos eletrodomésticos. Nesse intervalo, a representatividade das residências no consumo nacional de energia passou de cerca de 30% para aproximadamente 50% [7,8].

Destaca-se, ainda, o crescimento do Consumo Residencial Médio (CRM) nas regiões Nordeste e Norte, que registraram elevação próxima de 40%. No mesmo período, o setor comercial apresentou aumento médio de 3,7% ao ano, alcançando seu maior ritmo de expansão entre 2004 e 2014, quando atingiu 6,1% anuais. Em contraste, o setor industrial acumulou crescimento de cerca de 21% entre 2004 e 2024, embora sua evolução tenha sido mais modesta quando comparada às demais classes consumidoras. [8].

2.1.2 Potencial solar da região Nordeste e características técnicas

A Região Nordeste do Brasil destaca-se como uma das áreas mais favoráveis do território nacional para a exploração da energia solar fotovoltaica, em função de suas características geográficas, climáticas e meteorológicas. Situada majoritariamente em baixas latitudes, próximas à linha do Equador, a região apresenta elevada incidência de radiação solar ao longo de todo o ano, com reduzida variabilidade sazonal quando comparada às regiões Sul e Sudeste do país [1-5].

De acordo com dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar, elaborado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em parceria com o CRESESB, os valores médios de irradiância global horizontal (GHI) na Região Nordeste variam, em grande parte do território, entre 5,5 e 6,5 kWh/m²/dia, superando significativamente a média observada em diversas regiões da Europa, onde a energia fotovoltaica já se encontra amplamente consolidada. Estados como Piauí, Bahia, Ceará e Pernambuco apresentam alguns dos maiores índices de irradiação solar do país, o que reforça o caráter estratégico da região para a implantação de sistemas fotovoltaicos de diferentes portes [2-5].

Outro fator relevante é a predominância de condições climáticas caracterizadas por baixos índices de nebulosidade, especialmente no semiárido nordestino. A elevada frequência de céu claro contribui para uma maior constância na disponibilidade do recurso solar ao longo do ano, reduzindo oscilações significativas na geração de energia e proporcionando maior previsibilidade operacional aos sistemas fotovoltaicos. Embora a intensa radiação solar esteja associada a condições climáticas adversas, como períodos prolongados de seca, essa mesma característica representa uma oportunidade técnica para o aproveitamento energético sustentável da região [4-7].

Em comparação com outras regiões brasileiras, o Nordeste apresenta vantagens expressivas em termos de potencial solar. Enquanto áreas do Sul e Sudeste sofrem maior influência de frentes frias, maior cobertura de nuvens e variações sazonais mais acentuadas, o Nordeste mantém níveis elevados de irradiância durante a maior parte do ano. Essa condição favorece maiores fatores de capacidade para usinas fotovoltaicas, refletindo-se em maior produção anual de energia por unidade de potência instalada [8-9].

Do ponto de vista técnico e econômico, o elevado potencial solar da Região Nordeste contribui diretamente para a redução do custo nivelado da energia (LCOE) e para o aumento da atratividade de investimentos em geração fotovoltaica, tanto em sistemas centralizados quanto em projetos de geração distribuída. Dessa forma, o expressivo potencial solar regional justifica a relevância de estudos voltados à análise do desempenho e da eficiência operacional de sistemas fotovoltaicos implantados nesse contexto geográfico [5-9].

Diante desse contexto, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede operam nacionalmente em conformidade com a Resolução Normativa nº 1.000/2021 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Nessa configuração, a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos é utilizada prioritariamente para suprir a demanda local e, quando há excedente, é injetada na rede de distribuição, possibilitando a compensação posterior do consumo. Esses sistemas são constituídos, essencialmente, por módulos fotovoltaicos, inversores e medidores bidirecionais, apresentando vantagens associadas ao custo-benefício e à contribuição ambiental, embora dependam da infraestrutura da rede elétrica convencional [9].

No processo de conversão da energia solar em eletricidade, uma parcela da irradiância incidente sobre os módulos não é transformada em energia útil, em razão das perdas inerentes aos materiais e aos componentes do sistema. Dessa forma, a estimativa do desempenho energético de um sistema fotovoltaico exige a consideração de parâmetros técnicos como o rendimento dos módulos, que, nos equipamentos comerciais à base de silício cristalino, pode atingir valores superiores a 20% [10].

A orientação e a inclinação dos módulos fotovoltaicos exercem influência direta sobre a quantidade de radiação solar captada ao longo do dia e das estações do ano. No hemisfério sul, a orientação ideal dos módulos é voltada para o norte geográfico, de modo a maximizar a incidência da radiação solar ao longo do ano. Estruturas orientadas para o leste tendem a favorecer a geração nas primeiras horas do dia, enquanto aquelas voltadas para o oeste apresentam maior produção no período da tarde. Em sistemas com inclinação fixa, torna-se essencial a definição de um ângulo que represente um compromisso entre o desempenho energético nas diferentes estações, sendo comum a adoção de valores próximos à latitude local [9,10,11].

Um indicador amplamente utilizado para a avaliação do desempenho de sistemas fotovoltaicos é o *Performance Ratio* (PR), que representa a razão entre a energia efetivamente produzida pelo sistema e a energia que seria gerada em condições ideais de operação. Por não depender diretamente da irradiância do local, conforme a Equação 1, em concordância com a Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC) Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 61724:2021.

$$PR = \frac{\sum_i E_{ca,i}}{\sum_i P_{nom} \cdot \left(\frac{G_{ti}}{G_0}\right)} \quad (1)$$

Onde é definida a razão da eficiência, sendo a razão entre $E_{ca,i}$ (geração pelo inversor) e G_{ti} (irradiância no plano dos módulos em período i) mostra a eficiência real do sistema, e a razão entre P_{nom} (potência nominal dos módulos fotovoltaicos) e G_0 (irradiância em condições padrões de teste – STC) representa a eficiência teórica [12,13,38]. O PR reflete de forma mais fiel a eficiência operacional do arranjo fotovoltaico. Diversos fatores influenciam esse índice, incluindo a temperatura de operação dos módulos, as perdas resistivas nos condutores, o rendimento dos inversores, o acúmulo de sujeira sobre os módulos, o sombreamento e o desbalanceamento elétrico entre módulos conectados em uma mesma *string*. [10,11].

A incompatibilidade de desempenho entre módulos fotovoltaicos instalados em uma mesma *string*, conhecida como *mismatch*, constitui uma fonte relevante de perdas energéticas. Embora os módulos possuam a mesma potência nominal, variações de fabricação e processos de degradação não uniformes ao longo do tempo fazem com que módulos com menor desempenho limitem a produção do conjunto. Esse efeito tende a se intensificar ao longo da vida útil do sistema, tornando-se um aspecto importante a ser considerado nas etapas de projeto e operação [10-12].

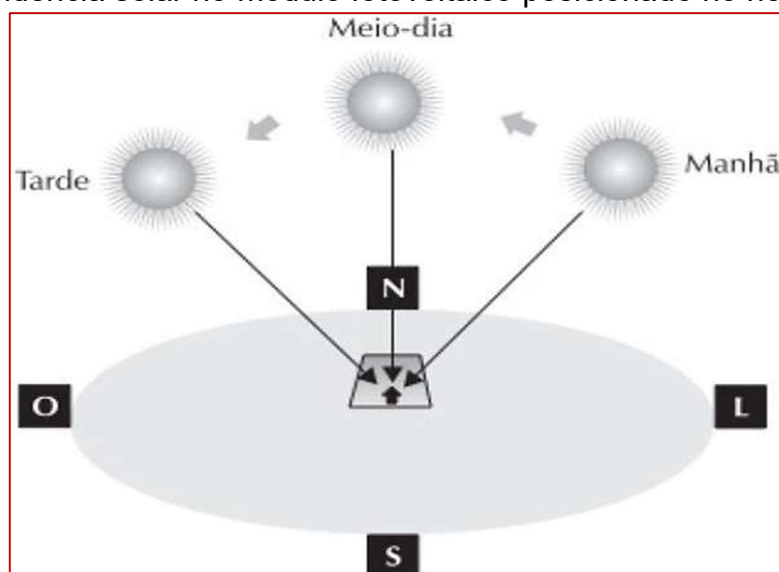
Os inversores *string* desempenham papel fundamental na eficiência global do sistema fotovoltaico, uma vez que são responsáveis pela conversão da corrente contínua em corrente alternada e pelo rastreamento do ponto de máxima potência por meio de algoritmos de MPPT (Maximum Power Point Tracking). Esses algoritmos ajustam continuamente as condições de operação do sistema para extrair a máxima potência disponível dos módulos, mesmo diante de variações de irradiância e

temperatura, contribuindo para a mitigação de perdas e para a melhoria do desempenho energético [12].

Nas fases de planejamento, implantação e operação de uma usina fotovoltaica, é possível identificar uma cadeia de valor composta por etapas interdependentes. Inicialmente, destaca-se o desenvolvimento do projeto, no qual são definidos parâmetros como a capacidade instalada, o local de implantação e os requisitos técnicos. Em seguida, ocorre a aquisição e instalação dos componentes, culminando no comissionamento e no início da operação. Ao longo de todo o ciclo de vida do sistema, atividades transversais, como monitoramento contínuo e ações de pesquisa e desenvolvimento, contribuem para a otimização do desempenho e para a consolidação da tecnologia fotovoltaica no país [10].

É importante destacar que no hemisfério sul, considera-se que o ângulo azimutal é igual a zero quando o Sol se encontra alinhado ao norte geográfico durante o meio-dia solar. Esse ângulo se altera ao longo do dia, acompanhando o deslocamento aparente do Sol, do nascente ao poente, o que influencia diretamente o desempenho da captação energética pelos módulos fotovoltaicos. Para maximizar a incidência de radiação solar, a orientação dos módulos deve levar em conta esse movimento aparente: estruturas voltadas para o leste tendem a apresentar maior geração nas primeiras horas do dia, enquanto aquelas direcionadas para o oeste registram melhor desempenho no período da tarde, conforme a Figura 3 [37].

Figura 3: Incidência solar no módulo fotovoltaico posicionado no norte geográfico



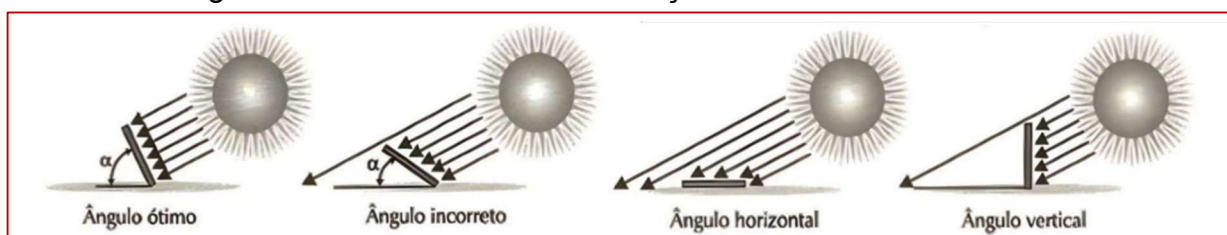
Fonte: Adaptado de [37].

Nesse sentido, a eficiência geral de um SFV, além do custo por quilowatt-hora (kWh) produzido, constitui um parâmetro central para a comparação entre diferentes tecnologias. Esse desempenho está diretamente relacionado a dois fatores principais: (I) a capacidade de conversão das células solares, considerando que parte da radiação incidente é perdida antes de se transformar em energia elétrica; e (II) a *string* dos módulos, o qual é condicionado por elementos como orientação, ângulo de inclinação e possíveis áreas de sombreamento [13,37].

Nesse cenário, observa-se que grande parte dos SFV operam com ângulo de inclinação fixo. Por esse motivo, torna-se essencial estabelecer esse parâmetro seguindo critérios técnicos que permitam maximizar a geração de energia ao longo de todo o ano, considerando as variações sazonais dos ângulos de incidência solar [13,37], conforme a Figura 4, tem-se:

- Ângulo Ótimo: Correspondente à inclinação na qual os raios solares incidem perpendicularmente sobre a superfície do módulo, maximizando a captação da radiação solar direta.
- Ângulo Reduzido: Quando a inclinação é inferior ao ideal, parte da radiação solar deixa de incidir diretamente sobre o módulo, reduzindo a eficiência do sistema.
- Ângulo Horizontal: Resulta em menor captação de energia nos meses de inverno, devido à menor altura solar, e em maximização da geração nos meses de verão.
- Ângulo Vertical: Favorece a produção energética no inverno e reduz a captação nos meses de verão.

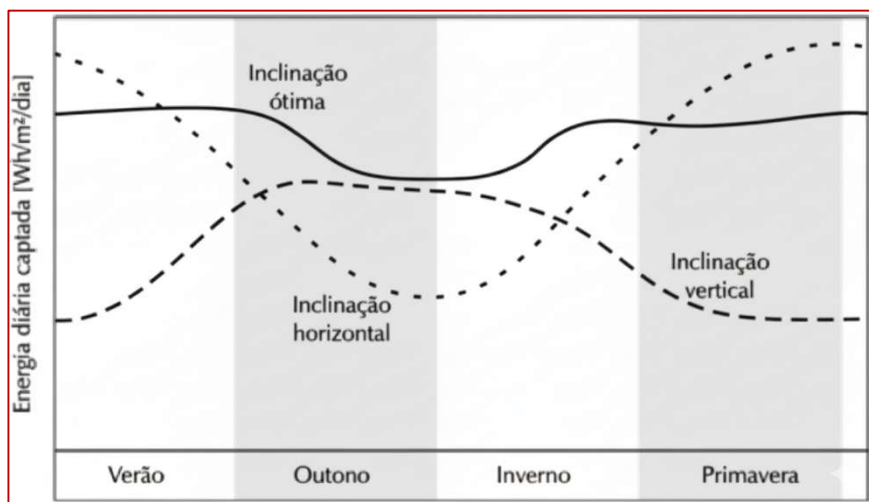
Figura 4: Possibilidades de inclinação dos módulos fotovoltaicos



Fonte: Adaptado de [37].

Dado que os SFV com inclinação fixa não possibilitam a maximização contínua da captação solar ao longo do ano, a escolha do ângulo deve ser feita considerando um equilíbrio que permita uma produção energética satisfatória em diferentes estações, aproximando o valor de inclinação ideal ao valor da latitude da região ($\sim 10^\circ$) conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Impacto da inclinação dos módulos fotovoltaicos ao longo das estações



Fonte: Adaptado de [37].

A diferença de desempenho entre módulos fotovoltaicos instalados em uma mesma *string* é um aspecto que deve ser previsto na etapa de dimensionamento do sistema. Embora os módulos apresentem a mesma potência nominal, cada unidade possui uma potência efetiva própria, o que faz com que aqueles com menor capacidade real limitem a produção de energia do arranjo. No contexto brasileiro, a certificação do INMETRO permite que a potência nominal declarada apresente variação de -5% a $+10\%$ [13].

De forma paralela, ações de caráter transversal, como captação de recursos financeiros e iniciativas de pesquisa e desenvolvimento (P&D), podem ocorrer ao longo de todo o ciclo de implantação, contribuindo para a inovação e o aprimoramento contínuo da infraestrutura fotovoltaica [10,14]. Apesar do setor ainda estar em processo de consolidação no país, sua rápida expansão tem ampliado as possibilidades de investimento e estimulado a criação de soluções tecnológicas, sobretudo impulsionadas por startups e iniciativas empreendedoras comprometidas com a transição energética [7,10].

2.2 FUNDAMENTOS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O SFV tem como princípio fundamental a conversão direta da energia solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico, fenômeno físico no qual a luz solar incidente sobre materiais semicondutores gera corrente elétrica. Composto basicamente por módulos fotovoltaicos, inversores, estruturas de fixação e sistemas de proteção, esse tipo de instalação apresenta versatilidade e pode ser aplicado em diferentes escalas, desde pequenas residências até grandes usinas de geração. A compreensão de seus componentes, funcionamento e critérios de dimensionamento é essencial para garantir eficiência, segurança e desempenho contínuo, tornando-se um dos pilares tecnológicos da transição energética e da expansão das fontes renováveis no Brasil.

2.2.1 Configurações típicas de sistemas fotovoltaicos

No contexto da UFV on-grid, a classificação pode ser realizada considerando-se dois aspectos principais como a utilização ou não de dispositivos de armazenamento de energia e o grau de interação estabelecido entre o sistema gerador e a rede pública de distribuição [15,16]. As principais categorias são descritas a seguir:

- *On-Grid Sem Armazenamento (Convencional)*: A energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos é consumida de forma imediata, e o excedente é injetado na rede de distribuição, gerando créditos de energia conforme o sistema de compensação vigente. Apresenta menor custo inicial de implantação e depende integralmente da rede elétrica da concessionária, sendo indicada para locais com fornecimento estável e confiável.
- *On-Grid com Armazenamento*: Incorpora baterias de armazenamento, que permitem guardar parte da energia gerada durante o período de insolação. Durante o dia, a energia solar supre o consumo e carrega as baterias, podendo ainda injetar o excedente na rede. Em casos de interrupção no fornecimento elétrico, o sistema pode manter o funcionamento parcial, dependendo da configuração do inversor. Embora apresente maior investimento inicial devido ao custo das baterias, é

indicada para regiões com instabilidade na rede elétrica ou para usuários que buscam maior autonomia energética.

- **Grid-Zero:** Caracteriza-se pela maximização do autoconsumo da energia gerada, sem injeção na rede elétrica. A energia solar é utilizada diretamente ou armazenada em baterias, enquanto a rede pública atua apenas como suporte complementar. Esse sistema é vantajoso em locais onde não há incentivo para injetar energia na rede, ou onde há restrições regulatórias. Entre seus benefícios estão o controle aprimorado sobre o uso da energia gerada e a redução de custos com tarifas e créditos de compensação.
- **Off-Grid:** Trata-se de um sistema totalmente independente da rede elétrica pública, sendo necessária a utilização de baterias para assegurar o fornecimento contínuo de energia. É amplamente empregado em áreas isoladas ou rurais, onde não há acesso à rede convencional, e sua eficiência depende de um dimensionamento adequado do banco de baterias e dos inversores.

Em relação as diferentes formas de instalação [17,18], o Quadro 1 revela as vantagens e desvantagens para cada tipo.

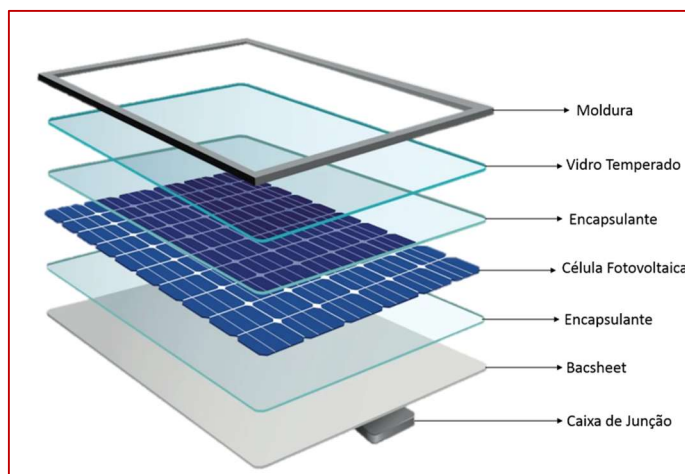
Quadro 1: Formas de Instalação de Sistemas Fotovoltaicos

| TIPOS | VANTAGENS | DESVANTAGENS |
|---|---|--|
| Instalação em Solo: os módulos são montados em estruturas fixadas diretamente no solo. | 1 - Flexibilidade na orientação e inclinação para maximizar a eficiência. 2 - Ideal para projetos de grande escala. 3 - Fácil acesso para manutenção. | 1 - Requer mais espaço disponível. 2 - Pode demandar maior custo de instalação devido à infraestrutura. 3 - Pode ter sombreamento por vegetação ou edificações próximas. |
| Instalação em telhado Inclinado: os módulos são instalados sobre telhados inclinados, geralmente residenciais ou comerciais. | 1 - Aproveita o espaço inutilizado do telhado. 2 - Menor impacto visual. 3 - Custos mais baixos comparados à instalação no solo. | 1 - Limitado pela orientação e inclinação do telhado. 2 - Acessibilidade reduzida para manutenção. 3 - Pode exigir reforço estrutural em telhados antigos ou frágeis. |
| Instalação em telhado Plano: os módulos são instalados em suportes ajustáveis sobre telhados planos, comuns em edifícios comerciais. | 1 - Permite ajustar a inclinação para otimizar a captação solar. 2 - Ideal para grandes áreas planas, maximizando a geração de energia. 3 - Fácil de instalar e manter. | 1 - Estruturas ajustáveis aumentam o custo inicial. 2 - Pode acumular sujeira e exigir - limpezas frequentes. |
| Carport: os módulos são instalados como cobertura de vagas de estacionamento. | 1 - Gera energia enquanto protege veículos de sol e chuva. 2 - Uso eficiente de espaços já existentes. 3 - Alta visibilidade para promover sustentabilidade. | 1 - Custo de infraestrutura elevado. 2 - Requer espaço amplo para ser viável. 3 - Complexidade na instalação elétrica. |
| Fachadas e estruturas integradas: módulos instalados verticalmente em fachadas ou incorporados em edificações. | 1 - Design moderno e integrado ao projeto arquitetônico. 2 - Utiliza áreas pouco usuais para geração de energia. 3 - Pode fornecer sombreamento e isolamento térmico. | 1 - Baixa eficiência devido ao ângulo desfavorável para captação solar. 2 - Custo mais alto por ser personalizado. |

Fonte: Adaptado de [17,18].

Na geração de energia, os principais componentes de uma UFV desempenham papéis complementares para garantir a conversão eficiente da radiação solar em eletricidade utilizável. Inicialmente, os módulos fotovoltaicos, ilustrado na Figura 6, captam a luz solar e a transformam em energia elétrica em corrente contínua (CC).

Figura 6: Composição padrão de um módulo fotovoltaico monocristalino



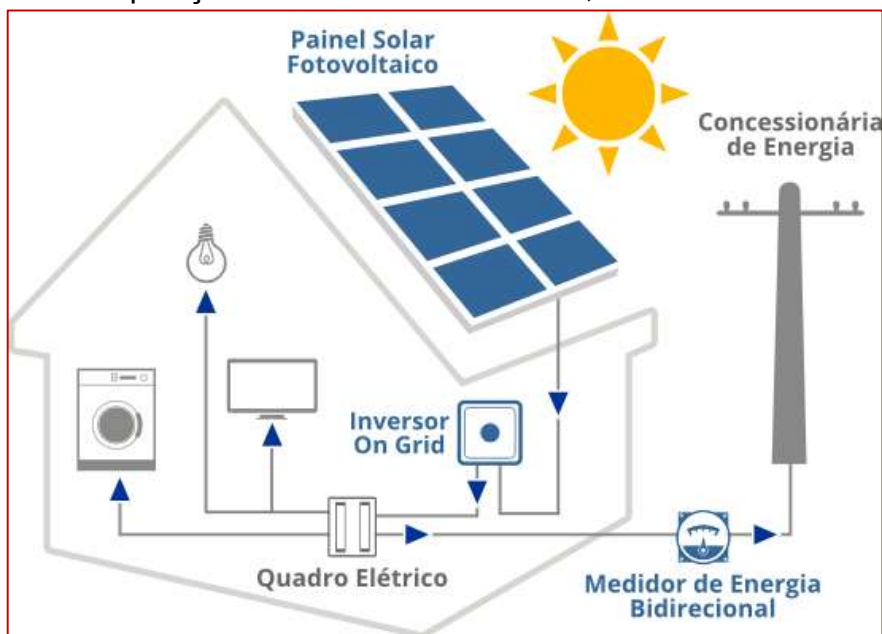
Fonte: Adaptado de [37].

Após a geração, o inversor é responsável por transformar a corrente CC em corrente alternada (CA) e ajustá-la ao padrão da rede elétrica, permitindo sua utilização imediata pela instalação. Nos momentos em que não há irradiação solar suficiente, como à noite ou em dias excessivamente nublados, o abastecimento da instalação ocorre automaticamente pela rede elétrica [19]. Os principais componentes que integram o sistema fotovoltaico de geração são, conforme a Figura 7:

1. Módulos fotovoltaicos: Responsáveis pela conversão da luz solar em energia elétrica de corrente contínua (CC);
2. Inversor: Realiza a conversão CC-CA, compatível com a rede elétrica, além de garantir a sincronização entre ambas;
3. Medidor de energia bidirecional: Registra tanto a energia consumida da rede quanto a energia injetada pelo SFV, permitindo o balanço energético e o controle de créditos;
4. Quadro de proteção: Assegura a integridade do sistema, protegendo-o contra surtos elétricos, curtos-circuitos e outras anomalias;

5. Estrutura de fixação: Sustenta os módulos fotovoltaicos, podendo ser instalada em coberturas, fachadas ou no solo, de acordo com o projeto e a orientação solar ideal.

Figura 7: Composição de um Sistema On-Grid, conectado à rede elétrica



Fonte: Adaptado de [37].

2.3 PERDAS E DEGRADAÇÕES EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A operação eficiente de sistemas fotovoltaicos está diretamente associada à adoção de práticas adequadas de manutenção e monitoramento de desempenho. Ao longo do tempo, diversos fatores ambientais, elétricos e mecânicos podem comprometer a eficiência do sistema, tornando imprescindível a implementação de rotinas sistemáticas de inspeção, diagnóstico e correção de falhas. Nesse contexto, a manutenção assume papel estratégico na mitigação de perdas energéticas e na garantia da confiabilidade operacional das instalações fotovoltaicas.

2.3.1 Tipos de perdas: sombreamento, sujeira, temperatura e falhas elétricas

O desenvolvimento de projetos, bem como os processos de instalação e manutenção de SFV on-grid, tem evoluído de forma significativa desde a promulgação da Resolução Normativa nº 482. Esse progresso tem ampliado as possibilidades de pesquisa voltadas à melhoria do desempenho e à consolidação da energia solar fotovoltaica como uma alternativa de geração distribuída [17,18,19].

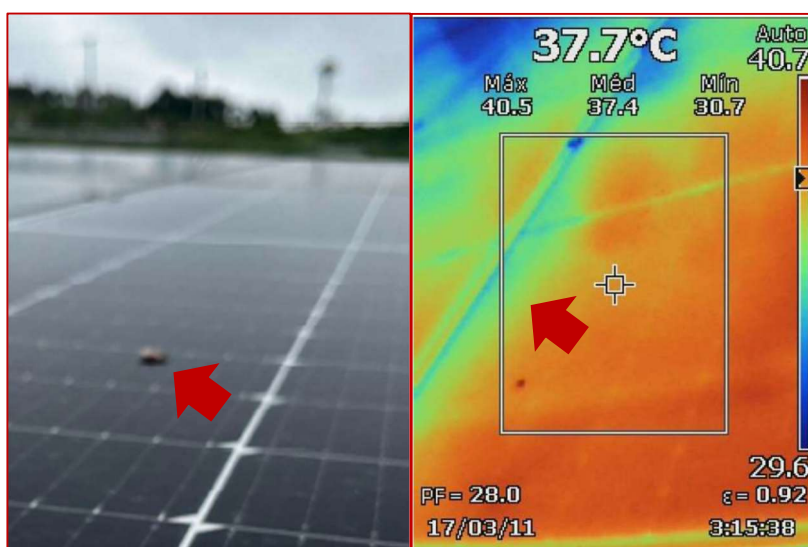
Entre os desafios mais relevantes associados a essa tecnologia destacam-se a variabilidade e a intensidade da radiação solar, as demandas de manutenção, as limitações relacionadas ao armazenamento de energia, os requisitos normativos e construtivos para a instalação, além dos elevados custos iniciais e do potencial de sobrecarga sobre a rede elétrica [18,19].

Nesse sentido, a natureza dos depósitos acumulados sobre os módulos fotovoltaicos varia conforme as características ambientais de cada localidade, podendo incluir partículas do solo, como argila, silte e areia, resíduos de materiais de construção, cinzas, carbono, minerais, além de detritos e compostos orgânicos provenientes de excrementos de aves, lama e outros poluentes. Esse acúmulo compromete de forma expressiva o rendimento do sistema, sobretudo em razão da conexão em série dos módulos, fazendo com que a redução de desempenho em um único módulo afete toda a string [20].

Em regiões de clima seco, como o Nordeste brasileiro, recomenda-se a realização de higienização em intervalos mais curtos, uma vez que a baixa frequência de chuvas favorece o acúmulo de partículas sobre a superfície dos módulos. Em áreas

com elevado índice pluviométrico, a própria chuva pode desempenhar papel relevante na remoção natural de resíduos, reduzindo perdas associadas à sujeira, como evidenciado na Figura 8. Em sistemas de pequeno porte, são comuns procedimentos manuais de limpeza, enquanto empreendimentos de maior escala utilizam, em geral, jatos de água sob pressão combinados com escovação, técnica que apresenta boa eficiência e custo relativamente baixo. [17-20].

Figura 8: Impacto da sujeira no processo de geração Fotovoltaica



Fonte: Adaptado de [38].

Nesse contexto, o fenômeno conhecido como *soiling*, caracterizado pelo acúmulo de partículas e sujeira sobre a superfície dos módulos fotovoltaicos, constitui um fator relevante de perda de desempenho energético. Onde, a presença de sujeira visível indica a necessidade imediata de higienização, uma vez que mesmo pequenas camadas de poeira podem comprometer a eficiência do sistema, ocasionando perdas aproximadas de 5%, podendo superar 20% em situações de depósito excessivo [23,24].

A acumulação de partículas sobre a superfície dos módulos fotovoltaicos reduz a radiação solar que chega efetivamente às células, resultando em queda no desempenho de conversão de energia. Esse efeito é apontado como um dos principais agentes ambientais que influenciam a produção de energia, sendo superado apenas pela intensidade da radiação incidente e pelas variações térmicas. A diminuição da eficiência ocorre porque os depósitos de sujeira funcionam como uma “barreira física” à entrada de fótons [11,12,23].

É importante ressaltar que além da sujeira, diferentes formas de degradação podem afetar a produção elétrica dos sistemas fotovoltaicos, incluindo a umidade nos componentes, o desgaste térmico, a corrosão de elementos metálicos e a degradação natural das células fotovoltaicas. Esses processos tendem a reduzir progressivamente a eficiência do sistema ao longo do tempo, tornando essencial a realização de inspeções periódicas e a adoção de ações preventivas e corretivas [20].

As conexões elétricas, abrangendo cabos, terminais, conectores e inversores, exercem influência direta no rendimento global do sistema fotovoltaico. Falhas de contato, elevação da resistência elétrica e pontos de aquecimento podem resultar em perdas energéticas significativas, além de comprometer a estabilidade operacional do sistema, podendo culminar em interrupções completas do funcionamento. Nos sistemas dotados de rastreadores solares, responsáveis por ajustar a orientação dos módulos para maximizar a captação da irradiância, a manutenção da estrutura mecânica torna-se igualmente imprescindível. Isso envolve a verificação de suportes, mecanismos de movimentação e motores, assegurando o correto funcionamento do sistema de rastreamento e evitando perdas associadas a desalinhamentos ou falhas mecânicas. [21].

Adicionalmente, a eficiência de SFV está diretamente associada ao emprego de tecnologias que favoreçam o desempenho operacional, a segurança da geração e a execução de práticas de manutenção adequadas. Nesse cenário, a manutenção preventiva assume papel central, contemplando um conjunto de procedimentos essenciais, tais como a limpeza periódica dos módulos, a verificação sistemática do ângulo de inclinação, o monitoramento contínuo das variáveis elétricas, a análise das curvas de desempenho e de geração de cada módulo e a detecção de anomalias térmicas, como pontos quentes, por meio de termografia, entre outras ações recomendadas [22].

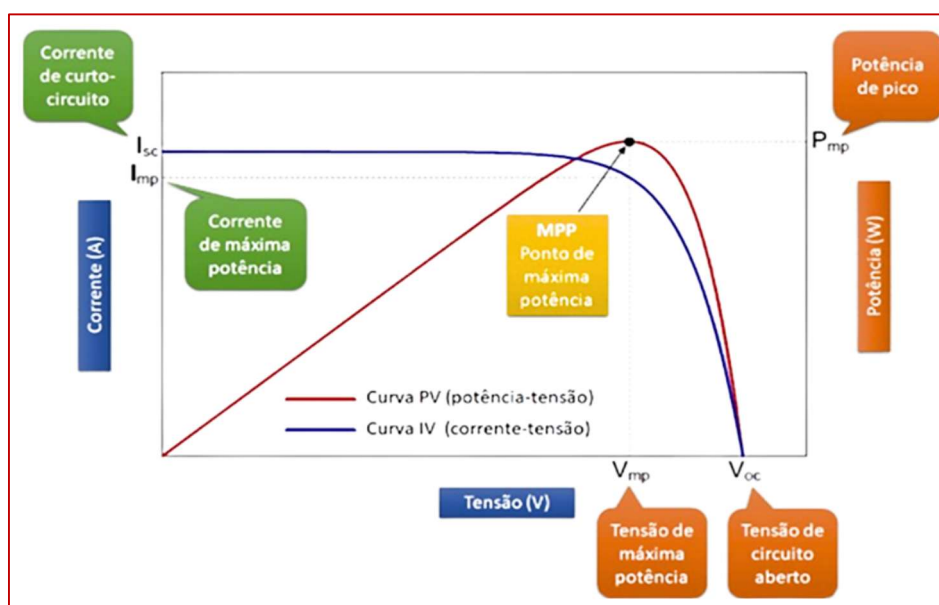
A formulação de um plano de manutenção adequado constitui etapa fundamental para garantir a confiabilidade e o desempenho contínuo do sistema, cuja vida útil pode alcançar cerca de 30 anos. A realização periódica e criteriosa da limpeza dos módulos é um dos procedimentos indispensáveis para manter a eficiência operacional. Para que as ações de manutenção e otimização sejam executadas de maneira efetiva, torna-se imprescindível o domínio das especificações do projeto e das condições de operação [20].

2.3.2 Efeitos da degradação natural e fatores de desempenho

Em um sistema fotovoltaico, além das perdas próprias dos módulos, outros elementos exercem influência direta sobre o rendimento global. Entre eles, destacam-se os efeitos associados à massa de ar atmosférica, as limitações presentes nos dispositivos de armazenamento, como baterias, e as perdas inerentes ao processo de conversão realizado pelo inversor. A identificação de falhas e a avaliação do desempenho dos sistemas fotovoltaicos podem ser realizadas por meio de diferentes técnicas de inspeção, que variam desde análises visuais até métodos instrumentais mais avançados. As inspeções visuais permitem identificar trincas, descolorações, delaminações, corrosão e acúmulo excessivo de sujeira sobre os módulos. [12-13].

Dentre os métodos mais sofisticados estão incluídas técnicas como termografia infravermelha, eletroluminescência, fotoluminescência, espectroscopia e medições de parâmetros elétricos. Entre estas, destacam-se as curvas corrente–tensão (I–V) e potência–tensão (P–V), amplamente utilizadas na avaliação do comportamento elétrico dos módulos fotovoltaicos [11, 13]. A Figura 9 ilustra o que essas medições representam.

Figura 9: Curvas de detalhamento I-V e P-V



Fonte: Adaptado de [24].

A Figura 9 apresenta o comportamento elétrico do módulo fotovoltaico por meio da análise de seus principais parâmetros. A corrente de curto-circuito (I_{sc}) corresponde

ao valor máximo de corrente disponibilizado pelo módulo quando seus terminais são conectados diretamente, sem carga. Já a tensão de circuito aberto (V_{oc}) representa a maior tensão fornecida quando não há fluxo de corrente. A corrente na condição de máxima potência (I_{mp}) expressa o valor de corrente entregue pelo módulo no ponto de melhor desempenho, enquanto a tensão associada a essa condição é definida como V_{mp} [23,24].

A potência máxima de pico (P_{mp}) resulta da combinação desses dois parâmetros e caracteriza-se por ocorrer no ponto de máxima potência (MPP), situado no ponto de inflexão da curva $I-V$ e no valor máximo da curva $P-V$. A determinação desses parâmetros pode ser realizada com instrumentos de medição adequados, como o multímetro ajustado para leitura de corrente, possibilitando a análise do desempenho e da viabilidade de aplicação do módulo fotovoltaico em determinado sistema [24].

A partir disso, alguns indicadores podem ser incorporados a um plano de manutenção:

- Tempo Médio Entre Falhas (MTBF): mede o intervalo médio de operação de um equipamento até que ocorra uma falha;
- Tempo Médio Para Reparo (MTTR): indica o tempo necessário para reparar uma falha ou realizar manutenção corretiva, permitindo avaliar a eficiência da equipe de manutenção;
- Taxa de Falha: representa o número de falhas ocorridas em um período específico, expressa em unidades de tempo (falhas/hora), auxiliando na identificação de equipamentos problemáticos;
- Disponibilidade: indicador-chave que mede a capacidade operacional de um equipamento, permitindo avaliar a gestão da manutenção com base no tempo de inatividade.

Esses indicadores podem ser integrados ao plano de manutenção, possibilitando uma análise abrangente do sistema e identificando oportunidades para melhorias futuras. É importante destacar que os módulos fotovoltaicos, independentemente da tecnologia empregada, têm seu desempenho nominal definido em laboratório a partir do STC. Contudo, o rendimento efetivo em campo é diretamente condicionado às variáveis climáticas do local de instalação, como umidade relativa, regime de chuvas

e velocidade do vento, fatores que influenciam especialmente a temperatura de operação das células [11, 12, 14].

A eficiência também difere de acordo com o tipo de módulo. Em termos gerais, equipamentos produzidos com silício monocristalino apresentam rendimento típico entre 15% e 22%, enquanto os modelos de silício policristalino costumam operar com valores ligeiramente menores, oscilando entre 13% e 18%, segundo os fabricantes. Avanços recentes na indústria têm ampliado o potencial de conversão energética e a competitividade econômica das tecnologias fotovoltaicas, consolidando-as como uma opção cada vez mais relevante para a expansão da matriz energética sustentável [14].

Os sistemas fotovoltaicos, assim como qualquer arranjo elétrico, estão sujeitos a diversos fatores que comprometem sua capacidade de geração e o desempenho global da instalação. Entre esses fatores, destacam-se o aumento da temperatura das células solares acima da faixa ideal de operação (25 °C), a eficiência do inversor no processo de conversão da energia, as perdas elétricas ao longo dos cabos, as variações inerentes ao processo de fabricação dos módulos, mesmo quando pertencem ao mesmo modelo e fabricante, além de ocorrências como sombreamento ao longo do dia e acúmulo de sujeira sobre os módulos. Em conjunto, esses elementos contribuem para a redução da eficiência do sistema [23].

A degradação natural dos materiais, como descoloração, desgaste das células fotovoltaicas e corrosão de itens metálicos, também contribui para a redução da eficiência ao longo do tempo. Para reduzir esses efeitos, é fundamental implementar um plano de manutenção que abranja inspeções regulares, reparos e substituição de componentes desgastados, assegurando a longevidade e o desempenho ideal do sistema fotovoltaico [2,24].

2.4 FERRAMENTAS DE GESTÃO DA QUALIDADE APLICADAS À MANUTENÇÃO

A aplicação de ferramentas de gestão da qualidade na manutenção de sistemas fotovoltaicos configura-se como uma estratégia essencial para garantir o desempenho, a confiabilidade e a longevidade das instalações. A integração de métodos de gestão permite estruturar processos, padronizar procedimentos, otimizar a identificação de falhas e promover a melhoria contínua das operações de manutenção, contribuindo para a redução de custos e para o aumento da eficiência operacional.

2.4.1 Conceitos de melhoria contínua e eficiência operacional

O planejamento da manutenção pode ser compreendido como um projeto estruturado voltado à melhoria contínua, com o objetivo de organizar, programar e analisar os resultados obtidos ao longo do tempo. Esse planejamento baseia-se na coleta sistemática de dados, possibilitando comparações históricas e a identificação de falhas que necessitam de correção, evitando impactos negativos no alcance dos objetivos estratégicos da organização [2].

Um planejamento bem estruturado favorece a identificação precoce de falhas e a adoção de medidas corretivas eficazes. No contexto das atividades de manutenção, compreende-se um conjunto organizado de ações que orientam as rotinas de trabalho, incluindo procedimentos de inspeção, uso de checklists, monitoramento, limpeza, substituição de componentes e ações preventivas. A ausência desse planejamento pode resultar em elevado índice de manutenção corretiva, inexistência de indicadores, retrabalho, altos custos operacionais, sobrecarga da equipe de manutenção e baixa confiabilidade dos ativos. Incluindo ainda instrumentos que apoiam o treinamento e a consolidação de práticas autônomas [2,22]. Entre os impactos no processo de geração observados destacam-se [2]:

- I. alto índice de manutenção corretiva;
- II. ausência de indicadores de manutenção;
- III. elevado retrabalho nas atividades de manutenção;
- IV. inexistência de metas;

- V. manutenção preventiva e preditiva não implementada;
- VI. altos custos de manutenção;
- VII. sobrecarga da equipe de manutenção;
- VIII. falta frequente de peças de reposição e materiais;
- IX. excesso de horas extras na manutenção;
- X. desconhecimento dos índices de disponibilidade e confiabilidade dos ativos.

De forma geral, o planejamento sistemático e com avaliação assertiva garante maior eficiência operacional dos equipamentos. A Figura 11 ilustra algumas possibilidades de planejamento que podem ser adotadas por empresas do setor de geração de energia fotovoltaica.

2.4.2 Diagrama de Ishikawa (6M's)

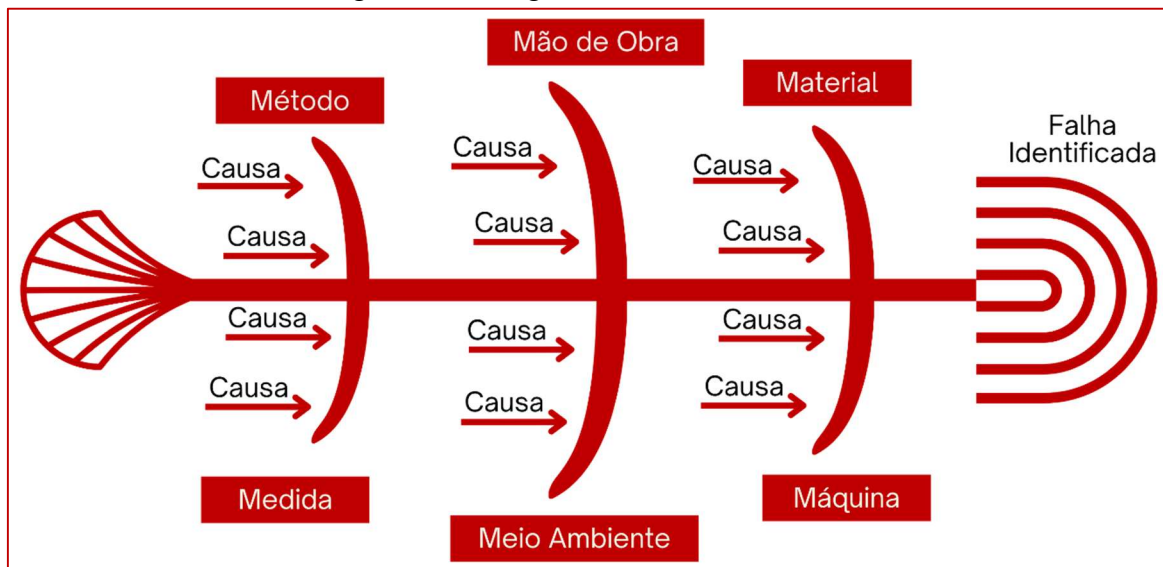
O plano de manutenção foi estruturado a partir de recomendações consolidadas em normas técnicas aplicáveis ao setor, como a NBR 16274, a NBR 5410, a NBR 14039 e as Resoluções Normativas ANEEL nº 482/2012 e nº 687/2015, além de orientações presentes em manuais de fabricantes e em estudos de usinas fotovoltaicas de características semelhantes. Sua elaboração teve início com uma avaliação minuciosa dos principais elementos que compõem a usina, contemplando os módulos fotovoltaicos, os inversores, as estruturas de suporte e os demais dispositivos elétricos associados.

No âmbito das ferramentas de gestão da qualidade aplicadas à elaboração de um plano de manutenção eficiente, destaca-se o Diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de causa e efeito. Desenvolvido por Kaoru Ishikawa, esse método permite organizar, de forma sistemática, os fatores que podem originar determinado problema, facilitando a identificação de suas causas e relações [26].

Neste trabalho, adota-se o modelo dos 6M's (Método, Máquina, Medida, Meio Ambiente, Material e Mão de Obra) como base para a análise das falhas associadas à operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos. A partir dessa metodologia, é possível correlacionar aspectos técnicos, operacionais e humanos às falhas

observadas, viabilizando a proposição de ações preventivas e corretivas mais eficazes, mostrado na Figura 10.

Figura 10: Diagrama de Ishikawa – 6M's



Fonte: Adaptado de [25].

Correlacionando os aspectos analisados nesta metodologia para a elaboração do plano de ação preventivo relacionado a cada tipo de falha que gerou as seguintes correlações:

- **Medida:** Está relacionada principalmente ao controle de qualidade e mensuração de indicadores de desempenho, instrumentos de medição, entre outros fatores qualitativos, onde foram analisadas as condições elétricas dos condutores, *stringbox*, disjuntores, Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) e fusíveis.
- **Métodos:** Estão relacionados a padronização de processos e metodologias de trabalho. Podem ser considerados critérios de priorização e execução de tarefas, métodos de registro, consulta de informações ou adequação do planejamento para a capacidade de execução, onde foram analisados os aspectos de sombreamento dos módulos, utilização do diodo by-pass, problemas com trincas, sujeidade e caracterização de pontos quentes com relação a baixa qualidade de geração das *strings*.

- **Máquinas:** São considerados como equipamentos para o trabalho, os computadores, as máquinas automatizadas e outros equipamentos usados no processo que possam estar defeituosos, onde foram analisadas a falta de monitoramento e dimensionamento do sistema.
- **Meio Ambiente:** São fatores circunstanciais que interferem diretamente o efeito estudado. Questões relacionadas à saúde e segurança no trabalho são os principais fatores considerados neste aspecto, onde são analisados os aspectos de origem da sujidade, sombreamento, invasão de insetos e o risco de trinca por objeto e corrosão de conexões.
- **Materiais:** São os materiais utilizados no processo que têm como o resultado o efeito avaliado. Podem ser a conformidade de matéria prima, materiais de comunicação e outros materiais não automatizados, onde são analisadas as trincas nos módulos com o passar do tempo, impacto da falta de equipotencialidade, aterramento e dimensionamento adequado, bem como o impacto da incompatibilidade da estrutura.
- **Mão de obra:** Neste aspecto de causa são considerados fatores de formação de pessoal e a inadequação do nível de aprendizagem e qualificação, valor de salários, benefícios, nível de satisfação, comunicação e outros fatores relacionados aos colaboradores da empresa e que possam influenciar o efeito avaliado, onde são analisados os impactos em relação a desalinhamento da estrutura, trincas em decorrência da instalação, falta de treinamento adequado e mal contato das conexões.

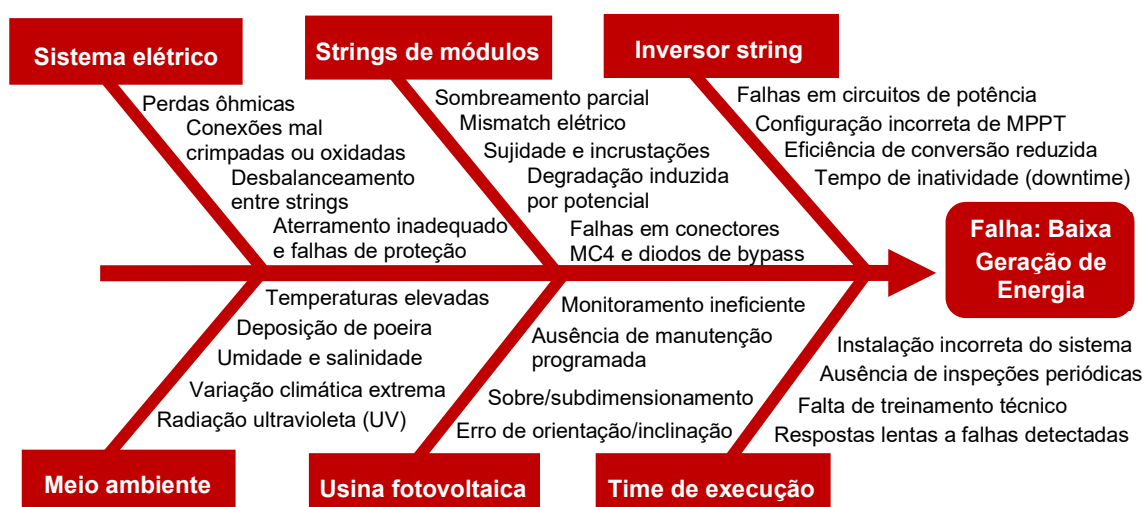
2.4.3 Plano de Ação 5W2H

Como complemento às ferramentas de diagnóstico, o Plano de Ação 5W2H destaca-se como um instrumento eficaz para organizar e estruturar as ações de manutenção. Essa metodologia permite definir, de forma clara, o que será feito, por que, onde, quando, por quem, como e com quais recursos, contribuindo para a padronização dos processos e para o acompanhamento das atividades executadas. No contexto da manutenção de sistemas fotovoltaicos, o 5W2H auxilia na definição

de responsabilidades, no controle dos prazos e na alocação adequada de recursos, fortalecendo a gestão da manutenção e promovendo a melhoria contínua do desempenho operacional das instalações [26]. Os aspectos analisados nesta ferramenta são, conforme o Quadro 3:

- **What:** O que será feito: Traz uma descrição muito clara e sucinta do que deve ser feito.
- **Why:** Por quê: Descreve as motivações que justificam a realização de que será feito no primeiro passo.
- **Where:** Onde: Informa o local onde será realizado o processo descrito.
- **Who:** Por quem: Lista o nome da pessoa ou departamento responsável pela ação.
- **When:** Quando: Descrição da data, horário ou período no qual ação deve acontecer.
- **How:** Como: Descreve como a ação deverá ser realizada e padrões a serem seguidos.
- **How much:** Quanto Custa: Informa o custo da ação, não estando no escopo deste trabalho, deixado em aberto para valores variáveis, ou mesmo descrever as variáveis que afetam o custo ou tempo de execução.

Figura 11: Aspectos considerados para o preenchimento do Diagrama Ishikawa



Fonte: Autor, 2025.

Quadro 2: Aspectos de causa dos erros aplicáveis ao Diagrama Ishikawa

| ASPECTOS CONSIDERADOS | VERIFICAÇÃO DURANTE A VISITA |
|---------------------------|--|
| Sistema Elétrico | As instalações devem ser verificadas todos os componentes elétricos da instalação: 1 - conectores, 2 - cabos CC e CA; 3 - os dispositivos de proteção: disjuntores, DPS e fusíveis. |
| String de módulo | Deve-se verificar a presença de sombreamento parcial ou total nos módulos e funcionamento dos diodos by-pass para garantir seu funcionamento correto. É essencial realizar uma inspeção visual para identificar: 1 - trincas, 2 - rachaduras, 3 - sujidade acumulada nos módulos. Utilizar termografia para detectar pontos quentes, que indiquem falhas ou baixa eficiência nas <i>strings</i> . |
| Inversor string | É necessário avaliar as condições operacionais do inversor <i>string</i> , certificando-se de que o sistema de supervisão esteja ativo e registrando as informações de forma adequada. Devem ser conferidas as ligações elétricas em corrente contínua e alternada, a fim de identificar eventuais falhas de aperto, indícios de aquecimento excessivo ou degradação dos terminais. Também se deve confirmar se o equipamento está corretamente especificado para suportar as correntes envolvidas, além de analisar sua estrutura física em busca de sinais de desgaste, sujeira ou partículas acumuladas que possam afetar seu desempenho ou reduzir sua vida útil. |
| Meio ambiente | É fundamental analisar as condições ambientais que possam interferir no desempenho do sistema, como a ocorrência de sombreamentos ou a presença de insetos e pequenos animais que possam invadir componentes e comprometer sua eficiência. |
| Usina fotovoltaica | A operação de uma usina fotovoltaica deve considerar o conjunto do sistema, incluindo a verificação da integridade dos módulos quanto à presença de trincas, danos mecânicos ou sinais de oxidação nas conexões elétricas. É igualmente necessário confirmar a conformidade do sistema de aterramento e a adequada equipotencialização entre os componentes. Além disso, deve-se avaliar se a estrutura de suporte está corretamente dimensionada para os painéis instalados, observando possíveis indícios de corrosão, deformações ou desgastes que possam comprometer sua estabilidade. Trata-se, essencialmente, de uma etapa fundamental para garantir a confiabilidade e a durabilidade da instalação. |
| Time de execução | Durante a visita, é fundamental avaliar se a equipe de execução possui treinamento adequado (NR 10, NR 35) para lidar com a instalação e manutenção do sistema fotovoltaico. Verificando se o alinhamento dos módulos está correto, se as conexões elétricas estão bem feitas e se os procedimentos de instalação foram seguidos corretamente para evitar trincas nos painéis ou mau contato nas conexões. Além disso, comprova-se que os profissionais estão cientes das melhores práticas de segurança e que contam com a supervisão adequada. |

Fonte: Autor, 2025.

Quadro 3: Aspectos gerais do Plano de Ação 5W2H

| 5W | | | | | 2H | |
|-------------------------|--|---|--|---|--|---------------------------|
| ONDE (WHERE?) | O QUÊ (WHAT?) | POR QUÊ (WHY?) | QUEM (WHO?) | QUANDO (WHEN?) | COMO (HOW?) | QUANTO CUSTA? (HOW MUCH?) |
| Onde fazer? | O que será feito? | Porque fazer? | Quem irá fazer? | Quando será feito? | Como será feito? | Quanto custará? |
| Usina de solo e rooftop | Limpeza dos módulos fotovoltaicos | Reduzir perdas por sujeira e manter a irradiância incidente | Equipe de O&M com EPs e NR35. | Trimestralmente ou quando PR < 80%. | Lavagem com água desmineralizada, escovas de cerdas macias e monitoramento antes/depois. | - |
| Usina de solo e rooftop | Inspeção termográfica das <i>strings</i> | Detectar falhas por aquecimento anômalo e diodos abertos | Técnico eletricitista NR10 | Mensalmente ou em caso de queda de geração >10% | Uso de termovisor calibrado, sob irradiação >700 W/m², e comparação com mapa térmico anterior. | - |
| Usina de solo e rooftop | Inspeção aérea por drone | Identificar pontos quentes e sombreamentos | Engenheiro de O&M com piloto certificado | Trimestralmente ou após eventos climáticos | Voo autônomo com câmera térmica e processamento de mapa radiométrico. | |

| | | | | | | |
|--|--|--|--|---|---|---|
| Quadros <i>stringbox</i> | Medição elétrica e curva I-V das <i>strings</i> | Avaliar mismatch, falhas em módulos e PID | Engenheiro de comissionamento | Semestralmente | Analizador de curva I-V, medição de tensão/corrente e comparação com STC. | - |
| Área CC-CA da usina | Inspeção visual e fotográfica das conexões e cabos | Evitar falhas por oxidação, abrasão ou folgas | Técnico eletricista NR10 | Mensalmente | Verificação visual, torqueamento de terminais e registro fotográfico. | - |
| Áreas adjacentes da usina | Controle de vegetação e segurança perimetral | Prevenir sombreamento, furtos e danos estruturais | Equipe de manutenção predial | Trimestralmente | Corte mecanizado e inspeção por drone terrestre. | - |
| Sala de controle SCADA | Atualização de indicadores de desempenho (KPIs) | Avaliar eficácia das ações e priorizar manutenções | Engenheiro responsável técnico | Mensalmente | Cálculo de PR, MTBF, MTTR e Taxa de Disponibilidade. Emissão de relatório técnico. | - |
| Usina de solo e rooftop | Inspeção termográfica dos inversores e barramentos CA-CC | Identificar aquecimento anormal, falhas de isolamento e conexões frouxas | Técnico NR10 com certificação em termografia | Trimestralmente ou quando $\Delta T > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre terminais | Medição com termovisor calibrado sob carga nominal, registro fotográfico e emissão de relatório técnico. | - |
| Sala técnica ou pátio solar | Medição de eficiência de conversão do inversor | Garantir que o inversor opere dentro do rendimento nominal ($\geq 96\%$) | Engenheiro de comissionamento | Semestralmente ou após substituição de componentes | Teste funcional com analisador de potência CA-CC e comparação com curva de eficiência nominal. | - |
| Estruturas metálicas e painéis elétricos | Inspeção e mitigação de ruídos e vibrações | Prevenir falhas mecânicas em ventiladores e componentes internos | Engenheiro de O&M | Semestralmente ou quando ruído $> 70\text{ dB}$ / vibração $> 4\text{ mm/s RMS}$ | Medição com analisador de vibração e registrador de ruído, análise espectral e reaperto mecânico. | - |
| Inversores de solo e rooftop | Limpeza e substituição dos filtros de ar | Evitar superaquecimento e falhas térmicas | Técnico de manutenção NR10 | Trimestralmente ou conforme alerta do sistema SCADA ($> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ interna) | Desmontagem, limpeza a seco e reinstalação dos filtros, verificando fluxo de ar e funcionamento das ventoinhas. | - |
| Painéis dos inversores | Verificação do sistema de ventilação e sensores térmicos | Assegurar controle térmico e funcionamento dos ventiladores | Engenheiro eletricista / técnico NR10 | Trimestralmente | Teste funcional de ventiladores, sensores de temperatura e alarme térmico via SCADA. | - |
| Unidade de controle dos inversores | Atualização de firmware e calibração dos inversores | Corrigir bugs, otimizar MPPT e estabilidade da rede | Engenheiro de O&M com acesso remoto autorizado | Anualmente ou conforme boletim técnico do fabricante | Atualização via <i>software</i> oficial e validação de comunicação com o sistema SCADA. | - |
| Usina de solo e Rooftop | Inspeção visual e fotográfica das estruturas metálicas | Evitar corrosão e ruptura de suportes | Eng. de O&M e técnico mecânico | Trimestralmente ou após eventos climáticos intensos | Inspeção com drone, análise de corrosão e torqueamento com torquímetro calibrado. | - |
| Usina de solo | Verificação de alinhamento das <i>strings</i> e erosão do solo | Prevenir desalinhamento estrutural e perda de ângulo de incidência | Eng. civil / Eng. de O&M | Semestralmente | Sensor de inclinação, análise topográfica e nivelamento. | - |
| Estruturas críticas | Ensaio de integridade mecânica | Garantir resistência e ancoragem | Eng. mecânico | Anualmente | Teste não destrutivo por corrente parasita (Eddy Current). | - |
| Usina de solo e Rooftop | Inspeção e termografia do cabeamento CC e CA | Evitar aquecimento excessivo e perdas ôhmicas | Técnico NR10 | Mensalmente | Termovisor e análise visual sob carga nominal. | - |

| | | | | | | |
|-----------------------------------|--|--|---------------------------------|--|--|---|
| Stringbox e quadros CA | Teste de continuidade e resistência de isolamento | Assegurar integridade elétrica | Eng. eletricista / Técnico NR10 | Anualmente ou após eventos de surto | Medição com megômetro (1000VDC) e comparação com valores de referência. | - |
| Usina de solo e Rooftop | Inspeção termográfica e análise de ruído | Detectar sobreaquecimento e vibrações anormais | Eng. de O&M / Técnico NR10 | Semestralmente ou ao detectar anomalias | Termovisor + analisador de vibração + registro sonoro. | - |
| Transformador principal | Inspeção de buchas e conexões de média tensão | Garantir isolamento e evitar falhas dielétricas | Eng. eletricista | Trimestralmente | Teste de rigidez dielétrica e inspeção visual via drone. | - |
| Transformador es e painéis | Inspeção da pintura e oxidação | Prevenir corrosão e aumento de temperatura superficial | Eng. mecânico | Semestralmente | Avaliação visual e reaplicação de tinta anticorrosiva. | - |
| Usina de solo e Rooftop (telhado) | Inspeção da continuidade da equipotencialização em todos os componentes metálicos da usina | Garantir a segurança elétrica e comissionamento do sistema | Engenheiro de comissionamento | Semestralmente ou imediatamente após a identificação do erro no inversor | Medição da continuidade em toda a extensão dos circuitos e pontos de aterramento com o terrômetro. | - |
| Estruturas metálicas e painéis | Medição da continuidade dos condutores de proteção | Garantir equipotencialização e segurança elétrica | Eng. eletricista / Técnico NR10 | Semestralmente | Medição com terrômetro digital (resistência $\leq 5 \Omega$). | - |
| Base dos módulos e SPDA | Inspeção de conexões e pontos de aterramento | Evitar elevação de potencial e falhas de proteção | Eng. eletricista / Técnico NR10 | Semestralmente ou após tempestades | Inspeção visual e reaperto das conexões. | - |
| Quadros elétricos CC-CA | Inspeção visual e teste funcional dos disjuntores | Garantir proteção contra sobrecorrentes | Técnico NR10 | Semestralmente | Teste de acionamento manual e termografia sob carga. | - |
| Quadros elétricos e stringboxes | Verificação de DPS (Dispositivos de Proteção contra Surtos) | Garantir proteção contra sobretensões | Eng. eletricista / Técnico NR10 | Anualmente ou após surtos elétricos | Teste com simulador de surto e análise visual do indicador. | - |
| Quadros CC e inversores | Inspeção e teste das chaves seccionadoras | Assegurar isolamento seguro em manutenções | Técnico NR10 | Semestralmente | Teste de isolamento com multímetro e acionamento manual. | - |

Fonte: Autor, 2025.

De forma prática, o plano de manutenção, que engloba a detecção e a partir dessa etapa, viabiliza a análise e registro por ferramentas de controle, abrangendo tanto a manutenção preventiva quanto a manutenção preditiva e corretiva planejada, objetivando a redução, ao máximo, da ocorrência de falhas e minimização das perdas de produção não programadas. Conforme apresentado no tópico de resultados, a maioria das situações problemáticas identificadas durante as inspeções requer um plano de execução detalhado para cada ação detectiva, corretiva, preventiva, preditiva e/ou corretiva [14,15,16].

No caso da manutenção preventiva, o plano contempla inspeções visuais mensais, limpezas trimestrais dos módulos solares, verificações semestrais dos inversores e testes anuais dos componentes elétricos. A aplicação do Diagrama de Ishikawa é necessária para identificar possíveis causas de falhas em cada

componente do sistema, como danos físicos nos módulos, conexões elétricas desgastadas ou corroídas, instabilidades nas estruturas de fixação e problemas de desempenho nos inversores [14,15,16].

Com base nessa análise, o Plano de Ação 5W2H é utilizado para detalhar as ações a serem realizadas futuramente nas diversas usinas fotovoltaicas em operação ou em execução. Por exemplo, as inspeções visuais mensais dos módulos têm como objetivo detectar precocemente danos físicos, sendo realizadas por técnicos qualificados (Who?), seguindo um checklist específico (How?), no local de instalação dos módulos (Where?), mensalmente (When?), visando evitar perdas de eficiência (Why?), com custo previamente estimado por visita (How Much?), vale ressaltar que os indicadores são extraídos considerando os normativos vigentes e manuais dos fabricantes, para um melhor aproveitamento prático [14, 26].

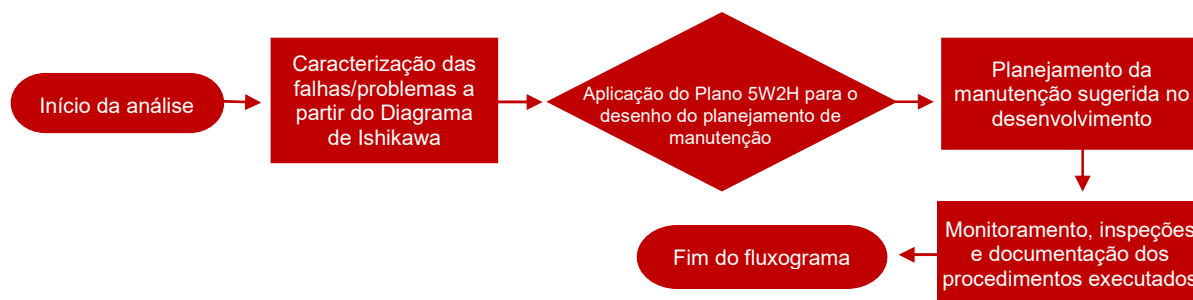
No que se refere às manutenções detectivas, as ferramentas de monitoramento são necessárias para o acompanhamento contínuo do desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Sistemas de monitoramento remoto permitem identificar imediatamente desvios nos parâmetros operacionais já definidos conforme os normativos vigentes devidamente ensaiados em laboratórios. A análise mensal dos dados possibilita a detecção de tendências e anomalias que podem indicar falhas iminentes, enquanto testes termográficos semestrais identificam pontos quentes com potencial de falha futura [14-16].

Vale frisar que esta ferramenta de gestão detalha as ações preventivas, preditivas e corretivas para cada problema detectado, enquanto o Diagrama de Ishikawa possibilita a visualização das causas potenciais dos desvios de desempenho pontuados, como acúmulo de sujeira nos módulos ou problemas de comissionamento nos inversores. Com a pontuação de todas as causas e a definição do escopo de execução no Plano de Ação 5W2H, elabora-se um fluxograma que prioriza sequencialmente cada problema identificado [15-17]. Por exemplo, se for indicado um erro que comprometa o sistema de geração, será fornecida uma análise detalhada dos indicadores que orientam a execução da manutenção devida conforme o fluxo ilustrado na Figura 12.

Nessa perspectiva, o plano de manutenção está apoiado pelas ferramentas de gestão da qualidade, por proporcionar uma abordagem proativa e sistemática para a

operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos, diminuindo significativamente o risco de falhas e promovendo a prevenção e melhoria da operação de manutenção e em função disso efficientizar o processo de geração. Essas ferramentas permitem um planejamento detalhado e a execução eficiente das atividades de manutenção, assegurando a confiabilidade e a longevidade das usinas fotovoltaicas.

Figura 12: Ilustração modelo da gestão de prioridades das manutenções definidas



Fonte: Autor, 2025.

A periodicidade das atividades de manutenção é definida ao final do processo estabelecido pelo fluxo de execução, considerando as condições específicas de cada equipamento com defeito, a importância de seu funcionamento para o processo de geração e o nível de confiabilidade exigido. São ainda levadas em conta as recomendações dos fabricantes, as condições ambientais da instalação e os termos de garantia dos equipamentos [16-18].

Por exemplo, a limpeza dos módulos fotovoltaicos é realizada trimestralmente ou quando $PR < 80\%$, considerando regiões com alta concentração de poeira ou poluição, conforme orientação dos fabricantes, objetivando garantir a máxima eficiência na geração de energia. De maneira similar, a inspeção de pontos quentes é conduzida semestralmente utilizando câmeras termográficas, com o objetivo de identificar possíveis falhas antes que estas se agravem, assegurando a confiabilidade e a segurança da usina fotovoltaica [26].

É importante destacar que a execução das atividades planejadas pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo a tecnologia empregada, as condições ambientais da instalação, os termos de garantia, os manuais de operação, as recomendações dos fabricantes e a conformidade com normas e regulamentos aplicáveis. Esses elementos também determinam a frequência das ações de manutenção preventiva.

2.5 TIPOS E ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A manutenção de sistemas fotovoltaicos é um fator essencial para garantir o desempenho, a segurança e a longevidade das instalações, prevenindo falhas e perdas de eficiência que comprometem a geração de energia. Nesse contexto, compreender os tipos e estratégias de manutenção, preventiva, preditiva e corretiva, é essencial para a gestão eficiente dos sistemas, permitindo identificar intervenções adequadas conforme as características do empreendimento e as condições ambientais.

2.5.1 Manutenção corretiva, preventiva, preditiva e detectiva

Devido à crescente complexidade dos equipamentos e da necessidade de profissionais preparados para lidar com os problemas em sistemas mecânicos, térmicos e elétricos, a associação entre planos de manutenção e redes de energia vem crescendo na literatura. Embora observem-se lacunas nos debates em torno de planejamento e programa de controle, a importância da manutenção está diretamente ligada ao investimento realizado e a dependência, disponibilidade e eficiência das organizações. No setor de energia, o emprego da gestão da manutenção é ainda mais essencial na garantia da qualidade do serviço e dos baixos custos operacionais a fim de garantir não apenas a performance energética, mas preços competitivos no mercado [2].

O conceito de manutenção abrange o conjunto de ações técnicas, gerenciais e de acompanhamento operacional voltadas a preservar ou restabelecer um equipamento, conjunto de componentes ou infraestrutura ao estado necessário para que cumpra adequadamente sua função. Em SFV, essa etapa é indispensável, pois envolve procedimentos sistemáticos direcionados a garantir o desempenho confiável dos módulos, inversores e demais elementos da instalação. Dessa forma, a manutenção pode ser compreendida como um ciclo organizado de intervenções que visa assegurar a continuidade e a eficiência operacional do sistema [4]. A literatura destaca quatro tipos de manutenção: preditiva, corretiva, preventiva e detectiva que serão descritos nos parágrafos a seguir.

A importância das atividades de manutenção em sistemas de geração fotovoltaica está diretamente associada ao elevado investimento inicial e à relação estreita entre a disponibilidade do sistema e a receita produzida. Convém destacar que, conforme a finalidade e o arranjo do projeto, diferentes configurações de usinas podem ser empregadas, o que resulta em demandas variadas de manutenção [24].

Embora os sistemas fotovoltaicos apresentem, em sua maioria, poucos componentes móveis, o que reduz a ocorrência de desgaste mecânico e a necessidade de lubrificação, a manutenção permanece indispensável para assegurar desempenho otimizado e continuidade operacional. Um projeto de engenharia bem elaborado e a seleção de equipamentos de alta qualidade são fatores essenciais, porém a correta execução dos procedimentos de instalação é determinante para a redução de custos e para a preservação da confiabilidade do sistema ao longo de sua vida útil [23,24].

A ABNT-NBR 5462 expressa que a manutenibilidade (também chamada de manutenabilidade) é a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas. No âmbito industrial, a manutenibilidade é a facilidade com a qual se pode realizar a manutenção de um componente, sistema, máquina ou equipamento. Conforme a norma, essa manutenibilidade pode ser melhorada por meio da combinação de 6 diferentes fatores, sendo eles: Procedimento, Desenvolvimento, Informação, Antecipação, Treinamento e Repetição [26].

No âmbito da manutenção preditiva, realiza-se o acompanhamento contínuo do desempenho do sistema fotovoltaico, permitindo a identificação antecipada de indícios de desgaste, como riscos, descolorações ou fissuras nos módulos. Esse procedimento pode ser executado pelo próprio usuário, contribuindo para a diminuição dos gastos com intervenções técnicas. As verificações incluem observações visuais dos principais elementos da instalação, módulos, inversores e cabeamentos, com o objetivo de reconhecer possíveis anomalias ainda em estágio inicial. A avaliação desses aspectos em tempo real possibilita detectar e corrigir irregularidades antes que se transformem em falhas operacionais, evitando paradas inesperadas e reduzindo os custos decorrentes dessas interrupções [2,24].

Nessa perspectiva, a manutenção corretiva é empregada exclusivamente quando ocorre alguma anomalia ou falha em determinado componente do sistema. Esse tipo de intervenção é acionado diante de uma redução expressiva na geração de energia ou da interrupção completa do funcionamento, exigindo que uma equipe especializada seja contratada para diagnosticar e reparar o defeito encontrado. O objetivo central dessa modalidade de manutenção é eliminar a causa que originou o mau desempenho do equipamento ou do conjunto. [24], podendo ser realizada de uma das seguintes formas:

- **Manutenção Corretiva Não-planejada:** Trata-se de uma intervenção realizada somente após a ocorrência de falhas súbitas ou quedas inesperadas de desempenho, sem que haja possibilidade de preparação antecipada. Apesar dos prejuízos e interrupções provocados por ocorrências imprevistas, essa prática ainda é amplamente utilizada, sendo marcada pela inexistência de medidas preventivas ou preditivas que antecipem o problema.
- **Manutenção Corretiva Planejada:** É realizada a intervenção devido ao desempenho abaixo do esperado ou à ocorrência de uma falha, baseada em decisões de gestão. A situação foi monitorada pela manutenção preditiva e foi escolhido continuar até a falha, que já estava prevista e para a qual já temos uma solução.

A manutenção preventiva consiste na execução periódica de atividades como a limpeza das placas solares, a higienização dos inversores e a inspeção abrangente de todos os componentes elétricos, como inversores e conectores, e mecânicos, incluindo suportes e estruturas de fixação. O objetivo é otimizar o desempenho do sistema, identificar e reparar danos, além de prolongar a vida útil dos equipamentos. Essas ações são realizadas em intervalos previamente definidos, mesmo na ausência de falhas aparentes [2,24].

O propósito principal da manutenção preventiva é evitar a ocorrência de falhas e maximizar a disponibilidade dos equipamentos. O planejamento dessas atividades é fundamentado na análise do histórico do desempenho inadequado do sistema. Para a execução de tarefas em telhados, o proprietário pode realizar a limpeza dos módulos solares seguindo precauções de segurança ou contratar empresas especializadas,

cujas equipes são certificadas, de acordo com as normas NR 10 e NR 35, possuindo equipamentos e ferramentas adequadas. A implementação de um modelo preventivo garante maior confiabilidade nos prazos de operação do sistema, reduz o tempo de inatividade e minimiza a necessidade de intervenções corretivas [2].

A manutenção detectiva tem como foco reconhecer, de forma antecipada, sinais que indiquem o surgimento de possíveis falhas ainda em seus estágios iniciais. Essa prática abrange pequenas correções executadas pelos próprios operadores e contribui para acelerar tanto a identificação quanto a solução de anomalias, diminuindo o intervalo entre intervenções e evitando atrasos no processo de reparo. Para tornar essa estratégia mais eficiente, torna-se essencial a aplicação de procedimentos operacionais padronizados em conformidade com as normas ABNT NBR 16747:2020 e ABNT NBR 16690:2020, que reforçam a precisão e a efetividade das ações detectivas [2,17,27,28].

Além disso, Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs) podem ser aplicados na manutenção detectiva, fornecendo métricas quantificáveis que refletem o desempenho operacional da usina e a eficácia das atividades de manutenção. Entre os KPIs mais utilizados estão o MTBF, MTTR, taxa de disponibilidade, taxa de falhas, custo de manutenção e eficiência operacional. Esses indicadores permitem monitorar e aprimorar continuamente a performance do sistema [2,29].

À vista desse panorama, considerando a complexidade dos sistemas fotovoltaicos, é necessário um conjunto abrangente de KPIs que contemple diferentes aspectos da gestão de O&M. No entanto, os KPIs selecionados devem coletar apenas dados essenciais sobre o desempenho do sistema, evitando redundâncias e excesso de informações. A definição desses indicadores deve garantir que eles forneçam informações mensuráveis, confiáveis, precisas e aplicáveis, permitindo implementar correções quando o desempenho não atingir os objetivos ou aprimorar a eficácia dos processos [29].

A integração desses métodos possibilita definir de forma clara as intervenções necessárias diante das não conformidades identificadas. O plano foi ajustado às condições ambientais típicas do Nordeste, funcionando como base para avaliar a aplicação de tecnologias de monitoramento e comissionamento em diferentes tipologias de usinas, podendo também ser adaptado a outras regiões.

3 APLICAÇÃO EM TRÊS USINAS FOTOVOLTAICAS ON-GRID

Nessa etapa, estão apresentados os resultados obtidos a partir do diagnóstico técnico das principais disfunções identificadas nas três usinas envolvendo módulos, inversores, cabeamento, dispositivos de proteção e estruturas de fixação, bem como a aplicação das ferramentas de gestão da qualidade. A análise comparativa entre as usinas permite observar padrões de desempenho, relacionando às perdas energéticas às condições operacionais e ambientais, consolidando uma visão técnica sobre o impacto das práticas de manutenção na produtividade dos SFV on-grid.

3.1 Análise das condições operacionais iniciais

Conforme os registros técnicos, levantamentos fotográficos e indicadores obtidos durante o diagnóstico inicial, em consonância com a metodologia deste estudo, o plano de manutenção proposto foi desenvolvido para 03 usinas fotovoltaicas, sendo uma *rooftop* e duas em solo.

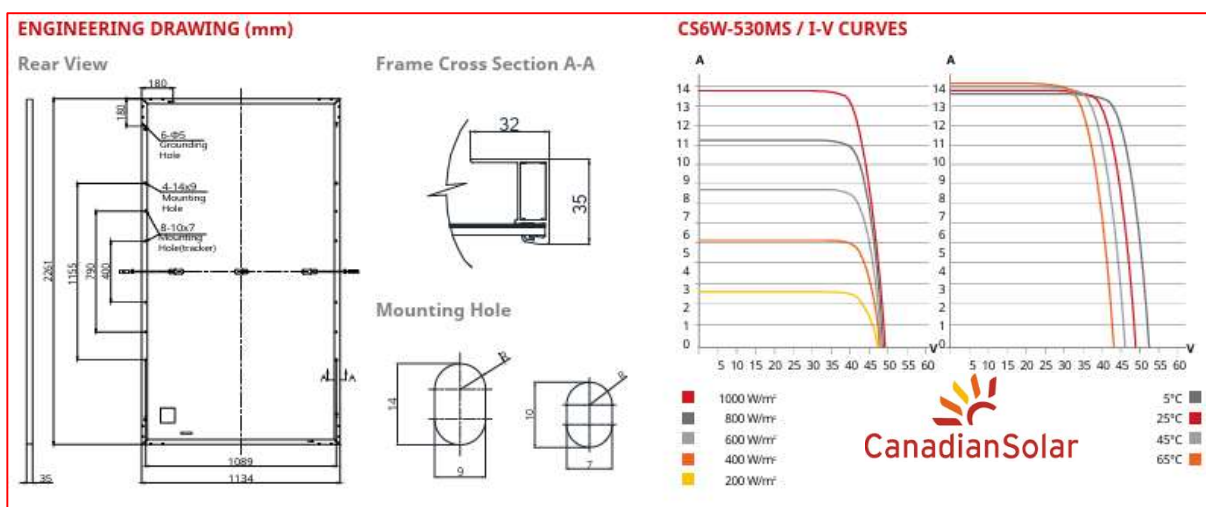
A Usina Fotovoltaica 01, como ilustrado na Figura 13, é do tipo *rooftop* com início de operação no dia 18/11/2022, está instalada sobre estrutura metálica, composta por módulos fotovoltaicos de modelo Canadian Solar – CS6W-545MS, conforme a Figura 14 e Tabela 1, com potência de 545 Wp cada, totalizando 59,95 kWp de potência instalada, e um inversor trifásico da modelo Sungrow – SG110CX, com potência nominal de 110 kW, conforme a Figura 15 e Tabela 2.

Figura 13: Usina fotovoltaica 01 – Rooftop, Paudalho - PE



Fonte: Autor, 2025.

Figura 14: Módulo Canadian Solar – CS6W-545MS



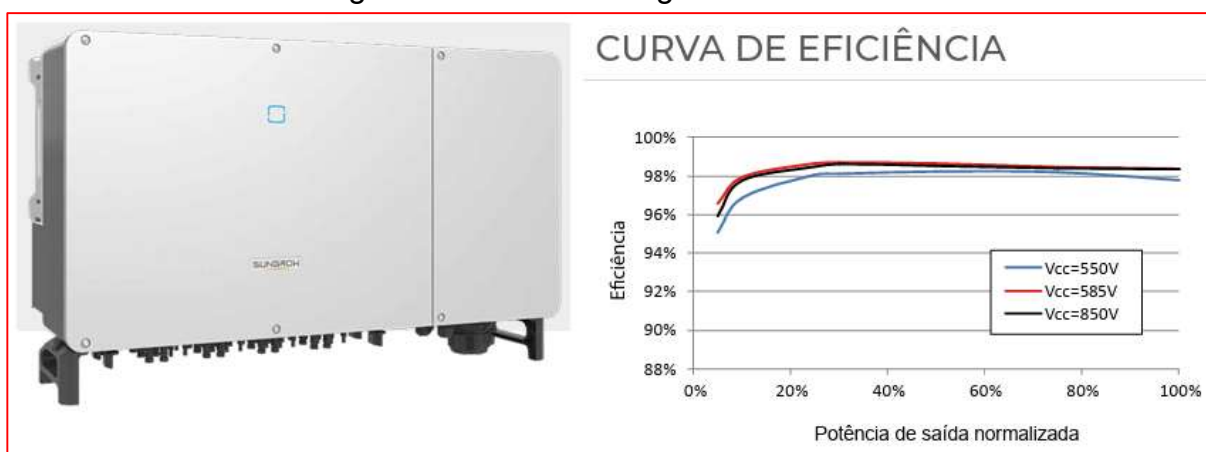
Fonte: Adaptado de [32].

Tabela 1: Parâmetros do módulo Canadian Solar – CS6W-545MS

| Dados Elétricos – CS6W – 545MS | |
|--------------------------------|---------|
| Nominal Max. Power (Pmax) | 545 W |
| Opt. Operating Voltage (Vmp) | 41,5 V |
| Opt. Operating Current (Imp) | 13,14 A |
| Open Circuit Voltage (Voc) | 49,40 V |
| Short Circuit Current (Isc) | 13,95 A |
| Module Efficiency | 21,3% |

Fonte: Adaptado de [32].

Figura 15: Inversor Sungrow – SG110CX



Fonte: Adaptado de [33].

Tabela 2: Parâmetros do Inversor Sungrow – SG110CX

| Dados Elétricos – SG110CX | |
|---|---------------|
| ENTRADA CC | |
| Máxima tensão de entrada FV | 1.100 V |
| Mínima tensão de entrada FV / Tensão de inicialização | 200 V/250 V |
| Tensão nominal de entrada FV | 585 V |
| Faixa de tensão MPP para potência nominal | 585 V – 850 V |
| Nº de entradas MPPT independentes | 9 |
| Nº de strings FV por MPPT | 2 |
| Máxima corrente CC de curto-circuito | 40 A * 9 |
| Máxima corrente CC por conector de entrada | 30 A |
| SAÍDA CA | |
| Potência ativa máxima (FP= 1) | 110 kW@45°C |
| Potência aparente máxima | 110 kVA@45°C |

| | |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| Máxima corrente de saída CA | 158,8 A |
| Tensão CA nominal | 3 / N / PE, 220/380V ou 230/400V |
| Distorção harmônica total (THD) | < 3% (à potência nominal) |
| Fases de alimentação/Conexão CA | 3/3-PE |
| Eficiência máxima/Eficiência europeia | 98,7%/98,5% |

Fonte: Adaptado de [32].

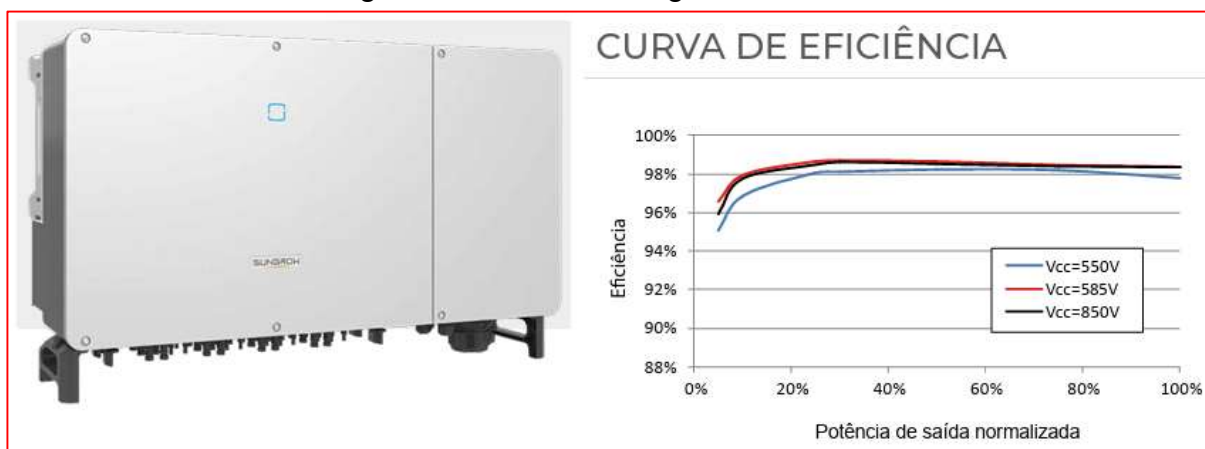
A Usina Fotovoltaica 02, como ilustrado na Figura 16, é do tipo solo com início de operação no dia 18/11/2022, está instalada sobre estrutura metálica, composta por módulos fotovoltaicos de modelo Canadian Solar – CS6W-545MS, conforme a Figura 14 e Tabela 1, com potência de 545 Wp cada, totalizando 95,3 kWp de potência instalada, e um inversor trifásico da modelo Sungrow – SG75CX, com potência nominal de 75 kW, conforme a Figura 17 e Tabela 3.

Figura 16: Usina fotovoltaica 01 – Solo, Paudalho - PE



Fonte: Autor, 2025.

Figura 17: Inversor Sungrow – SG75CX



Fonte: Adaptado de [33].

Tabela 3: Parâmetros do Inversor Sungrow – SG75CX

| Dados Elétricos – SG75CX | |
|---|----------------------------------|
| ENTRADA CC | |
| Máxima tensão de entrada FV | 1.100 V |
| Mínima tensão de entrada FV / Tensão de inicialização | 200 V/250 V |
| Tensão nominal de entrada FV | 585 V |
| Faixa de tensão MPP para potência nominal | 550 V – 850 V |
| Nº de entradas MPPT independentes | 9 |
| Nº de <i>strings</i> FV por MPPT | 2 |
| Máxima corrente CC de curto-circuito | 40 A * 9 |
| Máxima corrente CC por conector de entrada | 26 A * 9 |
| SAÍDA CA | |
| Potência ativa máxima (FP= 1) | 75 kW@40°C |
| Potência aparente máxima | 75 kVA@40°C |
| Máxima corrente de saída CA | 113,7 A |
| Tensão CA nominal | 3 / N / PE, 220/380V ou 230/400V |
| Distorção harmônica total (THD) | < 3% (à potência nominal) |
| Fases de alimentação/Conexão CA | 3/3 |
| Eficiência máxima/Eficiência europeia | 98,7%/98,4% |

Fonte: Adaptado de [32].

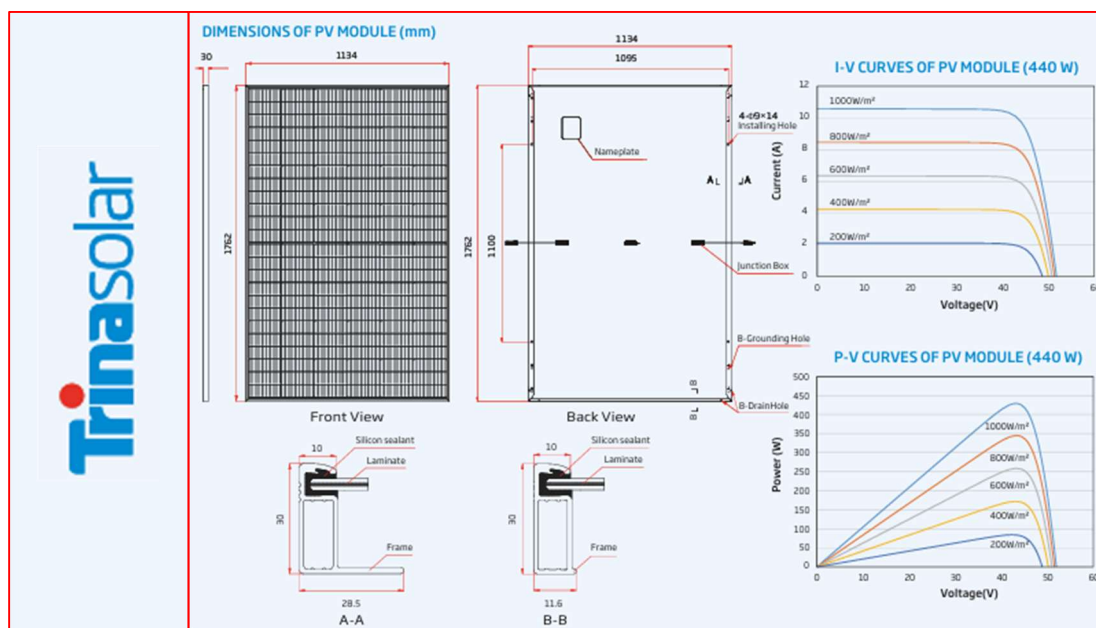
A Usina Fotovoltaica 03, como ilustrado na Figura 18, é do tipo solo com início de operação no dia 21/06/2021, está instalada sobre estrutura metálica, composta por módulos fotovoltaicos de modelo Trina Solar – TSM-450NE, conforme a Figura 19 e Tabela 4, com potência de 450 Wp cada, totalizando 32 kWp de potência instalada, e um inversor trifásico da modelo Fronius – FRONIUS ECO 25.0-3-S, com potência nominal de 25 kW, conforme a Figura 20 e Tabela 5.

Figura 18: Usina fotovoltaica 01 – Solo, Gravatá - PE



Fonte: Autor, 2025.

Figura 19: Módulo Trina Solar – TSM-450NE



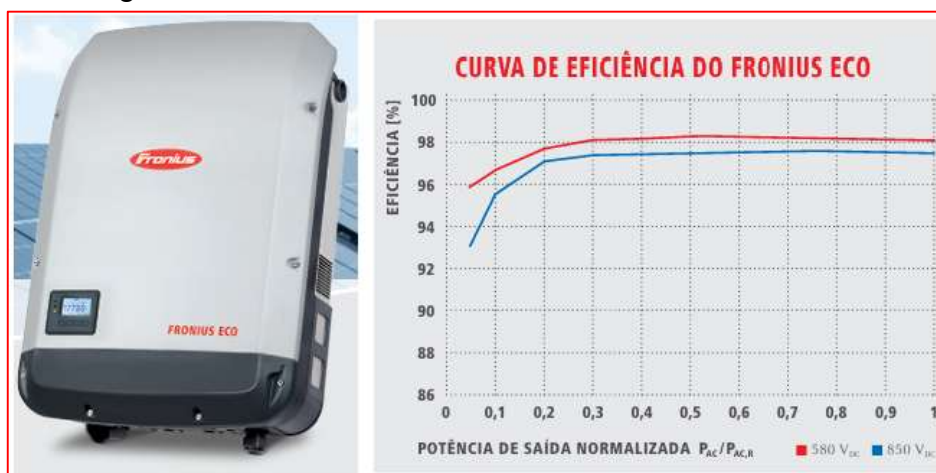
Fonte: Adaptado de [33].

Tabela 4: Parâmetros do módulo Trina Solar – TSM-450NE

| Dados Elétricos – TSM – 450MS | |
|-------------------------------|---------|
| Nominal Max. Power (Pmax) | 450 W |
| Opt. Operating Voltage (Vmp) | 44,6 V |
| Opt. Operating Current (Imp) | 10,09 A |
| Open Circuit Voltage (Voc) | 52,9 V |
| Short Circuit Current (Isc) | 10,74 A |
| Module Efficiency | 22,5% |

Fonte: Adaptado de [33].

Figura 20: Inversor Fronius – FRONIUS ECO 25.0-3-S



Fonte: Adaptado de [35].

Tabela 5: Parâmetros do Inversor Fronius – FRONIUS ECO 25.0-3-S

| Dados Elétricos – FRONIUS ECO 25.0-3-S | |
|---|----------------------------------|
| ENTRADA CC | |
| Máxima tensão de entrada FV | 1.000 V |
| Mínima tensão de entrada FV / Tensão de inicialização | 580 V |
| Tensão nominal de entrada FV | 580 V |
| Faixa de tensão MPP para potência nominal | 580 V – 850 V |
| Nº de entradas MPPT independentes | 6 |
| Nº de <i>strings</i> FV por MPPT | 1 |
| Máxima corrente CC de curto-circuito | 40 A * 9 |
| Máxima corrente CC por conector de entrada | 71,6 A |
| SAÍDA CA | |
| Potência ativa máxima (FP= 1) | 25.000 W |
| Potência aparente máxima | 25.000 VA |
| Máxima corrente de saída CA | 36,1 A |
| Tensão CA nominal | 3 / N / PE, 220/380V ou 230/400V |
| Distorção harmônica total (THD) | < 2% (à potência nominal) |
| Fases de alimentação/Conexão CA | 3/3-PE |
| Eficiência máxima/Eficiência europeia | 98,2%/98 % |

Fonte: Adaptado de [35].

Todo o plano de manutenção foi desenvolvido e executado com base no fluxograma conforme a Figura 12 e Quadro 2, seguindo a análise detalhada de cada não conformidade identificada na usina em estudo. As análises realizadas contemplaram os principais subsistemas da usina, incluindo o sistema elétrico, as *strings* de módulos fotovoltaicos, o inversor *string*, as estruturas de fixação, o sistema de aterramento e proteção, o ambiente de instalação e o desempenho do time de execução.

Para a execução das verificações e inspeções de campo, foram utilizados equipamentos de medição e diagnóstico conforme a Figura 21, sendo: (A) Multímetro digital para medições de tensão e continuidade elétrica; (B) Alicates amperímetro para aferição de correntes em corrente contínua e alternada e (C) Câmera termográfica para detecção de pontos de aquecimento e anomalias térmicas.

Figura 21: Principais instrumentos de medição utilizados para a verificação elétrica



Fontes: Autor, 2025.

- a) **Multímetro:** Instrumento de medição multifuncional utilizado para verificar diferentes grandezas elétricas, como tensão (V), corrente (A) e resistência (Ω), podendo também realizar testes de continuidade e diodos. É amplamente empregado em inspeções e diagnósticos de sistemas elétricos, permitindo a verificação de conformidade dos circuitos e detecção de falhas de conexão ou componentes danificados.
- b) **Alicate amperímetro:** Equipamento destinado à medição de corrente elétrica que circula em um condutor, sem necessidade de desconexão do circuito. Seu funcionamento baseia-se no princípio da indução eletromagnética, permitindo medições rápidas e seguras em sistemas CC e CA. É essencial em procedimentos de manutenção preventiva e verificação de desempenho de inversores e *strings* fotovoltaicas.
- c) **Câmera termográfica:** Dispositivo óptico que converte a radiação infravermelha emitida por um corpo em imagem térmica, possibilitando a visualização e análise da distribuição de temperatura em componentes elétricos e estruturais. É uma ferramenta indispensável na manutenção de sistemas fotovoltaicos, utilizada para identificar pontos de aquecimento anormais (*hotspots*), falhas em conexões, diodos de bypass defeituosos e desequilíbrios térmicos que possam comprometer o desempenho do sistema.

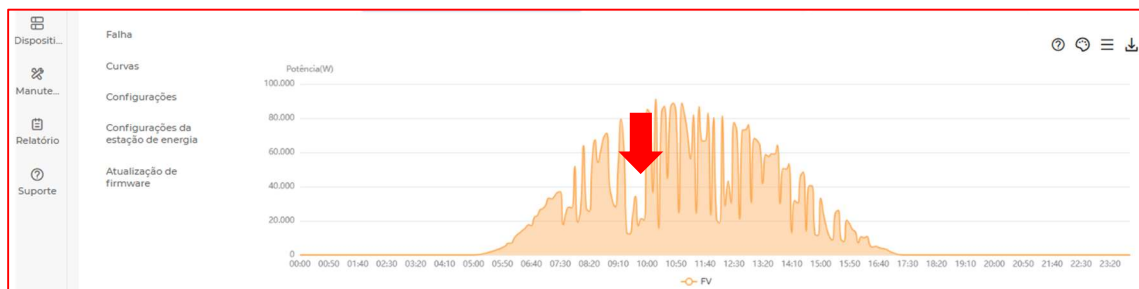
3.1.1 Diagnóstico do estudo de caso – Usina Fotovoltaica 01 – Rooftop em Paudalho

A configuração elétrica da Usina Fotovoltaica 01 apresenta fator de dimensionamento (FDI) de 1,025, indicando subaproveitamento da capacidade nominal do inversor. Essa condição pode reduzir gradualmente a geração ao longo do tempo. Além disso, por estar localizada na região Nordeste, área de alta irradiação e maior exposição a agentes ambientais, a usina apresenta, no monitoramento remoto, histórico de interrupções e anomalias operacionais, especialmente em horários de maior geração de energia (até às 12h), conforme mostrado na Figura 22. A Figura 23 apresenta alguns dos eventos de falha, enquanto a Figura 24 exhibe os avisos e notificações emitidos pelo *software* de monitoramento, incluindo recomendações

automáticas do fabricante para mitigação e tratamento das ocorrências, conforme a Figura 25.

Após a visita técnica realizada na Usina Solar Fotovoltaica 01, de 112,8 kWp, foram identificadas não conformidades operacionais que impactam diretamente a eficiência do sistema.

Figura 22: Interrupções e anomalias no processo de geração em horário de pico



Fonte: iSolarCloud, [32].

Figura 23: Eventos de falha registrados pelo software de monitoramento

| Nome do alarme | Alarme | Código de falha | Nome do dispositivo | Modelo | Data da ocorrência | Tempo de | Operação |
|--------------------|--------|-----------------|---------------------|---------|----------------------|-------------|----------|
| Subtensão da re... | Falha | 4 | SG110CX_001_001 | SG110CX | 10/jun/2025 05:17:47 | 10/jun/2025 | |
| Subtensão da re... | Falha | 4 | SG110CX_001_001 | SG110CX | 10/jun/2025 05:16:54 | 10/jun/2025 | |
| Queda da rede | Falha | 10 | SG110CX_001_001 | SG110CX | 09/jun/2025 10:24:09 | 09/jun/2025 | |
| Subtensão da re... | Falha | 4 | SG110CX_001_001 | SG110CX | 09/jun/2025 10:23:13 | 09/jun/2025 | |
| Subtensão da re... | Falha | 4 | SG110CX_001_001 | SG110CX | 08/jun/2025 06:20:58 | 08/jun/2025 | |
| Subtensão da re... | Falha | 4 | SG110CX_001_001 | SG110CX | 06/jun/2025 08:28:34 | 06/jun/2025 | |

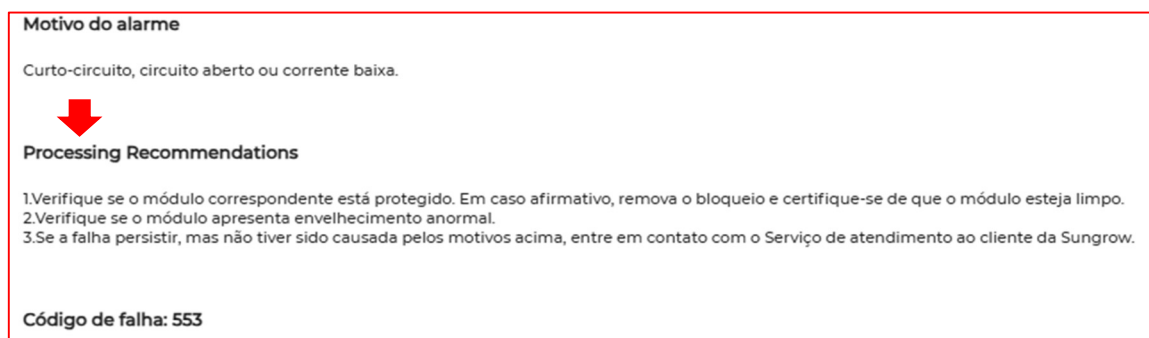
Fonte: iSolarCloud, [32].

Figura 24: Eventos de falha registrados pelo software de monitoramento

| Nome do alarme | Alarme | Código de falha | Nome do dispositivo | Modelo | Data da ocorrência | Tempo de | Operação |
|---------------------|--------|-----------------|---------------------|---------|----------------------|-------------|----------|
| Anomalias no arr... | Aviso | 553 | SG110CX_001_001 | SG110CX | 31/jul/2025 13:12:58 | 31/jul/2025 | |
| Anomalias no arr... | Aviso | 553 | SG110CX_001_001 | SG110CX | 31/jul/2025 13:04:37 | 31/jul/2025 | |
| Anomalias no arr... | Aviso | 553 | SG110CX_001_001 | SG110CX | 31/jul/2025 13:04:29 | 31/jul/2025 | |
| Anomalias no arr... | Aviso | 553 | SG110CX_001_001 | SG110CX | 31/jul/2025 12:51:58 | 31/jul/2025 | |
| Anomalias no arr... | Aviso | 553 | SG110CX_001_001 | SG110CX | 31/jul/2025 12:45:42 | 31/jul/2025 | |
| Anomalias no arr... | Aviso | 553 | SG110CX_001_001 | SG110CX | 31/jul/2025 12:45:37 | 31/jul/2025 | |

Fonte: iSolarCloud, [32].

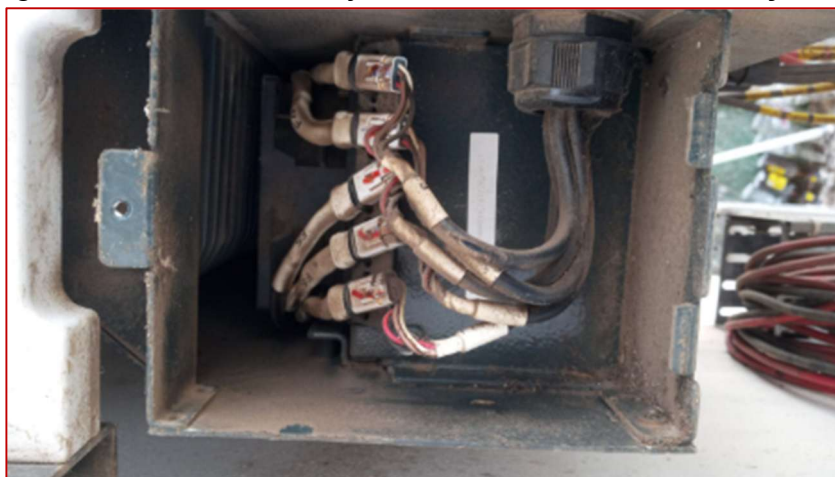
Figura 25: Recomendações de Processamento do fabricante



Fonte: iSolarCloud, [32].

Durante a visita técnica à usina solar, em relação ao sistema elétrico, foram identificadas falhas no cabeamento CA, possuindo excesso de sujeidade, conforme registrado na Figura 26.

Figura 26: Excesso de sujeidade nos cabos de alimentação CA



Fontes: Autor, 2025.

Para mitigar esse problema, propõe-se um plano de manutenção, conforme o Quadro 4, o qual inclui a inspeção semestral da situação do cabeamento CA e respectiva limpeza, conduzida por uma equipe de manutenção devidamente treinada.

Quadro 4: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Excesso de sujeidade nos cabos de alimentação CA

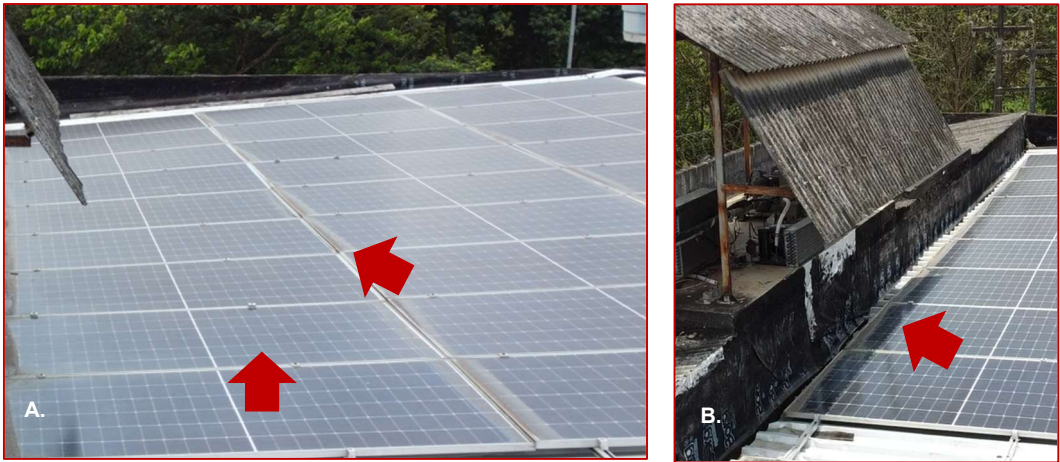
| 5W | | | | | 2H | |
|------------------|---|--|---|---|--|---------------------------|
| ONDE (WHERE?) | O QUÊ (WHAT?) | POR QUÊ (WHY?) | QUEM (WHO?) | QUANDO (WHEN?) | COMO (HOW?) | QUANTO CUSTA? (HOW MUCH?) |
| Onde fazer? | O que será feito? | Porque fazer? | Quem irá fazer? | Quando será feito? | Como será feito? | Quanto custará? |
| SISTEMA ELÉTRICO | | | | | | |
| Cabeamento | Desligar todo o sistema de alimentação da usina | Evitar falhas dos conectores e cabeamento do sistema | Equipe de manutenção devidamente treinada | Semestral ou assim que a falha na produtividade for percebida | Limpeza do cabeamento e medição com a utilização dos equipamentos de medição adequados | - |

Fontes: Autor, 2025.

Na distribuição das *strings* de módulos foram identificadas falhas que comprometem a eficiência do sistema e sua longevidade. A análise revelou situações críticas como *strings* com inclinação desregulada com módulos sob risco de acúmulo de água, e módulos expostos à sujeidade do ambiente e sombreamento constante conforme registrado na Figura 27 (A) *Strings* com inclinação desregulada, presença de sujeidade e incidência de acúmulo de água; (B) Módulo com exposição a sujeidade do ambiente e presença de sombreamento.

Para mitigar esses problemas, propõe-se um plano de manutenção, conforme o Quadro 5, o qual inclui a inspeção trimestral da limpeza e das conexões de cada *string*, conduzida por uma equipe de manutenção devidamente treinada. A inspeção visual deverá ser comparada aos dados iniciais da usina, assegurando a detecção precoce de falhas no sistema elétrico e garantindo a eficiência operacional contínua.

Figura 27: Verificação das strings de módulos



Fontes: Autor, 2025.

Quadro 5: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Verificação das strings de módulos

| 5W | | | | | 2H | |
|-----------------------------------|--|---|---|--|---|---------------------------|
| ONDE (WHERE?) | O QUÊ (WHAT?) | POR QUÊ (WHY?) | QUEM (WHO?) | QUANDO (WHEN?) | COMO (HOW?) | QUANTO CUSTA? (HOW MUCH?) |
| Onde fazer? | O que será feito? | Porque fazer? | Quem irá fazer? | Quando será feito? | Como será feito? | Quanto custará? |
| STRINGS DE MÓDULOS | | | | | | |
| Nos módulos de cada <i>string</i> | Monitorar a limpeza trimestral em casos de altos índices de sujidade | Garantir a máxima produtividade dos módulos | Equipe de manutenção devidamente treinada | Em seguida o monitoramento e após verificação dos erros de geração | Inspeção visual em comparação com dados iniciais da usina | - |

Fontes: Autor, 2025.

Acerca da distribuição do inversor *string* da usina fotovoltaica, foram observadas falhas destacando-se duas situações principais. A primeira refere-se à localização dos inversores, expostos a condições adversas como mofo e umidade excessiva, segundo a Figura 28 (A) Inversores em local com mofo e umidade excessiva. Já a segunda falha identificada foi o alto índice de sujidade no dissipador de calor do inversor, segundo a Figura 28 (B) alto índice de sujidade no dissipador de ar do inversor, o que pode comprometer sua eficiência.

Com base nessas falhas, foi proposto um plano de manutenção, conforme o Quadro 6, que inclui o monitoramento contínuo do painel de funcionamento dos inversores, pois é por meio desse painel que os erros na conversão de energia CC-CA são detectados, além da desobstrução dos dissipadores de calor do inversor, prevenindo superaquecimento. A equipe de manutenção, devidamente treinada, será responsável pela verificação, priorizando a substituição ou reparo dos componentes com falhas após a detecção via painel e a análise da garantia do equipamento.

Figura 28: Verificação do inversor On-Grid da usina fotovoltaica





Fontes: Autor, 2025.

Quadro 6: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Verificação do inversor On-Grid da usina fotovoltaica

| 5W | | | | | 2H | |
|-------------------|--|---|---|---|--|---------------------------|
| ONDE (WHERE?) | O QUÊ (WHAT?) | POR QUÊ (WHY?) | QUEM (WHO?) | QUANDO (WHEN?) | COMO (HOW?) | QUANTO CUSTA? (HOW MUCH?) |
| Onde fazer? | O que será feito? | Porque fazer? | Quem irá fazer? | Quando será feito? | Como será feito? | Quanto custará? |
| INVERSORES STRING | | | | | | |
| Inversor string | Monitoramento do painel de funcionamento do inversor | Os erros na conversão de energia CC em CA são mostrados pelo painel do inversor | Equipe de manutenção devidamente treinada | Em seguida o reset dos alertas após verificação técnica das causas previamente registradas, podendo ser verificada a presença de superaquecimento | Verificação da garantia do equipamento e devida troca dos elementos ou limpeza do dissipador de calor. | - |

Fontes: Autores, 2025.

3.1.2 Diagnóstico do estudo de caso – Usina 02 – Solo em Paudalho

O Plano de manutenção da Usina Fotovoltaica 02, também partiu do histórico de falhas no processo de geração de energia, conforme mostrado na Figura 29. A Figura 30 apresenta alguns dos eventos de falha, emitidos pelo *software* de monitoramento. Após a visita técnica realizada na SFV de 95,3 kWp, foram identificadas não conformidades operacionais que impactam diretamente a eficiência do sistema.

Figura 29: Interrupções e anomalias no processo de geração em horário de pico



Fonte: iSolarCloud, [32].

Figura 30: Eventos de falha registrados pelo software de monitoramento

| | | | | | | | | |
|--------------|-------------------------------------|--------------------|----------------|-----------------|---------------------|--------|----------------------|-------------|
| Dispositivos | Falha | jun/2025 | Nome do alarme | Código de falha | Buscar | Filtro | | |
| | Curvas | Nome do alarme | Nome do alarme | Código de falha | Nome do dispositivo | Modelo | Data da ocorrência | Tempo de r |
| | Configurações | Subtensão da re... | Falha | 4 | Inverter1 | SG75CX | 08/jun/2025 06:24:39 | 08/jun/2025 |
| | Configurações da estação de energia | Subtensão da re... | Falha | 4 | Inverter1 | SG75CX | 08/jun/2025 06:24:15 | 08/jun/2025 |
| | Atualização de firmware | Subtensão da re... | Falha | 4 | Inverter1 | SG75CX | 08/jun/2025 06:20:56 | 08/jun/2025 |

Fonte: iSolarCloud, [32].

Durante a visita técnica à UFV, em relação ao sistema elétrico, foram identificados pontos críticos de sombreamento por meio da vegetação natural do local de instalação, colaborando para um excesso de sujidade e incidência de pontos quentes devido ao sombreamento, conforme registrado na Figura 31.

Figura 31: Excesso de sujidade nos cabos de alimentação CA



Fontes: Autor, 2025.

Para mitigar esse problema, propõe-se um plano de manutenção, conforme o Quadro 7, o qual inclui a inspeção semestral da situação do cabeamento CA e respectiva limpeza, conduzida por uma equipe de manutenção devidamente treinada.

Quadro 7: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Excesso de sujidade nos cabos de alimentação CA

| 5W | | | | | 2H | |
|-----------------------------------|--|---|---|--|---|---------------------------|
| ONDE (WHERE?) | O QUÊ (WHAT?) | POR QUÊ (WHY?) | QUEM (WHO?) | QUANDO (WHEN?) | COMO (HOW?) | QUANTO CUSTA? (HOW MUCH?) |
| Onde fazer? | O que será feito? | Porque fazer? | Quem irá fazer? | Quando será feito? | Como será feito? | Quanto custará? |
| MÓDULOS | | | | | | |
| Nos módulos de cada <i>string</i> | Monitorar a limpeza trimestral em casos de altos índices de sujidade | Garantir a máxima produtividade dos módulos | Equipe de manutenção devidamente treinada | Em seguida o monitoramento e após verificação dos erros de geração | Inspeção visual em comparação com dados iniciais da usina | - |

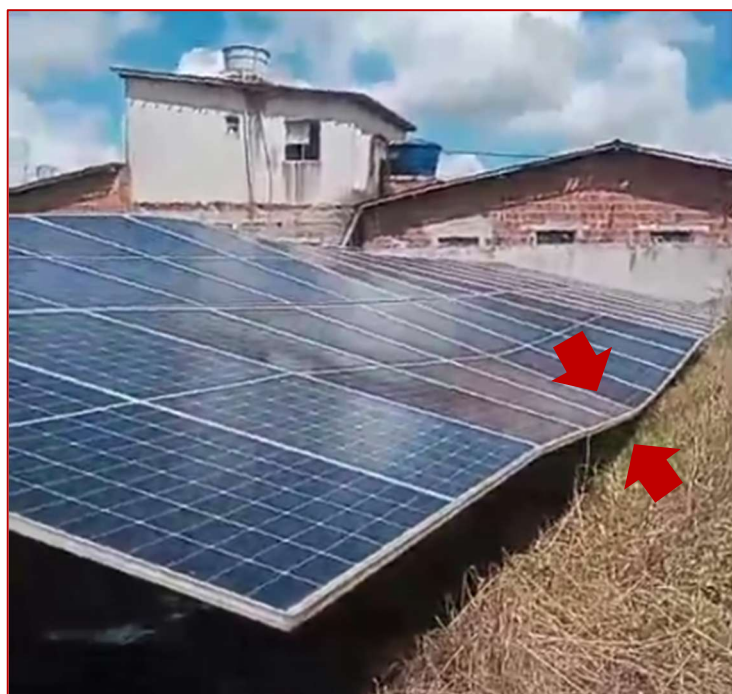
Fontes: Autor, 2025.

No que diz respeito a distribuição das *strings*, foram identificadas falhas de alinhamento que comprometem a eficiência do sistema e sua longevidade. A análise revelou situações críticas como inclinação desregulada com módulos sob risco de acúmulo de água, sujeidade e sombreamento por vegetação natural, conforme registrado na Figura 32.

Essa condição gera impactos significativos no desempenho do sistema, uma vez que o aumento das tensões mecânicas sobre perfis, suportes e fixadores acelera processos de fadiga, pode provocar afrouxamento de conexões e favorece a formação de pontos de corrosão devido ao acúmulo de água em áreas deformadas.

Para mitigar esses problemas, propõe-se um plano de manutenção, conforme o Quadro 9, o qual inclui a inspeção visual de forma trimestral das estruturas de fixação de cada *string* que compõe a usina fotovoltaica, conduzida por uma equipe de manutenção devidamente treinada. A inspeção visual deverá ser comparada aos dados iniciais da usina, assegurando a detecção precoce de desalinhamentos, garantindo a eficiência operacional contínua durante a vida útil do sistema.

Figura 32: Verificação das strings de módulos



Fontes: Autor, 2025.

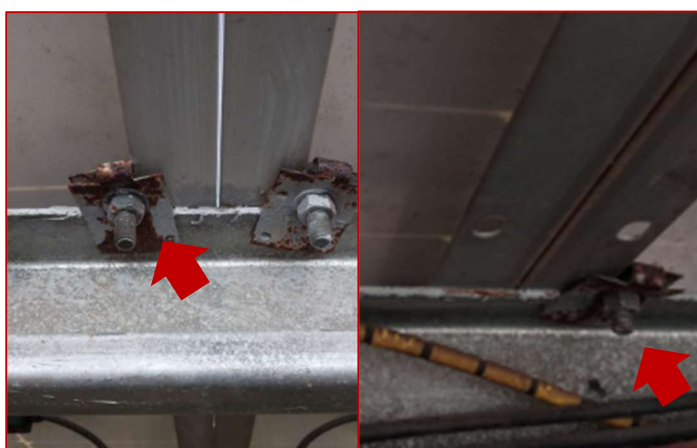
Quadro 8: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Verificação das strings de módulos

| 5W | | | | | 2H | |
|----------------------------|--|---|--|---|--|---------------------------|
| ONDE (WHERE?) | O QUÊ (WHAT?) | POR QUÊ (WHY?) | QUEM (WHO?) | QUANDO (WHEN?) | COMO (HOW?) | QUANTO CUSTA? (HOW MUCH?) |
| Onde fazer? | O que será feito? | Porque fazer? | Quem irá fazer? | Quando será feito? | Como será feito? | Quanto custará? |
| STRINGS DE MÓDULOS | | | | | | |
| Nos módulos de cada string | 1 - Correção da inclinação e realinhamento estrutural das strings. 2 - Verificação e reforço dos suportes de fixação. | Restabelecer o alinhamento adequado, evitar acúmulo de água e sujeidade, eliminar sombreamento, prevenir danos estruturais e recuperar a eficiência energética e a confiabilidade da usina. | Equipe técnica de manutenção fotovoltaica certificada; supervisão do responsável técnico da usina. | Ação corretiva imediata (até 30 dias após identificação) e inspeções trimestrais preventivas. | 1 - Realinhamento manual dos módulos conforme especificações do fabricante; 2 - Nivelamento da estrutura de suporte; 3 - Registro fotográfico antes e depois da intervenção; 4 - Atualização do banco de dados de manutenção. | - |

Fontes: Autor, 2025.

No que diz respeito aos fixadores dos módulos, foram observados muitos pontos de oxidação ao longo das *strings*, segundo a Figura 33. Com base nessas falhas, foi proposto um plano de manutenção, conforme o Quadro 9, a oxidação dos fixadores (parafusos, arruelas e placas de ancoragem) nas estruturas fotovoltaicas representa um risco significativo à integridade mecânica e elétrica da usina. A equipe de manutenção, devidamente treinada, será responsável pela verificação, priorizando a substituição ou reparo dos componentes com falhas após a detecção via painel e a análise da garantia do equipamento.

Figura 33: Verificação do inversor On-Grid da usina fotovoltaica



Fontes: Autor, 2025.

Quadro 9: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Verificação do inversor On-Grid da usina fotovoltaica

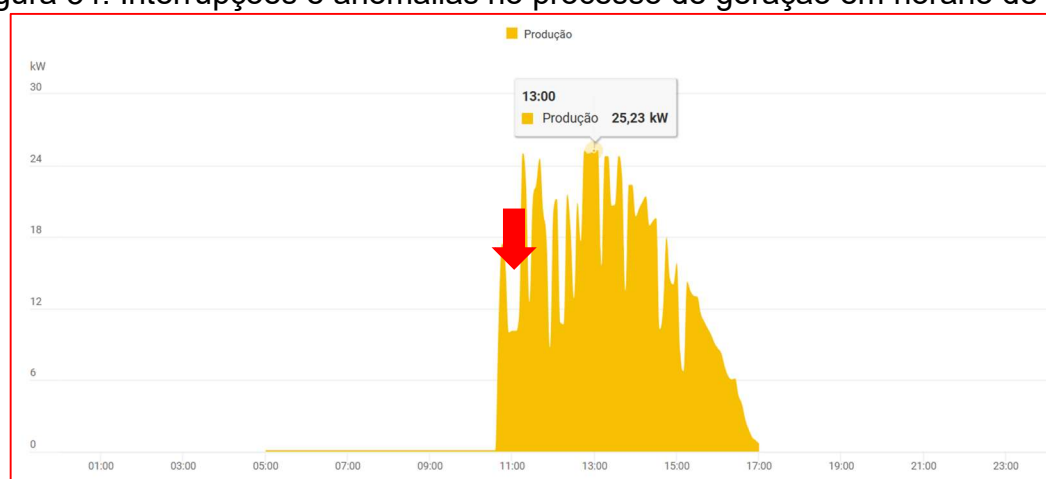
| 5W | | | | | 2H | |
|----------------------|--|--|---|--|--|---------------------------|
| ONDE (WHERE?) | O QUÊ (WHAT?) | POR QUÊ (WHY?) | QUEM (WHO?) | QUANDO (WHEN?) | COMO (HOW?) | QUANTO CUSTA? (HOW MUCH?) |
| Onde fazer? | O que será feito? | Porque fazer? | Quem irá fazer? | Quando será feito? | Como será feito? | Quanto custará? |
| ESTRUTURA DE FIXAÇÃO | | | | | | |
| String de módulos | 1 - Substituição dos fixadores oxidados. 2 - Aplicação de tratamento anticorrosivo. 3 - Inspeção e reaperto das estruturas adjacentes. | Evitar falhas mecânicas, queda de módulos, desalinhamento das <i>strings</i> , perdas de eficiência e riscos de segurança. | Equipe técnica de manutenção estrutural e elétrica, supervisionada pelo responsável técnico da usina. | Correção imediata (até 15 dias após identificação) e revisão semestral preventiva. | 1 - Substituição dos parafusos, arruelas e presilhas por peças galvanizadas ou em aço inox; 2 - Aplicação de proteção anticorrosiva nas áreas expostas; 3 - Reaperto e nivelamento da estrutura; 4 - Registro documental e fotográfico da troca; 5 - Atualização do histórico de manutenção. | - |

Fontes: Autores, 2025.

3.1.3 Diagnóstico do estudo de caso – Usina 03 – Solo em Gravatá

Após a visita técnica realizada na Usina Solar Fotovoltaica 03, de 32 kWp, foram identificadas não conformidades operacionais que impactam diretamente a eficiência do sistema, a Figura 34 mostra a instabilidade do gráfico de geração do sistema.

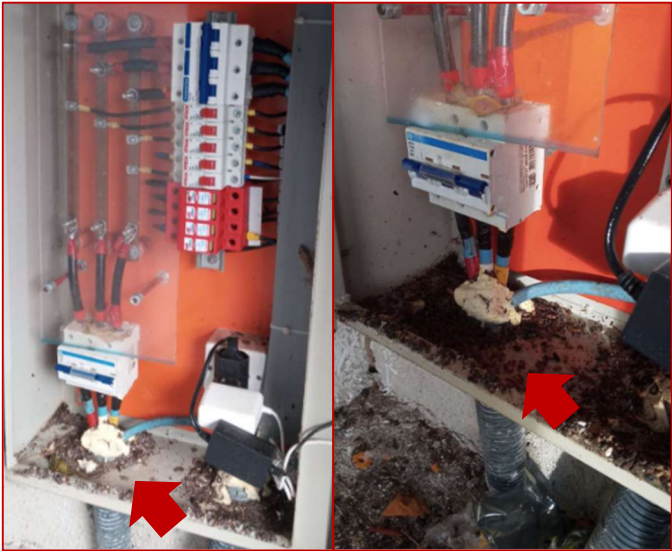
Figura 34: Interrupções e anomalias no processo de geração em horário de pico



Fonte: iSolarCloud, [35].

Durante a visita técnica à UFV, em relação ao sistema elétrico, foi identificada a presença de sujeira e insetos mortos acumulados no quadro de medição, representando uma combinação de riscos elétricos, térmicos e operacionais, conforme registrado na Figura 35.

Figura 35: Excesso de sujeira nos cabos de alimentação CA



Fontes: Autor, 2025.

Para mitigar esse problema, propõe-se um plano de manutenção, conforme o Quadro 10, o qual inclui a inspeção semestral da situação do cabeamento CA e respectiva limpeza, conduzida por uma equipe de manutenção devidamente treinada.

Quadro 10: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Excesso de sujeira nos cabos de alimentação CA

| 5W | | | | | 2H | |
|-----------------------------------|--|---|--|---|---|---------------------------|
| ONDE (WHERE?) | O QUÊ (WHAT?) | POR QUÊ (WHY?) | QUEM (WHO?) | QUANDO (WHEN?) | COMO (HOW?) | QUANTO CUSTA? (HOW MUCH?) |
| Onde fazer? | O que será feito? | Porque fazer? | Quem irá fazer? | Quando será feito? | Como será feito? | Quanto custará? |
| SISTEMA ELÉTRICO | | | | | | |
| No quadro de medição do inversor. | 1 - Limpeza completa do quadro e do inversor; 2 -Remoção de insetos e resíduos. | Evitar curto-circuito, redução de eficiência do inversor, riscos de incêndio e garantir o funcionamento seguro e contínuo do sistema. | Equipe técnica de manutenção especializada em sistemas fotovoltaicos e eletricitas certificados. | Intervenção imediata (em até 7 dias após identificação) e manutenção preventiva trimestral. | 1 - Limpeza interna com ferramentas não condutivas; 2 - Aspiração técnica de partículas e insetos morte; 3 - Checagem dos bornes, reaperto e inspeção termográfica; 4 - Aplicação de espuma expansiva ou buchas para vedar entradas de insetos; 5 - Registro fotográfico do antes e depois. | - |

Fontes: Autor, 2025.

Na distribuição das *strings* de módulos foi identificada a presença de envergadura (flecha) e descasamento no alinhamento dos módulos, decorrentes do excessivo vão entre pilares da estrutura, ocasionando deformações nos trilhos de fixação, conforme registrado na Figura 36. Diante disso, a gravidade pode variar de moderada a alta conforme o nível de curvatura e sinais elétricos associados, sendo

recomendado o imediato reforço estrutural, inspeções detalhadas, ensaios elétricos (termografia e curvas I-V) e monitoramento contínuo para garantir a integridade e o desempenho do sistema fotovoltaico.

Para mitigar esses problemas, propõe-se um plano de manutenção, conforme o Quadro 11, o qual inclui a inspeção trimestral da limpeza e das conexões de cada *string*, conduzida por uma equipe de manutenção devidamente treinada. A inspeção visual deverá ser comparada aos dados iniciais da usina, assegurando a detecção precoce de falhas no sistema elétrico e garantindo a eficiência operacional contínua.

Figura 36 Verificação das strings de módulos



Fontes: Autor, 2025.

Quadro 11: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Verificação das strings de módulos

| 5W | | | | | 2H | |
|--|--|--|--|--|---|---------------------------|
| ONDE (WHERE?) | O QUÊ (WHAT?) | POR QUÊ (WHY?) | QUEM (WHO?) | QUANDO (WHEN?) | COMO (HOW?) | QUANTO CUSTA? (HOW MUCH?) |
| Onde fazer? | O que será feito? | Porque fazer? | Quem irá fazer? | Quando será feito? | Como será feito? | Quanto custará? |
| STRINGS DE MÓDULOS | | | | | | |
| Nas <i>strings</i> onde há grande distância entre pilares. | Reforço estrutural e realinhamento dos trilhos/ módulos, incluindo verificação de fixações, redução do vão e instalação de suportes adicionais conforme necessidade. | Eliminar a deflexão da estrutura que causa desalinhamento, risco de microfissuras, <i>hotspots</i> , perdas por <i>mismatch</i> e danos mecânicos que comprometem a eficiência e segurança do sistema. | Equipe de manutenção especializada em estruturas fotovoltaicas | Intervenção imediata (corretiva) dentro de 15 dias, com acompanhamento e verificação final após 30 dias. | 1 - Medição da flecha existente e reaperto dos fixadores; 2 - Instalação de travamentos ou novos pilares intermediários; 3 - Efetuar o realinhamento dos módulos 4 - Inspeção termográfica pós-intervenção 5 - Registro fotográfico e relatório técnico | - |

Fontes: Autor, 2025.

Sobre o inversor *string* da usina fotovoltaica, foi identificado um acúmulo expressivo de sujeira composto por poeira, insetos mortos e detritos orgânicos concentrados nos dutos de ventilação, nas aletas do dissipador térmico e no próprio cooler. Essa obstrução comprometeu diretamente o processo de refrigeração do

equipamento, reduzindo drasticamente o fluxo de ar necessário para a troca térmica e provocando elevação anormal da temperatura interna.

Como consequência, o inversor passou a operar sob condições de sobreaquecimento, aumentando a probabilidade de acionamento das proteções térmicas, ocorrência de *derating* (redução automática de potência) e aceleração do desgaste dos componentes eletrônicos internos, especialmente capacitores e drivers de potência.

O acúmulo de resíduos também prejudica a rotação do cooler, podendo resultar em travamento parcial ou total do ventilador, amplificando ainda mais o risco de falha térmica e comprometendo tanto a eficiência operacional quanto a vida útil do inversor, segundo a Figura 37. Com base nessas falhas, foi proposto um plano de manutenção, conforme o Quadro 12, que considera o mau funcionamento do cooler no inversor

Figura 37: Refrigeração do inversor On-Grid da usina fotovoltaica 03



Fontes: Autor, 2025.

Quadro 12: Aspectos do Plano de Ação 5W2H - Refrigeração do inversor On-Grid da usina fotovoltaica

| 5W | | | | | 2H | |
|---|--|---|--|---|---|---------------------------|
| ONDE (WHERE?) | O QUÊ (WHAT?) | POR QUÊ (WHY?) | QUEM (WHO?) | QUANDO (WHEN?) | COMO (HOW?) | QUANTO CUSTA? (HOW MUCH?) |
| Onde fazer? | O que será feito? | Porque fazer? | Quem irá fazer? | Quando será feito? | Como será feito? | Quanto custará? |
| INVERSORES STRING | | | | | | |
| No interior do inversor, especialmente nos dissipadores, cooler, dutos de ventilação e circuitos de exaustão. | 1 - Limpeza completa do sistema de ventilação; 2 - Desobstrução dos dissipadores; 3 - Teste funcional do cooler/ substituição caso necessário. | Restabelecer o fluxo térmico adequado, evitar sobreaquecimento, impedir redução de potência (derating) e prolongar a vida útil do inversor. | Equipe de manutenção especializada em inversores <i>string</i> . | Correção imediata (máximo 48 horas após diagnóstico) e manutenção preventiva semestral. | 1 - Desmontagem parcial para acesso ao cooler e dissipadores; 2 - Limpeza com ar comprimido técnico e pincéis antiestáticos; 3 - Teste de rotação e amperagem do cooler / substituição do cooler se apresentar vibração, ruído ou rotações inconsistentes; 4 - Reaplicação de tela contra insetos nos dutos; 5 - Registro detalhado em relatório técnico. | - |

Fontes: Autor, 2025.

3.2 Discussão dos resultados

A análise comparativa e detalhada das três usinas fotovoltaicas estudadas neste trabalho evidencia que o conjunto de falhas identificadas (elétricas, estruturais, ambientais e operacionais) apresenta natureza recorrente e diretamente associada à ausência de um plano de manutenção sistemático, bem como a fragilidades no processo de instalação e na gestão operacional ao longo do ciclo de vida das plantas fotovoltaicas. O plano de manutenção proposto, estruturado a partir do Plano de Ação 5W2H e fundamentado em inspeções orientadas pelos dados de campo e pela aplicação de ferramentas de diagnóstico, como o Diagrama de Ishikawa, demonstrou-se eficaz ao estabelecer diretrizes claras, cronogramas coerentes e intervenções compatíveis com as necessidades específicas de cada usina.

Nas três usinas avaliadas, verificou-se um padrão de anomalias que reforça a importância da manutenção preventiva e preditiva: altas taxas de sujeira em módulos e cabeamentos; desalinhamento de *strings*; inclinações inadequadas que favorecem acúmulo de água e pontos de sombreamento; oxidação de fixadores; falhas térmicas associadas à obstrução de dissipadores e dutos de ventilação; e presença crítica de insetos e material orgânico em quadros elétricos e inversores.

Além disso, foi evidenciada a ocorrência de desligamentos do inversor concentrados no período próximo ao pico de geração no turno da manhã, sem repetição do fenômeno no período da tarde, indica que a causa do evento não está associada exclusivamente ao perfil de potência da geração fotovoltaica. Embora a curva de geração apresente comportamento aproximadamente parabólico ao longo do dia, a ausência de desligamentos no período vespertino sugere a influência de fatores externos à geração, em especial aqueles relacionados às condições da rede elétrica no ponto de conexão da usina.

No período da manhã, a combinação entre elevada irradiância solar e baixa demanda de carga na rede de distribuição tende a provocar elevação da tensão no ponto de acoplamento comum (PAC), uma vez que o excedente de potência ativa injetado pelo sistema fotovoltaico não é imediatamente absorvido pelas cargas locais. Essa condição pode levar à atuação das proteções internas do inversor, que interrompem a operação quando os limites normativos de tensão são ultrapassados, resultando no desligamento observado. Por outro lado, no período da tarde, apesar da redução gradual da irradiância, ocorre simultaneamente o aumento da demanda da rede, especialmente em função do uso intensivo de cargas como sistemas de climatização e equipamentos comerciais, o que contribui para a estabilização dos níveis de tensão e impede a repetição do desligamento do inversor.

Dessa forma, o comportamento assimétrico observado entre os períodos da manhã e da tarde reforça a hipótese de que os desligamentos estão fortemente associados às condições da rede elétrica e não apenas à potência instantânea gerada pelo sistema fotovoltaico, evidenciando a necessidade de uma análise integrada entre geração e características da rede de distribuição.

Nesse contexto, a análise do log de falhas do sistema revelou a ocorrência de eventos relacionados a desvios dos parâmetros elétricos no lado de corrente alternada, com destaque para registros de subtensão da rede em determinados intervalos de operação. Esse tipo de falha está diretamente associado às condições da rede de distribuição e pode impactar de forma significativa a curva de geração do sistema fotovoltaico, uma vez que os inversores operam dentro de limites rigorosos de tensão e frequência estabelecidos por normas técnicas e requisitos de conexão à rede.

Os registros de subtensão indicam que, em determinados momentos, a tensão no ponto de acoplamento comum ficou abaixo dos valores admissíveis para operação contínua do inversor, levando à atuação dos mecanismos de proteção e ao desligamento temporário do equipamento. Esse comportamento evidencia que parte das interrupções observadas na curva de geração não está relacionada a falhas nos módulos fotovoltaicos ou no circuito de corrente contínua, mas sim a condições adversas impostas pela rede elétrica à qual o sistema está conectado.

Além disso, a presença de falhas no lado CA reforça a importância da verificação sistemática dos parâmetros da rede, incluindo medições de tensão, análise de qualidade de energia e avaliação da conformidade com os limites estabelecidos pelo PRODIST. A ausência de monitoramento contínuo desses parâmetros pode dificultar a identificação precisa das causas dos desligamentos e levar a diagnósticos incompletos ou imprecisos. Assim, os resultados obtidos indicam que ações corretivas voltadas exclusivamente ao lado CC seriam insuficientes para eliminar as falhas observadas, sendo necessária uma abordagem integrada que considere simultaneamente a geração fotovoltaica e o comportamento da rede de distribuição.

Na Usina Fotovoltaica 01, a análise técnica realizada evidencia que a performance global do sistema está diretamente condicionada à qualidade das práticas de manutenção implementadas e ao controle sistemático das variáveis ambientais e operacionais. O diagnóstico identificou que as principais não conformidades, tais como acúmulo de sujeira nos cabos de alimentação CA, desalinhamento e sombreamento nas *strings* de módulos, além da inadequação do ambiente de instalação dos inversores, possuem natureza predominantemente operacional e preventiva, refletindo a ausência de um plano de manutenção estruturado e contínuo.

Assim, a análise evidencia ainda que a integração entre o diagnóstico técnico, o planejamento estratégico de manutenção e o controle de indicadores de desempenho como o PR constitui um eixo fundamental para a gestão eficiente de sistemas fotovoltaicos. A consolidação dessas práticas tende a elevar o rendimento energético global, otimizar o retorno econômico do investimento e prolongar a vida útil dos equipamentos, garantindo a sustentabilidade técnica e operacional da usina a longo prazo.

Na Usina Fotovoltaica 02, do ponto de vista elétrico, a presença de sujeira intensa sobre os módulos e conexões aumenta a resistência série equivalente e provoca perdas por *mismatch*, reduzindo a eficiência global de conversão. O sombreamento parcial, característico da usina devido ao crescimento irregular da vegetação, causa disparidade na corrente das *strings* e favorece a formação de *hotspots*, fenômeno crítico que acelera a degradação de células e compromete a integridade dos módulos fotovoltaicos.

No aspecto estrutural, foram identificados desalinhamentos significativos nas *strings*, além de pontos de corrosão e fixadores enfraquecidos, o que indica dificuldades tanto no processo de instalação quanto na ausência de inspeções mecânicas periódicas. Esses fatores aumentam a probabilidade de microfissuras, afrouxamento de conexões e deformações mecânicas ao longo do tempo.

Em síntese, a Usina Fotovoltaica 02 apresenta grande potencial de otimização de desempenho, desde que implementadas medidas sistemáticas de inspeção, controle de vegetação e correção estrutural. A consolidação dessas ações contribuirá para restaurar o rendimento energético esperado a longo prazo.

A Usina Fotovoltaica 03 destacou-se por apresentar um conjunto de situações críticas de natureza térmica, estrutural e operacional, indicando um cenário de vulnerabilidade maior quando comparada às outras duas usinas do estudo. Os desafios observados, como acúmulo expressivo de sujeira interna no inversor, obstrução de dutos de ventilação, acúmulo de insetos mortos, defeitos no cooler e deformações acentuadas nos trilhos das estruturas devido ao vão excessivo entre pilares, representam riscos diretos à integridade do sistema.

Do ponto de vista térmico, o bloqueio parcial ou total do fluxo de ar no sistema de ventilação dos inversores comprometeu a troca térmica e favoreceu o superaquecimento dos componentes eletrônicos internos. Esse cenário eleva drasticamente a corrente térmica reversa nos componentes semicondutores, acelera a degradação das placas internas e aumenta a ocorrência de *derating* ou desligamentos automáticos, fenômeno confirmado pelos dados de monitoramento remoto.

No âmbito estrutural, a envergadura (flecha) dos trilhos devido ao vão excessivo entre pilares representa uma falha grave de engenharia, pois gera tensões mecânicas

irregulares nos módulos, provoca desalinhamento e descasamento das superfícies, e potencializa microfissuras e falhas de contato elétrico. Essa condição, somada à oxidação dos fixadores, configura um risco de falha estrutural progressiva e pode comprometer a segurança operacional da planta.

Conclui-se que a Usina Fotovoltaica 03 requer intervenções mais profundas e estruturais do que as demais, sendo indispensável a implementação rigorosa do plano de manutenção proposto para evitar danos permanentes, questões relacionadas com a operação do sistema e riscos de segurança. A correção dessas falhas permitirá recuperar a eficiência energética da planta e garantir maior estabilidade operacional.

Um dos aspectos mais relevantes discutidos neste estudo refere-se à sujidade acumulada, presente tanto nos módulos fotovoltaicos quanto nos componentes elétricos internos, como quadros de medição, cabeamentos CA e dissipadores de calor dos inversores. Em todas as usinas, a sujidade se mostrou um fator crítico, resultando em perdas por obstrução da irradiância, aumento da resistência de contato, risco de curto-circuito e não conformidades térmicas. A presença excessiva de poeira, insetos mortos e resíduos orgânicos nos dutos de ventilação dos inversores, especialmente identificada na Usina 03, reforça a necessidade de rotinas de limpeza adequadas e periódicas, destacando que a contaminação interna dos equipamentos compromete severamente o processo de dissipação térmica e, conseqüentemente, a vida útil dos componentes eletrônicos.

Outro ponto relevante na discussão foi a presença de anomalias estruturais, principalmente desalinhamentos, envergadura dos trilhos e oxidação de fixadores. Nas Usinas 01 e 02, a inclinação inadequada dos módulos favorece o acúmulo de água, conforme observado na inspeção técnica e formação de *hotspots*, indicando um problema de manutenção, mas também possível fragilidade na execução da obra e na fiscalização técnica da instalação.

Na Usina 03, a deformação dos trilhos devido ao vão excessivo entre pilares revelou um problema estrutural de maior complexidade, capaz de comprometer a integridade mecânica da estrutura, gerar microfissuras nos módulos e intensificar desconexões elétricas. Em termos de segurança, a deformação estrutural aumenta o risco de desprendimento de componentes, vibração por ação do vento e possíveis danos a cabos e conectores, elevando a chance de complicações elétricas críticas.

Operacionalmente, essa falha contribui para maior demanda de manutenção corretiva, aumento de custos, risco de perda de garantia e redução direta da produção de energia, impactando a receita da usina fotovoltaica. Esses achados reforçam a importância da conformidade mecânica e da aderência às diretrizes de instalação recomendadas pelos fabricantes e normas técnicas, como a ABNT NBR 16690:2019, NBR 16274:2014 e IEC 62446.

Os dados de monitoramento remoto também mostraram incidências recorrentes nos períodos de maior irradiação, refletindo problemas que vão desde superaquecimento dos inversores até interrupções por obstáculos na comunicação ou erros internos de conversão CC-CA. A presença sistemática desses eventos, observada nas três usinas, indica não apenas inconsistências operacionais, mas também a necessidade de uma análise mais robusta de confiabilidade e do uso estratégico dos sistemas de monitoramento, que, embora disponíveis, não estavam sendo interpretados nem tratados com a devida urgência.

Com a aplicação das ferramentas da qualidade, foi possível correlacionar as causas raízes das falhas com seus efeitos operacionais, permitindo estruturar um plano de manutenção de caráter preventivo e detectivo. As propostas de inspeções periódicas, medições elétricas e análises termográficas visam não apenas corrigir as lacunas existentes, mas também estabelecer um ciclo contínuo de monitoramento de desempenho.

Sob a ótica da engenharia de manutenção, o estudo reforça que a adoção de rotinas planejadas, aliadas ao uso de instrumentos de medição e diagnóstico adequados, é determinante para a confiabilidade e disponibilidade operacional da usina. O estabelecimento de intervalos fixos de inspeção proporciona previsibilidade às ações de campo e reduz a probabilidade de paradas não programadas. Além disso, a correta capacitação da equipe técnica é fator essencial para garantir a execução segura e precisa das intervenções.

A discussão evidencia ainda a importância do fator humano na qualidade das instalações fotovoltaicas. Problemas associados à equipe de execução foram identificados nas três UFVs, com impactos diretos no sombreamento interno das *strings* e na qualidade das conexões elétricas. Esse achado demonstra que a qualificação técnica da equipe é um elemento determinante para a longevidade e

eficiência do sistema, e confirma a necessidade de treinamentos contínuos, certificações e conformidade com as normas regulamentadoras (NR-10 e NR-35).

É fundamental que todo o serviço de manutenção seja realizado por uma equipe devidamente especializada, que desligará o sistema de alimentação para evitar irregularidades futuras, utilizando equipamentos de medição adequados, conforme mostrado na Figura 21 (A, B e C). Essa intervenção deverá ocorrer imediatamente ao perceber-se queda de produtividade no sistema, prevenindo danos maiores e garantindo a operação segura para as três usinas fotovoltaicas analisadas neste estudo. Ainda no que diz respeito ao time de execução da instalação da usina, foram identificadas falhas na correta instalação dos módulos, ocasionando o sombreamento e o comprometimento das *strings*.

Com base nessas objeções, propõe-se um plano de manutenção conforme o Quadro 13, que inclui a certificação do tempo de execução antes do início das atividades, garantindo que uma equipe possua todos os requisitos necessários para instalar e operar a usina, prevenindo trincas nos módulos e acidentes de trabalho. A convocação e supervisão da equipe serão realizadas pelo engenheiro responsável, com a certificação das normas regulatórias para trabalho em eletricidade e altura, antes do início das atividades de instalação.

Quadro 13: Aspectos do Plano de Ação 5W2H – Time de execução

| 5W | | | | | 2H | |
|---|---|--|---|---|--|------------------------------------|
| ONDE (WHERE?) | O QUÊ (WHAT?) | POR QUÊ (WHY?) | QUEM (WHO?) | QUANDO (WHEN?) | COMO (HOW?) | QUANTO CUSTA? (HOW MUCH?) |
| Onde fazer? | O que será feito? | Porque fazer? | Quem irá fazer? | Quando será feito? | Como será feito? | Quanto custará? |
| MÓDULOS | | | | | | |
| Time de execução/ instalação da usina | Certificação de que o time de execução possui os requisitos necessário para instalar e operar a usina | Evitar trincas durante a instalação dos módulos e acidentes de conexão e de trabalho | Engenheiro responsável pela convocação do time de execução do serviço | Antes de serem iniciadas as atividades de instalação da usina | Certificação de que todo o time esteja capacitado com as NR's necessárias para o trabalho com eletricidade em altura | - |

Fontes: Autores, 2025.

De forma prática, conclui-se que o plano de manutenção elaborado é eficaz, pois aborda todas as não conformidades identificadas de maneira objetiva, prioriza ações corretivas imediatas em pontos críticas e estabelece rotinas preventivas que atendem às exigências normativas e às boas práticas recomendadas por fabricantes de inversores, módulos e estruturas.

A implementação fiel do plano, em parceria com a empresa responsável, permitirá ganhos expressivos na confiabilidade, na eficiência energética e na segurança operacional das usinas, prolongando a vida útil dos componentes e garantindo a continuidade da geração. Dessa forma, a eficiência de um sistema fotovoltaico não depende exclusivamente da qualidade dos equipamentos instalados, mas da sinergia entre projeto, instalação, manutenção, monitoramento e operação.

Os três casos analisados demonstram de forma inequívoca que erros aparentemente pequenos, como sujeira acumulada ou fixadores oxidados, evoluem rapidamente para problemas significativos, quando não tratados tempestivamente. Da mesma forma, anomalias estruturais ou térmicas, quando não detectadas precocemente, elevaram os riscos de forma grave.

As ações propostas apresentam aderência às melhores práticas da engenharia de manutenção e às normas técnicas vigentes, ao mesmo tempo em que respondem de forma direta às causas raízes identificadas nas visitas técnicas. A implementação dessas ações é fundamental para garantir o desempenho adequado, reduzir perdas energéticas e aumentar a confiabilidade e segurança das usinas fotovoltaicas ao longo de sua vida útil em cada sistema de geração.

Com isso, destaca-se que o estudo comprova a relevância estratégica da manutenção preventiva e da gestão de ativos em sistemas fotovoltaicos, evidenciando que a ausência de práticas estruturadas de inspeção e monitoramento gera impactos diretos no desempenho energético e na saúde do sistema, onde a interpretação conjunta do perfil de geração, do comportamento do inversor e dos registros de falhas evidencia que os desligamentos observados resultam da interação entre a potência injetada pelo sistema fotovoltaico e as condições operacionais da rede elétrica. Essa constatação reforça a relevância de análises que ultrapassem a avaliação isolada dos componentes do sistema, incorporando a verificação do lado CA como elemento fundamental para a compreensão das falhas e para a proposição de soluções tecnicamente adequadas.

3.2.1 Limitações da pesquisa e perspectivas de aperfeiçoamento

Embora o estudo tenha apresentado resultados significativos e contribuições relevantes para o campo da manutenção de SFV, algumas limitações devem ser reconhecidas a fim de contextualizar o alcance da pesquisa e direcionar aprimoramentos futuros. Uma primeira limitação refere-se ao tamanho reduzido da amostra, composta por apenas três UFVs, todas situadas na região Nordeste e submetidas a condições climáticas semelhantes. Embora esse recorte tenha permitido uma análise aprofundada, ele restringe a generalização dos resultados para outras regiões com características ambientais distintas, como áreas de alta salinidade, grande amplitude térmica ou regiões com padrões diferentes de precipitação.

Outra limitação diz respeito ao tempo de acompanhamento das usinas. As inspeções técnicas e análises foram conduzidas em períodos específicos, não permitindo a avaliação longitudinal de interrupções ao longo de diferentes estações do ano, por exemplo. Um estudo em larga escala temporal poderia evidenciar a variação sazonal da sujidade, do sombreamento ou do comportamento térmico dos inversores, ampliando a precisão das recomendações de manutenção.

Apesar do monitoramento oferecer informações valiosas, esses sistemas apresentam restrições, como perda de logs, atraso nas notificações ou erros não capturados pelo *software* de monitoramento. Em alguns casos, a avaliação de falhas demandou interpretação manual ou reprodução dos fenômenos em campo, o que pode introduzir vieses operacionais. Além disso, não foi possível realizar ensaios complementares, como testes de isolamento em todas as *strings* durante as visitas, devido às limitações de tempo e disponibilidade de equipamentos especializados. A ausência desses dados específicos limita a profundidade da análise de algumas anomalias elétricas ou estruturais.

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

O presente estudo permitiu a realização de uma análise aprofundada dos principais aspectos técnicos, estruturais e operacionais de três usinas fotovoltaicas de microgeração instaladas na região Nordeste do Brasil, evidenciando a importância estratégica de práticas adequadas de manutenção para assegurar o desempenho energético, a confiabilidade e a segurança desses sistemas. Por meio de visitas técnicas, levantamentos fotográficos, medições e estudo de registros de monitoramento remoto, foi possível mapear de maneira detalhada as falhas que comprometiam a eficiência das plantas, classificá-las segundo critérios técnicos e propor soluções preditivas, corretivas e preventivas de formas estruturadas.

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que a ausência de rotinas estruturadas de manutenção, aliada a práticas de instalação inadequadas e à inexistência de monitoramento sistemático, contribui significativamente para a redução da eficiência operacional das usinas fotovoltaicas analisadas. A aplicação integrada das ferramentas de gestão da qualidade, Diagrama de Ishikawa e Plano de Ação 5W2H, permitiu organizar as causas de falhas de maneira sistemática e orientar a elaboração de um plano estratégico de manutenção preventiva, preditiva, detectiva e corretiva planejada, contribuindo para a padronização das rotinas operacionais.

Contudo, o estudo apresenta limitações que devem ser reconhecidas. A análise foi restrita a três usinas selecionadas por apresentarem histórico recorrente de falhas, o que não permite generalizar completamente os resultados para todas as tipologias de sistemas fotovoltaicos. Além disso, a abordagem metodológica foi predominantemente descritiva e qualitativa, limitando a quantificação de perdas energéticas, da eficiência real do plano proposto e da estimativa de impacto econômico das intervenções sugeridas. Outro ponto limitante está relacionado à disponibilidade de dados históricos, que variou entre as usinas e restringiu a análise estatística de longo prazo.

Este trabalho reafirma a relevância da manutenção em sistemas de geração fotovoltaica, onde demonstra-se que o desempenho de uma usina fotovoltaica não depende exclusivamente da qualidade dos equipamentos instalados, mas sim da integração entre projeto, execução, operação e manutenção, sendo esta última um pilar determinante para o sucesso da planta. A falta de inspeções periódicas, de

registros estruturados e de intervenções planejadas se mostrou um fator crítico para a degradação acelerada dos sistemas analisados.

De forma complementar, destaca-se que o estudo descritivo desenvolvido constitui a base primordial para a futura avaliação quantitativa do desempenho operacional, abrindo caminho para mensurações mais precisas de eficiência após a implementação do plano de manutenção. Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se a implementação prática do plano de manutenção proposto, acompanhada de monitoramento periódico de indicadores de desempenho, desenvolvimento de ferramentas automatizadas de gestão de manutenção, integrando alarmes de monitoramento remoto, histórico de falhas e planos de inspeção, e ampliação do estudo para outras usinas com características distintas.

A adoção detalhada dos indicadores de eficiência do sistema de geração permitirá avaliar de forma quantitativa a efetividade do plano apresentado, validando-o e possibilitando sua replicação em diversas tipologias de usinas. Tais iniciativas permitirão aprimorar os protocolos técnicos, contribuir para o avanço do setor e consolidar práticas de engenharia que elevem o padrão de operação dos sistemas fotovoltaicos no Brasil.

Portanto, este trabalho contribui para a consolidação de práticas de engenharia de manutenção em sistemas fotovoltaicos de pequeno e médio porte, reforçando a necessidade de políticas estruturadas de inspeção, monitoramento e intervenção. Sua implementação tende a gerar ganhos consistentes em confiabilidade, disponibilidade e desempenho energético. O avanço em direção a estudos quantitativos futuros será fundamental para fortalecer o ciclo de melhoria contínua e consolidar a eficiência operacional no setor de O&M fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

1. MEDEIROS, L. S. **Operação e manutenção (O&M) em parques solares e uma visão Brasileira e Francesa sobre o assunto**. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da UFC. Fortaleza - CE. 2025. Acesso em: 17 de out. de 2025.
2. BARRETO, F. J. **Planejamento centrado na manutenção de usinas fotovoltaicas: uma abordagem visando a eficiência**. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da UFRGS. Porto Alegre - RS. 2024. Acesso em: 14 de out. de 2025.
3. MORGADO, J. M. B. **Serviços de Manutenção de Sistemas Fotovoltaicos de Autoconsumo em Instalações Industriais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Programa de Pós-Graduação da FEUP. Porto - Portugal. 2025. Acesso em: 07 de set. de 2025.
4. COSTA, A. L. C.; HIRASHIMA, S. Q. S.; FERREIRA, R. V. **Operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede: inspeção termográfica e limpeza de módulos FV**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 201-220. 2021. Acesso em: 04 de ago. de 2025.
5. SOARES, B. E. A. **Planejamento de manutenção em sistemas fotovoltaicos conectados à rede: um estudo voltado para as usinas da UFRN**. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da UFRN. Natal - RN. 2023. Acesso em: 24 de ago. de 2025.
6. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. **Relatório Síntese, ano base 2023**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf. Acesso em: 19 de set. de 2025.
7. CEMIG. **Matriz energética brasileira se destaca no cenário mundial por sua renovabilidade**. 2024. Disponível em: <https://energialivre.cemig.com.br/blog/matriz-energetica-brasileira-mundial-renovabilidade/#:~:text=Segundo%20os%20dados%20pela%20Ag%C3%A2ncia,renov%C3%A1veis%20e%201%25%20nuclear>.> Acesso em: 16 de jul. de 2025.
8. EPE. **Empresa de Pesquisa Energética**, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublishingImages/Paginas/Forms/Publicaes/Anuario20anos.pdf>. Acesso em: 18 de ago. de 2025.
9. ANEEL. **Resolução Normativa Nº 1.000**. 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>. Acesso em: 18 de set. de 2025.
10. DANTAS, S. G. **Oportunidades e Desafios da Geração Solar Fotovoltaica no Semiárido do Brasil**. Repositório do Conhecimento do IPEA, p. 9-60, 2020. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9680/1/TD_2541.pdf. Acesso em: 28 de mai. de 2025.
11. ANEEL. **Resolução Homologatória nº 3.325, de 23 de abril de 2024**. Homologa o resultado do Reajuste Tarifário Anual de 2024, as Tarifas de Energia – TE e as Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição – TUSD

- referentes à Companhia Energética de Pernambuco – Neoenergia Pernambuco, e dá outras providências. 2024. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20243325ti.pdf>. Acesso em: 02 de mai. de 2025.
- SANTOS, S. W. **Detecção de Sujidade e Sombreamento em Painéis Solares com Inteligência Artificial Utilizando Aplicativos Móveis**. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação pela UFSM, Santa Maria – RS, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/31399/Santos_Samuel_Winckler_2023_TCC.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 16 de ago. de 2025.
12. VITTI, D. C.; ALVARES, L. M. **Avaliação da Eficiência de Sistemas Fotovoltaicos**. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pela UNB, Brasília – DF, 2006. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/903/1/2006_DiegoVittiLeandroAlvares.pdf. Acesso em: 19 de jul. de 2025.
13. TORRES, I. C. **Análise do Desempenho Operacional de Sistemas Fotovoltaicos de Diferentes Tecnologias em Clima Tropical – Estudo de Caso: Sistema Fotovoltaico Comercial Conectado à Rede**. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Título de Mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares pela UFPE, Recife – PE, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/17711/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O%20FINAL%20-%20IGOR%20CAVALCANTE%20TO RRES%20-%2004_02_16.pdf. Acesso em: 17 de ago. de 2025.
14. CORREIA, R. S.; NASCIMENTO, J. F.; NEVES, F. F. **Práticas de Inspeção e Manutenção Preventiva em Sistemas Fotovoltaicos**. Ciência & Tecnologia: FATEC-JB, Jaboticabal - SP, v. 15, n. 1, p. 1-9, ISSN 2178-9436, 2023.
15. Disponível em: <https://publicacoes.fatecjaboticabal.edu.br/citec/article/view/279/234>. Acesso em: 03 de maio de 2024.
- FELIPPIM, G. M. R.; SOUZA, S. S. F. **Análise de viabilidade de implantação de um sistema de geração fotovoltaico a partir da nova legislação**. Brazilian Journal of Development ISSN: 2525-8761, p. 1-22, 2023. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/65433>.
16. BORGES, J. L.; *et al.* **Análise técnica e financeira para implantação de um sistema fotovoltaico no Hospital São Sebastião no Município de Turvo/SC**. Revista UNICREA, Florianópolis, v. 1, n. 2, p. 17-51, 2023.
17. Disponível em: <https://revistaunicrea.crea-sc.org.br/index.php/revistaunicrea/article/view/24>.
- CARVALHO, A. B. S. **A viabilidade de implantação do sistema de geração de Energia elétrica através de painéis fotovoltaicos**. Semana Acadêmica UNINORTE, p. 1-18, 2018. Disponível em: https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_-_placa_fotovoltaicos.pdf.
18. BORCHARDT, C.; *et al.* **Viabilidade de um sistema de geração fotovoltaica conectado à rede**. Revista Esfera Tecnológica, v. 6, n. 2, p. 1-20, 2022.
19. Disponível em: <https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2022/02/revista-esfera-tecnologia-v06-n02-artigo01.pdf>.
20. AMIN, A.; XIAOCHAN, W.; ALROICHDI, A.; IBRAHIM, A. **Designing and manufacturing a robot for dry-cleaning PV solar panels**. International

- Journal of Energy Research, v. 2023, p. 1–15, 2023. Disponível em: https://downloads.hindawi.com/journals/ijer/2023/7231554.pdf?_gl=1*1budahi*_ga*NjAxNTc2MDU2LjE3MTMwNzA5MDk.*_ga_NF5QFMJT5V*MTcxMzA3MDkxMC4xLjAuMTcxMzA3MDkxMC42MC4wLjA.&_ga=2.207745236.755375764.1713070909-601576056.1713070909.
- ELY, F. SWART, J. W. **Energia solar fotovoltaica de Terceira geração**. Revista O Setor Elétrico. p. 138-139, 2014. Disponível em: <https://www.ieee.org.br/wpcontent/uploads/2014/05/energia-solar-fotovoltaica-terceira-geracao.pdf>.
21. PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CRESESB, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: https://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf.
22. CANDINE, M. V. S. **Análise de Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos, Considerando a Influência da Sujeira na Região Sul de Goiás: Estudo de Caso no Instituto Federal de Goiás – Campus Itumbiara**. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo IFPE, Itumbiara - GO, 2018. Disponível em: https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/1234/1/TCC_MarcosCandine.pdf.
23. FORTE, F. J. S. **Estudo de Caso dos Impactos Relacionados a Falta de Manutenção de um Sistema Fotovoltaico para Garantir sua Eficiência Energética**. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil pela Faculdade Ari de Sá, Fortaleza, 2023. Disponível em: <https://repositorio.faculdadearidesa.edu.br/handle/hs826/243>.
24. MOREIRA, M. M. A. C.; AZEVEDO, T. C.; SILVEIRA, S. R.; Et. al. **Ferramentas da qualidade: uma revisão de Diagrama de ISHIKAWA, 5W2H, Ciclo PDCA, DMAIC e suas interrelações**. 5º SiPGEM – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, p. 1-6, 2021. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/b7f13b16-0640-4823-9809-9f76cc7a7df8/3170-9459-2-PB.pdf>.
25. ABNT NBR 5462. **Confiabilidade e manutenibilidade**, dezembro de 1994.
26. ABNT NBR 16150. **Sistemas fotovoltaicos (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição - Procedimento de ensaio de conformidade**, abril de 2013.
27. ABNT NBR 16690. **Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto**, julho de 2019.
28. REDISKE, G. **Modelo de Avaliação do Desempenho de Operação e Manutenção de Usinas Fotovoltaicas de Minigeração Distribuída**. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Produção pela UFSM, Santa Maria - RS, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/29379/TES_PPGEPP_2023_REDISEKE_GRACIELE.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 10 de nov. de 2025.
29. LEITÃO, J. M. S.; JÚNIOR, M. B. S. **Análise de Desempenho e Proposta de Práticas de Manutenção em Usinas de Micro e Minigeração Distribuída - Estudo de caso de uma UFV em Vitória de Santo Antão – PE**. Trabalho de Conclusão de curso para a obtenção do título de Engenheiro de Energia pela UFPE, 2025. Acesso em: 19 de set. de 2025.
- 30.

- NETO, J. O. M.; NASCIMENTO, E. J.; FARIAS, A. M. **Desenvolvimento de um Planejamento de Manutenção de Usinas Solares Fotovoltaicas: Um Estudo de caso aplicado no IFPE Pesqueira**. Instituto Federal de Pernambuco campus Pesqueira. Curso de Pós-Graduação em Energia Solar Fotovoltaica, 2025. Acesso em: 22 de jun. de 2025.
31. CANADIAN SOLAR. **CS6W-545MS – High Power Mono PERC Module**. Datasheet técnico. [S.l.], Canadian Solar Inc., [2022]. Disponível em: <https://www.canadiansolar.com>. Acesso em: 02 de jun. de 2025.
32. SUNGROW. **SG110CX – Multi-MPPT String Inverter for Commercial & Utility Applications**. Datasheet técnico. Hefei: Sungrow Power Supply Co., Ltd., [2020]. Disponível em: <https://www.sungrowpower.com>. Acesso em: 02 de jun. de 2025.
33. SUNGROW. **SG75CX - High-Efficiency Multi-MPPT String Inverter**. Datasheet técnico. Hefei: Sungrow Power Supply Co., Ltd., [2022]. Disponível em: <https://www.sungrowpower.com>. Acesso em: 02 de nov. de 2025.
34. TRINA SOLAR. **TSM-450NE - Vertex S Monocrystalline Module**. Datasheet técnico. Changzhou: Trina Solar Co., Ltd., [2023]. Disponível em: <https://www.trinasolar.com>. Acesso em: 02 de nov. de 2025.
35. FRONIUS. **Fronius ECO 25.0-3-S - Three-Phase String Inverter for Commercial PV Systems**. Datasheet técnico. Pettenbach: Fronius International GmbH, [2016]. Disponível em: <https://www.fronius.com>. Acesso em: 02 de nov. de 2025.
36. MANUALSLIB. Bosch C-Si M60 NA 30119 – **Manual técnico**. [S.l.]. Disponível em: <https://www.manualslib.com/manual/2107347/Bosch-C-Si-M60-Na-30119.html?page=7#manual>. Acesso em: 02 de nov. de 2025.
37. LEITÃO, J. M. S.; JUNIOR, M. B. S.; **Análise de Desempenho e Proposta de Práticas de Manutenção em Usinas de Micro e Minigeração distribuída – Estudo de Caso de uma UFV em Vitória de Santo Antão – PE**. Trabalho de Conclusão de Curso para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia pela UFPE, 2025. Acesso em: 25 de nov. de 2025.
- 38.

APÊNDICES

APÊNDICE A – PLANO DE MANUTENÇÃO PROPOSTO - REV01

Unidade Fotovoltaica: _____
 Data da Inspeção: ____/____/____
 Responsável Técnico: _____
 Equipe Executora: _____
 Cond. Climáticas: () Sol () Nublado () Chuva () Vento Forte
 Horário: _____ às _____

1. INSPEÇÃO VISUAL DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Periodicidade recomendada: trimestral (ou conforme criticidade da usina)

| Item de Verificação | Critério / Evidência | OK | NC | Observações |
|---------------------------|--|--------------------------|--------------------------|-------------|
| Integridade do vidro | Ausência de trincas, delaminação, estilhaços | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Integridade de moldura | Sem deformações, oxidação, empeno | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Hot-spots aparentes | Escurecimentos, manchas térmicas, pontos queimados | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Sombreamentos permanentes | Obstruções por vegetação, objetos ou estruturas | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Sujidade crítica | Poeira, barro, dejetos, manchas persistentes | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Fixação estrutural | Parafusos completos, torque adequado | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Etiquetas e identificação | Visíveis e legíveis | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

2. CHECKLIST ELÉTRICO – STRINGS E CONEXÕES

Periodicidade recomendada: semestral

| Item | Critério / Evidência | OK | NC | Observações |
|---------------------------------------|--|--------------------------|--------------------------|-------------|
| Integridade dos cabos CC | Sem cortes, abrasão, ressecamento | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Conectores MC4 | Sem folgas, travamento correto, sem aquecimento | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Polaridade | Verificada conforme projeto | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Equalização de corrente entre strings | Diferença aceitável $\pm 10\%$ | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Aterramento e equipotencialização | Continuidade assegurada | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Isolação (megômetro) | Valor dentro das normas ($\geq 1 \text{ M}\Omega$) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Quadros CC | DC switch, fusíveis, barramentos sem deformações | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

3. MANUTENÇÃO DE INVERSORES

Periodicidade recomendada: trimestral / mensal para usinas críticas

3.1 Inspeção Visual / Mecânica

| Item | Critério | OK | NC | Observações |
|--------------------------|---|--------------------------|--------------------------|-------------|
| Integridade da carcaça | Sem amassados, corrosão ou fissuras | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Conectores CA-CC | Encaixe firme, sem folgas ou superaquecimento | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Dispositivos de proteção | Disjuntores, DPS e fusíveis íntegros | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Ventilação | Filtros limpos, entrada/saída desobstruída | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

3.2 Inspeção Elétrica / Funcional

| Item | Critério | OK | NC | Observações |
|------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|
| Temperatura interna | Dentro dos limites do fabricante | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Registro de falhas | Logs verificados e exportados | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Eficiência instantânea | Dentro do previsto (>95%) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Tensão MPPT | Coerente entre rastreadores (+/-10%) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Frequência e tensão CA | Em conformidade com concessionária | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

4. ESTRUTURA MECÂNICA E FIXAÇÕES

Periodicidade recomendada: anual (ou após ventos fortes)

| Item | Critério | OK | NC | Observações |
|----------------------------|--|--------------------------|--------------------------|-------------|
| Trilhos e perfis metálicos | Sem corrosão, empeno ou fratura | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Parafusos e arruelas | Torque adequado, sem folgas | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Fundação e bases | Sem deslocamentos ou rachaduras | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Clipagem de cabos | Apoio adequado, sem risco de abrasão | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Ângulo de inclinação | Conforme projeto (verificar deformações) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

5. SISTEMAS DE PROTEÇÃO E SEGURANÇA

Periodicidade recomendada: anual

| Item | Critério | OK | NC | Observações |
|-------------|---|--------------------------|--------------------------|-------------|
| DPS | Funcionamento e estado físico | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Disjuntores | Operação mecânica adequada | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Aterramento | Resistência ôhmica dentro da norma | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Sinalização | Placas, etiquetas e avisos padronizados | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Extintores | Validade e acessibilidade | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

6. INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA (SE APLICÁVEL)

Periodicidade recomendada: anual (ou após falhas)

| Item | Critério | OK | NC | Observações |
|-----------------|--|--------------------------|--------------------------|-------------|
| Módulos | Identificação de hot-spots ou células inativas | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Strings e cabos | Identificação de aquecimento anormal | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Inversores | Análise térmica de dissipadores | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

7. LIMPEZA DE MÓDULOS (O&M)

Periodicidade recomendada: conforme índice de sujidade ou análise PR

| Item | Critério | OK | NC | Observações |
|-------------------------|--|--------------------------|--------------------------|-------------|
| Condição pré-limpeza | Registro fotográfico | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Tipo de sujidade | Poeira / lama / resíduos orgânicos | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Critério de acionamento | PR < limite / análise visual / sazonal | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Condição pós-limpeza | Sem arranhões ou marcas | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

8. INDICADORES DE MANUTENÇÃO (Preenchimento no encerramento da visita)

Objetivo: padronizar métricas como MTBF, MTTR e Disponibilidade.

| Indicador | Valor | Observações |
|-----------------------------------|-------|-------------|
| Nº de falhas detectadas | _____ | |
| Nº de intervenções corretivas | _____ | |
| MTTR (h) | _____ | |
| MTBF (dias ou meses) | _____ | |
| Disponibilidade (%) | _____ | |
| Energia não-gerada estimada (kWh) | _____ | |
| Perdas por sujidade (%) | _____ | |

9. AÇÕES CORRETIVAS, RECOMENDAÇÕES E REGISTROS FOTOGRÁFICOS

- Descrever todas as anomalias encontradas
- Registrar ações executadas
- Recomendação técnica para próximos ciclos
- Anexar fotos antes/depois

10. RESPONSABILIDADES E ASSINATURAS

Responsável técnico pela manutenção:

Nome: _____

CREA: _____

Assinatura: _____

Equipe executora:

