



**INSTITUTO
FEDERAL**
Pernambuco

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco

Campus Garanhuns

Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica

KÁSSIO VINÍCIUS DA SILVA

**CONTRIBUIÇÕES À MANUTENÇÃO ELÉTRICA NA USINA SOLAR
FOTOVOLTAICA DO IFPE - CAMPUS GARANHUNS**

Garanhuns – PE

2025

KÁSSIO VINÍCIUS DA SILVA

**CONTRIBUIÇÕES À MANUTENÇÃO ELÉTRICA NA USINA SOLAR
FOTOVOLTAICA DO IFPE - CAMPUS GARANHUNS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
do Instituto Federal de Pernambuco, campus
Garanhuns, como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Wilker Victor da Silva Azevedo

Garanhuns – PE

2025

S586c

Silva, Kássio Vinícius da

Contribuições à manutenção elétrica na usina solar fotovoltaica do IFPE - Campus Garanhuns / Kássio Vinícius da Silva ; orientador Wilker Victor da Silva Azevedo, 2025.

81f. : il.

Orientador: Wilker Victor da Silva Azevedo.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal de Pernambuco. Pró-Reitoria de Ensino. Diretoria de Ensino. Campus Garanhuns. Coordenação do Curso Superior em Engenharia. Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2025.

1. Energia solar. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Sistemas de energia fotovoltaica. 4. Eficiência energética. I. Título. II. Azevedo, Wilker Victor da Silva (orientador). III. Instituto Federal de Pernambuco.

CDD 621.47

Louise Machado Freire Dias – CRB4/2267

KÁSSIO VINÍCIUS DA SILVA

**CONTRIBUIÇÕES À MANUTENÇÃO ELÉTRICA NA USINA SOLAR
FOTOVOLTAICA DO IFPE - CAMPUS GARANHUNS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
do Instituto Federal de Pernambuco, campus
Garanhuns, como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em: ____/____/____

Prof. Dr. Wilker Victor da Silva Azevedo (IFPE, *campus* Garanhuns)
Orientador

Prof. Esp. Manoel Alves Cordeiro neto (IFPE, *campus* Garanhuns)
Avaliador interno

Prof. Dr. Sérgio Torres de Santana (IFPE, *campus* Jaboatão)
Avaliador externo

Dedico este trabalho a Deus, fonte da energia que me impulsiona a viver, aprender e vencer desafios. À minha família, por todo amor, apoio e incentivo incondicional ao longo da minha formação. E, em especial, à minha mãe, cuja dedicação, coragem e fé foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Esta conquista também é sua.

AGRADECIMENTOS

A Deus, minha eterna gratidão. Pela vida, pela força diária e pela energia que me sustentou em cada etapa desta jornada.

À minha família, em especial à minha mãe Elizangela, minha irmã Laura e meu padrasto, pelo amor, apoio incondicional e incentivo constante, mesmo nos momentos mais difíceis.

À minha igreja, a Primeira Igreja Batista em Caetés, que considero minha segunda família, pelo acolhimento, pelas orações e pela base espiritual que me sustentou durante toda minha formação.

A todos que fazem parte da ACETEC, empresa júnior da qual faço parte com orgulho, pelo aprendizado prático, pela convivência e pelo ambiente de crescimento coletivo.

Aos meus colegas de curso, em especial Daniela Silva, Lidiane Silva, Lucas Félix, Beatriz Rosa, Lucas Paiva, Matheus Ramos e Marcelle Benigna pela amizade, pelas trocas de conhecimento e pela parceria ao longo dos semestres.

Aos colegas, Tarcízio André, Edvânia Braga, Danilo Oliveira, Matheus Araújo e Ariane Ferreira que me auxiliaram nos testes realizados na usina fotovoltaica, pelo apoio técnico e disposição em contribuir com esta pesquisa.

Ao Movimento Empresa Júnior (MEJ), em especial ao Conselho Articulador da FEJEPE, por tantas oportunidades de desenvolvimento pessoal, profissional e de liderança.

Aos funcionários do IFPE – Campus Garanhuns, em especial à equipe do setor de manutenção, responsáveis pela limpeza e suporte na usina, pela colaboração e disponibilidade durante a realização deste trabalho.

Ao setor administrativo do campus, aos terceirizados, aos técnicos e aos guardas, pelo apoio institucional e operacional ao longo desta caminhada.

Aos professores que fizeram parte da minha formação acadêmica, por cada ensinamento transmitido com dedicação e compromisso. Em especial, ao meu orientador, Professor Dr. Wilker Victor da Silva Azevêdo, por ter me acompanhado ao

longo de diferentes fases da graduação como na pesquisa, na extensão e agora na conclusão deste trabalho com paciência, rigor e incentivo constante.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para minha formação acadêmica e pessoal, deixo aqui o meu mais sincero agradecimento.

“Até aqui nos ajudou o SENHOR.”

(1 Samuel 7:12b)

RESUMO

O principal objetivo do trabalho de conclusão de curso foi a elaboração e aplicação de um plano de manutenção elétrica para a usina fotovoltaica do IFPE – Campus Garanhuns com a finalidade de melhorar o desempenho energético do sistema e promover ações práticas de inspeção, limpeza e acompanhamento operacional. A partir da análise do funcionamento atual da usina, foram identificadas falhas como ausência de monitoramento em tempo real, inversores inoperantes, sujidade nos módulos e inexistência de práticas regulares de manutenção. Para isso, foram realizadas medições de irradiância com piranômetro, testes elétricos e comparações entre a geração projetada (com PR = 0,80) e a geração real medida. A limpeza de duas *strings* permitiu verificar um aumento de 1,63% na eficiência, o que, quando projetado para toda a usina, representa um ganho potencial. Como contribuição prática, foi desenvolvido um plano de manutenção com tabelas de periodicidade, formulários de inspeção e recomendações operacionais, além da proposta de aproveitamento de inversores disponíveis no laboratório e envolvimento de estudantes no processo de manutenção, integrando a iniciativa ao contexto do ensino. Os resultados demonstram que a adoção de práticas sistemáticas de manutenção pode elevar os níveis de geração da usina e reduzir os custos com energia elétrica para o campus.

Palavras-chave: Energia Solar. Manutenção Elétrica. Eficiência Energética. Usina Solar Fotovoltaica

ABSTRACT

The main objective of this final undergraduate project was the development and implementation of an electrical maintenance plan for the photovoltaic power plant of IFPE – Garanhuns Campus, aimed at improving the system's energy performance and promoting practical actions of inspection, cleaning, and operational monitoring. From the analysis of the plant's current operation, several issues were identified, such as the absence of real-time monitoring, inoperative inverters, soiling of the modules, and the lack of regular maintenance practices. To address these, irradiance measurements with a pyranometer, electrical tests, and comparisons between the projected generation (with PR = 0.80) and the actual measured generation were performed. The cleaning of two strings resulted in a 1.63% efficiency increase, which, when projected for the entire plant, represents a potential gain. As a practical contribution, a maintenance plan was developed, including periodicity tables, inspection forms, and operational recommendations, along with the proposal to reuse available inverters from the laboratory and involve students in the maintenance process, thus integrating the initiative into the educational context. The results demonstrate that the adoption of systematic maintenance practices can significantly increase the plant's generation levels and reduce electricity costs for the campus.

Keywords: Solar Energy. Electrical Maintenance. Energy Efficiency. Photovoltaic Solar Plant.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Visão superior da usina solar fotovoltaica do IFPE Campus Garanhuns.....	15
Figura 2.1 - Tipos de manutenção.....	19
Figura 2.2 - Configurações sistemas fotovoltaicos.....	24
Figura 2.3 - Sistema interligado (<i>on-grid</i>).....	24
Figura 2.4 - Sistema fotovoltaico <i>on-grid</i>	25
Figura 2.5 - Diferentes estratégias de limpeza.....	28
Figura 2.6 - Inspeção de módulos solares.....	29
Figura 3.1 - Planta com destaque à Usina Solar Fotovoltaica do IFPE.....	31
Figura 3.2 – Exemplo de String da Usina Fotovoltaica do IFPE próxima do quadro CA.....	32
Figura 3.3 - Identificação da fronteira de strings adjacentes.....	39
Figura 3.4 - Identificação dos inversores nas estruturas metálicas de suporte.....	39
Figura 3.5 - Inversor PHB3000-SS.....	40
Figura 3.6 - Módulo Fotovoltaico Yingli YL250P-29b e dimensões.....	41
Figura 3.7 - Especificações do Módulo Solar Yingli YL250P-29b.....	41
Figura 3.8 - Câmera termográfica Flir C3-x.....	42
Figura 3.9 - Alicates amperímetro CC para medição da corrente em módulos.....	43
Figura 3.10 – Uso de elemento com material macio para a Limpeza dos painéis.....	46
Figura 3.11 - Uso do piranômetro para medir a irradiância solar e registro da tensão de saída no multímetro habilitado como voltímetro.....	48
Figura 3.12 - Diagrama para análise do consumo de energia elétrica do campus.....	49
Figura 4.1 - Sujidades em módulos da usina fotovoltaica do IFPE (Campus Garanhuns)....	51
Figura 4.2 – Acúmulo de partículas de poeira na superfície dos módulos.....	52
Figura 4.3 – Registro de erosão no solo e exposição da base da estrutura.....	52
Figura 4.4 - Estrutura metálica da usina.....	53
Figura 4.5 – Detecção de sujeira na <i>Stringbox</i>	53
Figura 4.6 – Danos constatados em Eletrodutos na saída dos inversores.....	54
Figura 4.7 - Estrutura metálica da usina.....	54
Figura 4.8 – Descoloração do encapsulante: módulos solares prejudicados.....	55
Figura 4.9 - Estrutura metálica da usina.....	55
Figura 4.10 – Condução de limpeza da vegetação ao redor da usina por terceirizado.....	56
Figura 4.11 - Sombreamento causado por parafuso da estrutura.....	56
Figura 4.12 - Sombreamento causado por folhas de espécie de vegetação da área externa.....	57
Figura 4.13 – Caixa de aterramento.....	57
Figura 4.14 – Verificação de sujidades nas aletas metálicas de difusão de calor do Inversor.....	58
Figura 4.15 – Inversor com perda de rede e DPS em aberto na <i>string box</i>	59
Figura 4.16 – <i>Strings</i> sem o inversor.....	59
Figura 4.17 - Estrutura metálica da usina.....	61
Figura 4.18 – Comparação Geração projetada x Geração medida para o ano de 2024.....	63
Figura 4.19 – Comparação entre Geração projetada x Geração projetada reduzida.....	63
Figura 4.20 – Comparação entre Geração reduzida x geração medida 2024.....	64
Figura 5.1 - Display LCD do Inversor.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Eficiência dos tipos de células fotovoltaicas.	23
Tabela 3.1 - Plano de manutenção FMEA (Parte I).	33
Tabela 3.2 - Plano de manutenção FMEA (parte II).	34
Tabela 3.3 - Plano de manutenção FMEA (parte III).	35
Tabela 3.4 - Plano de manutenção FMEA (parte IV).	36
Tabela 3.5 - Plano de manutenção FMEA (parte V).	37
Tabela 3.6 - Plano de manutenção FMEA (parte VI).	38
Tabela 3.7 - Procedimentos de Limpeza.	45
Tabela 3.8 - O que não deve ser feito na limpeza.	47
Tabela 3.9 - Frequência de atividades.	47
Tabela 3.10 - Irradiância global ($Wh/m^2 \cdot dia$) no plano inclinado na cidade de Garanhuns...	50
Tabela 4.1 - Teste de curto-circuito e circuito aberto.	60
Tabela 4.2 - Dados da geração projetada.	62
Tabela 4.3 - Dados da geração medida 2024.	62
Tabela 4.4 - Impacto antes e depois da limpeza.	65
Tabela 4.5 - Impacto da limpeza dos módulos limpos e não limpos.	65
Tabela 5.1 – Formulário de acompanhamento da manutenção da UFV do campus.	67
Tabela 5.2 – Formulário de registro da geração mensal.	70
Tabela 5.3 – Formulário de acompanhamento da limpeza dos módulos.	72
Tabela 5.4 - Procedimentos para caso de falhas do inversor PHB.	73
Tabela 5.5 – Dados da parte inferior display frontal inversor PHB.	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EVA	Etileno-Vinil-Acetato
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
IFPE	Instituto Federal de Pernambuco
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
PHB	Empresa Fabricante de Equipamentos para Sistemas Fotovoltaicos
PR	Performance Ratio (razão de desempenho)
UFV	Usina Solar Fotovoltaica

LISTA DE SÍMBOLOS

$E_{mês}$	Energia estimada mensal
G_m	Irradiação solar diária média no plano inclinado
P_{kWp}	Potência instalada
E_{solar}	Irradiação solar
U_{emf}	Tensão de saída
$P_{(média_{(por_painel)})}$	Potência média por painel
$P_{incidente}$	Potência incidente no módulo
Wp	Watt-pico
mV	Milivolt
kW	Quilowatt
kWp	Quilowatt-pico
kWh	Quilowatt-hora
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
I_{sc}	Corrente de curto-circuito

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Contextualização	14
1.2. Justificativa	16
1.3. Objetivos	16
1.3.1. Objetivos Específicos	16
1.4. Estrutura do Trabalho	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. Manutenção: Conceitos e Características	18
2.1.1. Manutenção Corretiva	19
2.1.2. Manutenção Preventiva	21
2.1.3. Manutenção Preditiva	22
2.2. Sistemas Fotovoltaicos	23
2.3. Componentes do Sistema	25
2.4. Perdas do Sistema	26
2.5. Limpeza dos Módulos	27
2.6. Outros Trabalhos	29
3. METODOLOGIA E DIAGNÓSTICO PRELIMINAR	31
3.1. Levantamento de dados	31
3.2. Aplicação da Metodologia FMEA	32
3.3. Inspeção da usina	39
3.4. Desenvolvimento do Plano de Manutenção	43
3.4.1. Elaboração dos Formulários Técnicos	44
3.4.2. Informações e Alguns Protocolos para Limpeza	44
3.4.3. Requisitos e Procedimentos para a Limpeza dos Módulos	45
4. RESULTADOS E ANÁLISES: INSPEÇÕES, MEDIÇÕES E ESTIMATIVAS	51
4.1. Inspeção e Falhas Identificadas	51
4.2. Testes Elétricos e Termografia	60
4.3. Levantamento de Dados de Geração e Discussões	61
4.4. Perspectivas e Impactos da Limpeza do Sistema FV	64
5. FORMULÁRIOS DE SUPORTE À MANUTENÇÃO DA USINA FOTOVOLTAICA	66
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
REFERÊNCIAS	79

1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica vem crescendo cada dia mais e, com isso, surge a necessidade do uso de fontes de energia mais limpas e sustentáveis. Uma delas é a energia solar fotovoltaica, que é uma das fontes que mais cresce no mundo. A Empresa de Pesquisa Energética aponta que no Brasil em 2024 a fonte de energia solar fotovoltaica atingiu uma geração de 70,7 TWh (geração centralizada e MMGD) com crescimento de 39,6% e sua capacidade instalada alcançou 48.468 MW (EPE, 2025).

O Brasil possui uma elevada incidência solar ao longo de todo o ano, em virtude de estar localizado próximo à linha do Equador. Com isso, a energia solar tem se consolidado de forma estratégica para diversificação da matriz energética, redução de impactos ambientais e como forma de impulsionamento ao acesso à eletricidade.

No contexto das instituições públicas de ensino, o uso de sistemas fotovoltaicos representa uma oportunidade não apenas na diminuição de custos com energia, mas também de propiciar ações pedagógicas, ambientais e de inovação tecnológica. Essa adoção tem se intensificado em instituições públicas, contudo demandando uma análise mais detalhada de sua operação e manutenção. Para que se tenha um bom aproveitamento desses sistemas, depende-se diretamente de uma compreensão sobre suas características, equipamentos constituintes e a condução de inspeções e operação adequados, em que se torna evidente e oportuna a realização de boas práticas de manutenção e acompanhamento técnico.

1.1. Contextualização

A usina solar fotovoltaica instalada no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE - Campus Garanhuns) possui capacidade de 97,92 kWp (Figura 1.1) e desempenha papel fundamental no fornecimento de energia para as instalações do campus, complementando o suprimento da rede elétrica convencional. Contudo, a ausência de um plano estruturado de manutenção pode implicar perdas de desempenho, falhas operacionais e dificuldades na gestão da energia gerada.

Figura 1.1 - Visão superior da usina solar fotovoltaica do IFPE Campus Garanhuns.



Fonte: autoria própria.

Algumas situações operacionais típicas que se desdobram em virtude do local de instalação, das questões climáticas e do estado de conservação/manutenção dos equipamentos que constituem usina podem comprometer o aproveitamento da energia solar disponível, além de limitar o retorno do investimento realizado na instalação. Isto, tendo em vista que a geração atual não supera o consumo total de energia elétrica do campus em virtude das limitações financeiras do projeto quanto aos recursos disponíveis, é necessário complementar o fornecimento com energia da concessionária. Atualmente, são implementadas medidas operacionais pontuais, mas persistem restrições técnicas e econômicas que limitam a eficiência do sistema, além de oportunidades de otimização que serão analisadas neste estudo.

Em um estudo de caso conduzido na usina Mossoró II da UFERSA (Universidade Federal do Semi-Árido), em que não havia plano prévio de manutenção ativo. Sousa, Lemos e Varella (2019) verificaram que a adequada realização de manutenções periódicas nos equipamentos que compõem a usina está diretamente relacionada ao rendimento de geração. Isso ocorre porque fenômenos decorrentes da exposição ao tempo e intempéries, como acúmulo de sujeira na superfície do módulo, criam barreiras entre a radiação solar e a célula fotovoltaica, comprometendo a eficiência do sistema e sendo adequadamente contornada com ações periódicas. Além disso, se mostra essencial conhecer os principais tipos de componentes do

sistema e falhas típicas, desenvolver e registrar as principais as ações de manutenção preventiva em um Plano de Manutenção (SOUZA, SOUZA e MINORI, 2018).

A boa gestão da manutenção dos sistemas fotovoltaicos é indispensável para garantir a disponibilidade e eficiência na geração. Logo, é essencial mapear possibilidades, organizar proposta metodologicamente e apresentar ações corretivas, preventivas e preditivas que possam garantir o bom funcionamento do sistema e uma busca contínua por eficiência.

1.2. Justificativa

A ausência de um plano de manutenção bem elaborado em sistemas fotovoltaicos resulta em perdas acumuladas. Situações como sujidades nos módulos, inversores inoperantes e a ausência de monitoramento em tempo real evidenciam a necessidade de ações corretivas e preventivas. Em um cenário institucional, como o do IFPE, essas perdas representam elevação de custos operacionais e o desperdício do aproveitamento da usina instalada com finalidades energética, educacional e ambiental.

1.3. Objetivos

Como objetivo geral do trabalho, tem-se o aperfeiçoamento e aplicação de um plano de manutenção para a Usina Solar Fotovoltaica do IFPE – *Campus Garanhuns*, visando maior eficiência e conseqüente redução de custos, além da conscientização e incorporação de boas práticas de manutenção por parte da equipe gestora e dos funcionários responsáveis pela condução direta de ações desta natureza.

1.3.1. *Objetivos Específicos*

- Realizar uma análise da usina solar fotovoltaica do campus Garanhuns e identificar falhas;
- Estimar a geração projetada da usina e comparar com os dados reais;
- Avaliar em cenário restrito o impacto da limpeza dos módulos sobre a geração de energia;

- Aperfeiçoar e aplicar um plano de manutenção preventiva, preditiva e corretiva com orientações técnicas;
- Realizar oficinas técnicas sobre energia solar e manutenção;
- Orientar a equipe gestora e funcionários do campus sobre princípios e aplicações inerentes à manutenção da Usina Solar Fotovoltaica.

1.4. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 2 aborda a Fundamentação Teórica sobre manutenção elétrica e conceitos de energia solar fotovoltaica.

No Capítulo 3 são apresentados os métodos e materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 4 são descritos os resultados do trabalho, a identificação das falhas da usina e o impacto da limpeza dos módulos.

No Capítulo 5 é exposto um plano de manutenção preventiva, preditiva e corretiva, além de enfatizar aspectos detalhados sobre a limpeza da usina solar fotovoltaica pelo corpo profissional responsável.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as Considerações Finais e propostas para desenvolvimento de trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O conteúdo do presente trabalho aborda o desenvolvimento de um plano de manutenção para acompanhamento do sistema fotovoltaico e orientação à equipe gestora e funcionários. Ainda, contempla proposta e aplicação de metodologia para acompanhamento e limpeza da Usina Solar Fotovoltaica. Sendo assim, esta seção apresenta o referencial teórico necessário para o entendimento dos temas abordados.

2.1. Manutenção: Conceitos e Características

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1994, p.6), define o termo manutenção como a “combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”. O termo manutenção representa uma ação com a finalidade de assegurar que um sistema preserve seu funcionamento com qualidade, segurança e eficiência.

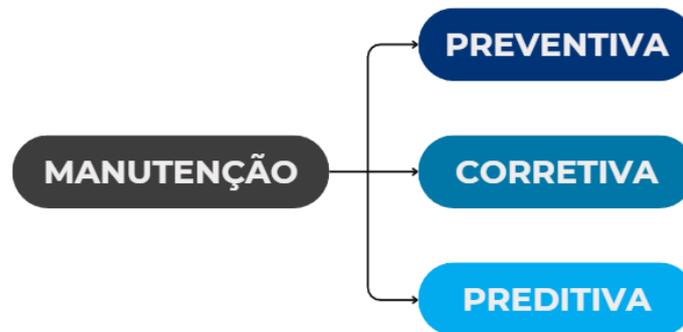
Para garantir uma maior eficiência de um sistema fotovoltaico e que os equipamentos tenham vida útil prolongada, é importante a atuação de profissionais capacitados para realizar uma manutenção. Dentre os profissionais incorporados a esta equipe tecnológica no âmbito das instituições de educação estão os técnicos, engenheiros, servidores administrativos alocados em setor de Manutenção (ou equivalente), além dos funcionários terceirizados, mais frequentemente atuando na linha de frente das ações in loco e com aptidões ou trabalho de natureza diversificada (serviços gerais, eletricitista, limpeza).

Lucena e Oliveira (2024) aponta que esses profissionais devem ter ciência dos riscos ocupacionais relacionados à manutenção da usina solar fotovoltaica e que é de grande importância que sejam seguidos de forma rigorosa todos os protocolos de segurança e também as regulamentações, garantindo a segurança dos profissionais diante dos riscos e a plenitude da usina.

As manutenções são classificadas em programadas e não-programadas com o intuito de preservar equipamentos com suas propriedades originais de fabricação. A manutenção programada é realizada a partir de um plano de manutenção. Por outro lado, a manutenção não-programada não necessita de um plano de manutenção, ela

é realizada após ocorrências no sistema necessitando de uma correção. De acordo com a ABNT NBR 5462/1994 existem três tipos de manutenção (Figura 2.1): Manutenção preventiva, manutenção corretiva e manutenção preditiva.

Figura 2.1 - Tipos de manutenção.



Fonte: Autoria própria.

2.1.1. Manutenção Corretiva

É recomendada que a manutenção corretiva seja realizada imediatamente após a identificação de alguma falha no sistema através da inspeção de rotina. É recomendado que a manutenção corretiva seja realizada no momento em que se detectou a falha ou qualquer tipo de problema na usina.

Esse de tipo de manutenção acontece de forma planeja e não planejada. Quando não planejada, o processo de mitigação dos problemas quase sempre gera custos mais elevados que podem afetar a eficiência do sistema. Por outro lado, a manutenção corretiva planejada pode apresentar resultados melhores.

Destaca-se também que a manutenção corretiva implica em uma demanda por boa estruturação de materiais e ferramentas à equipe de manutenção. Bueno (2020), para este tipo de manutenção, aponta:

- Equipe técnica treinada para atuar com rapidez e proficiência, com quadro e horário bem estabelecidos;
- Existência e disponibilidade de meios, materiais e equipamentos (aparelhos de medição e teste adaptados aos equipamentos existentes e disponíveis para uso imediato);
- Disponibilidade de ferramentas para todos os tipos de intervenções;

- Acessibilidade a manuais de equipamentos com detalhes sobre manutenção e características;
- Existência de datasheets, esquemas, desenhos detalhados dos equipamentos e circuitos;
- Almoxarifado organizado, integrado às necessidades da manutenção e com disponibilidade de um número adequado de itens acima do ponto crítico de encomenda;
- Contratos bem elaborados no caso de equipamentos de alta tecnologia, cuja manutenção local não seja possível;
- Reciclagem e manutenção periódica da equipe técnica de manutenção;
- Registros de defeitos de tempos de reparo, classificados por equipamentos e cadeias.

Note que o processo de manutenção corretiva demanda diversos elementos organizacionais, de capacitação de pessoal, disponibilidade de ferramentas e de organização do setor correspondente. O acompanhamento de técnicos e engenheiros é essencial para uma interpretação apropriada dos eventos, sobretudo em instituições de ensino, em que muitas vezes não há corpo de profissionais da área. Nos processos de contratação de empresas terceirizadas, as demandas vinculadas às instalações prediais, incluindo circuitos, sistemas de iluminação, subestação e, agora, usinas solares fotovoltaicas, podem balizar orientações em relação à presença de profissionais com habilitação técnica específica.

Lucena e Oliveira (2024) apontaram como ações corretivas em uma usina solar fotovoltaica instalada em uma instituição de ensino: a substituição de Dispositivos de proteção contra surto, a troca de fusíveis e a fixação de inversores prestes a cair. Evidenciaram também a quebra de módulos por vandalismo com a consequente demanda por substituição, além da presença de um pequeno animal queimado nos barramentos do quadro de Corrente Alternada (CA), elemento detectado por visita às instalações.

Podem indicar, ainda, a necessidade de ações corretivas elementos como cabos em baixa tensão, quando rompidos, interrompendo parte da geração, disjuntores com falha no disparador eletromecânico desligando *strings*, problemas na fundação decorrentes de falhas no solo gerando inclinações indesejadas (no caso de

usinas instaladas sob o solo) ou mesmo sujidades atípicas proporcionadas por queimadas (fuligem) em regiões adjacentes (ou excesso de poeira em tempo de seca).

2.1.2. *Manutenção Preventiva*

Segundo a ABNT NBR 5462/1994 esta é a manutenção realizada em intervalos pré-determinados ou de acordo com critérios prescritos, reduzindo a probabilidade de falha ou degradação do funcionamento do item.

A manutenção preventiva de sistemas fotovoltaicos é crucial para garantir a eficiência e prolongar a vida útil da usina. Essa manutenção, no caso específico de usinas fotovoltaicas, pode envolver a limpeza periódica das placas a fim de remover sujeira, detritos e outros elementos que podem causar sombreamento, além da inspeção visual no inversor, condução de limpeza local no entorno da usina, verificação cíclica de *stringbox*, cabeamentos, aterramentos e outros componentes do sistema.

Ciclos de prevenção podem estar atrelados a visitas periódicas, em que podem ser detectadas demandas de substituição ou ajuste de ativos. Ela tem um caráter rotineiro que visa reduzir ou eliminar as probabilidades de falhas com olhar periódico pré-definido por equipe ou por orientação do fabricante de alguns equipamentos.

Este é o tipo de intervenção que permite o planejamento, a programação e a preparação dos serviços, atuando de forma proativa na prevenção, o que é uma grande vantagem competitiva (BUENO, 2020). Dela podem surgir critérios sistemáticos associados a tempo (dias, meses, trimestres), horas de funcionamento, dentre outros, apropriada a componentes cuja taxa de falha aumenta com o tempo (envelhecimento). Como exemplo, a detecção de variação na condição operativa por desempenho é um resultado, normalmente, de um olhar cíclico baseado em visitas e/ou acompanhamento de dados de geração em uma usina fotovoltaica.

Esse tipo de manutenção deve incluir um Plano de Manutenção detalhado com um cronograma definido com o máximo de informações necessárias para realização da atividade.

2.1.3. *Manutenção Preditiva*

Antes de realizar uma manutenção preventiva, se faz necessário algumas vezes uma manutenção preditiva (sentido de predizer) afim de analisar as condições do sistema para averiguar e estruturar um plano de manutenção. Isto também permite tornar a manutenção corretiva o mais eficiente possível, minimizando os impactos e custos de suas ações.

Nas inspeções preditivas há a demanda por aparelhos ou instrumentos de medição para caracterizar ou determinar um parâmetro/item, pois ela se baseia em dados reais de equipamentos e sensores. Bueno (2020) afirma ser imperiosa a existência de um parâmetro mensurável que permita determinar o estado de degradação de algum item ou estrutura.

Para o caso de usina solar sob o solo, podemos exemplificar o monitoramento da corrente elétrica em equipamentos (demandando instrumentos específicos como alicate amperímetro com função de medição CC e CA em virtude das características do sistema), a medição da inclinação das estruturas metálicas (podem indicar efeitos de alagamentos e/ou falhas no solo que provocam eminente colapso estrutural ou demanda por ajustes e reforços na fundação). Uma ação decorrente, neste último caso, seria a incorporação de calhas para direcionamento de água de chuva captada e conseqüente redução dos processos de erosão.

Outro elemento que pode auxiliar a manutenção preditiva de sistemas fotovoltaicos é a inspeção termográfica. A caracterização termográfica de um sistema fotovoltaico pode ser do tipo qualitativa, ou seja, quando o importante é o perfil térmico e não os valores de temperatura, como também do tipo quantitativa, neste caso, é quando se pretende definir o nível de gravidade da anomalia produzida pelo aquecimento do objeto (TARGINO e ROCHA, 2023).

A inspeção visual também é uma técnica de manutenção preditiva, através dela é possível verificar a integridade da usina fotovoltaica e evitar problemas que comprometam a eficiência e aumentam os custos operacionais.

2.2. Sistemas Fotovoltaicos

Edmond Becquerel relatou em 1839 o surgimento de tensão nas extremidades da estrutura de um material semicondutor produzida por conversão da luz em energia elétrica. A necessidade de geração de eletricidade em viagens espaciais e também em satélites foi outro fator que impulsionaram a conversão de luz em energia elétrica. Um material é denominado semicondutor quando apresenta um nível de condutividade entre as extremidades de um condutor e um isolante (LOPEZ, 2012).

Em um sistema solar fotovoltaico, a energia elétrica é gerada através da conversão de forma direta da radiação do sol através das células fotovoltaicas ou fotocélulas (VILLALVA, 2022). Quando exposta ao sol, a fotocélula gera tensão através das camadas do material semicondutor, resultando na circulação da corrente elétrica no circuito acoplado ao módulo (REIS, 2017).

Existem diversos tipos de células fotovoltaicas, como silício cristalino (c-Si), película fina, silício amorfo (a-Si), CIS (CIGS), arsenieto de gálio (GaAs), telureto de cádmio (CdTe) e entre outros, sendo o silício cristalino a tecnologia mais utilizada no mercado que pode ser monocristalina, policristalina ou amorfa.

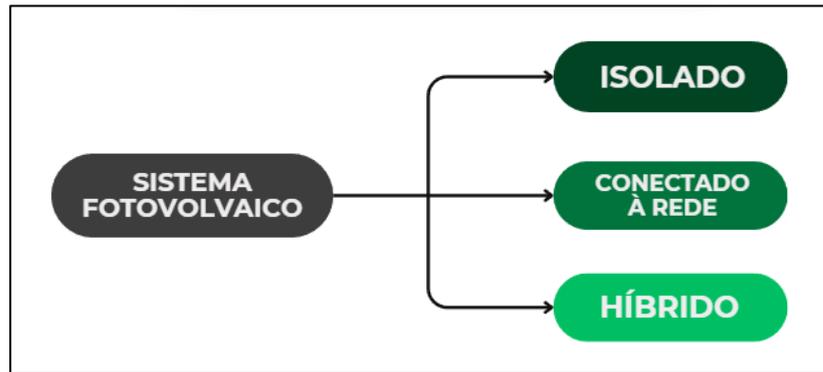
Tabela 2.1 - Eficiência dos tipos de células fotovoltaicas.

Tecnologia	Eficiência
Monocristalino PERC	20,2 - 21,6%
Monocristalino Standard	18-20%
Policristalino PERC	17,8 – 19,9%
Policristalino Standard	15-17%
Disseleneto de Cobre Índio e Gálio (CIGS)	13-15%
Telureto de Cádmio (CdTe)	9-11%
Silício amorfo (a-Si)	6-8%

Fonte: Portal Solar (2025).

Existem diversas aplicações dos sistemas fotovoltaicos, dentre elas aplicações próximas ao consumidor, sendo de forma centralizada ou descentralizada e conectada ou não conectada à rede da concessionária de energia, também denominada de *on-grid* ou *off-grid*, respectivamente, além do sistema híbrido (Figura 2.2).

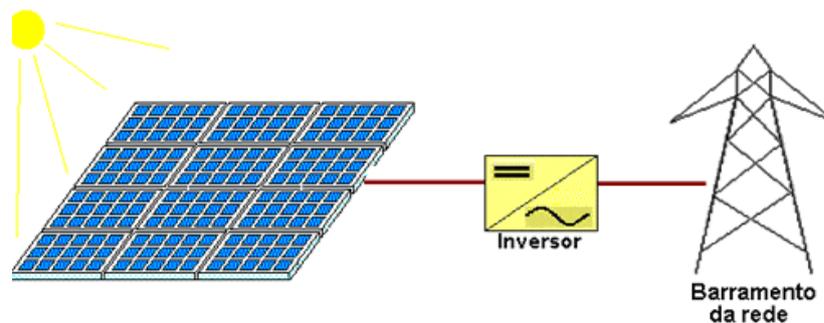
Figura 2.2 - Configurações sistemas fotovoltaicos.



Fonte: Autoria própria.

O foco do trabalho é o sistema conectado à rede, pois a usina solar fotovoltaica do campus Garanhuns é *on-grid* (Figura 2.3). Logo, não serão abordados os outros tipos de sistemas. Os sistemas interligados são utilizados com o objetivo de complementar a geração de energia no sistema elétrico, dispensando a necessidade do uso de baterias para o armazenamento de eletricidade. Nesse modo, a energia consumida localmente e o excedente, quando houver, é inserida na rede.

Figura 2.3 - Sistema interligado (on-grid).



Fonte: Lopez (2012).

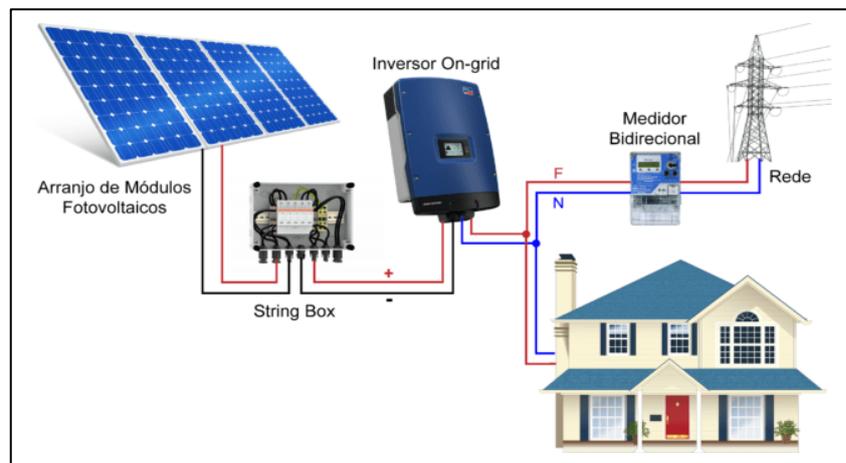
Essa energia é entregue à rede de distribuição gerando créditos para o proprietário do sistema que poderá utilizar quando a demanda de energia for maior que a geração solar. Entretanto, diante de alguma ocorrência na rede da distribuidora, o sistema é desligado automaticamente como forma de segurança para que a rede não seja energizada enquanto é realizada a manutenção. Do ponto de vista legislativo, a ANEEL traz resoluções e informações detalhadas que reportam três 03 categorias de sistema *on-grid*: mini e microgeração e usinas de eletricidade.

De acordo com § XXIX-A do art. 2º da Resolução Normativa Nº 1000 de 2021 da ANEEL, microgeração distribuída é definida como sendo uma central geradora de energia elétrica que utilize fontes renováveis, com potência instalada em corrente alternada menor ou igual a 75 kW. Por sua vez, a Resolução Nº 1000 define minigeração distribuída como uma central geradora de energia elétrica que utilize fontes renováveis, com potência instalada em corrente alternada maior que 75 kW e menor ou igual a 5MW para as centrais geradoras de fontes despacháveis ou 3 MW para as demais fontes não despacháveis.

2.3. Componentes do Sistema

Um sistema fotovoltaico conectado à rede (Figura 2.4) é composto por blocos, em que no bloco gerador são contidos os módulos fotovoltaicos, os cabos elétricos e a estrutura de fixação e no bloco de condicionamento de potência estão inversores, dispositivos de proteção, supervisão e controle (PINHO e GALDINO, 2014).

Figura 2.4 - Sistema fotovoltaico *on-grid*.



Fonte: Moraes (2021).

Sousa, Lemos e Varella (2019) apontam que um módulo, placa ou também chamado de painel fotovoltaico é composto por um agrupamento de células fotovoltaicas conectadas entre si com a finalidade de gerar tensão e corrente capazes de produzir energia significativa.

Os módulos ou painéis fotovoltaicos são responsáveis pela conversão de energia solar em energia elétrica e essa conversão é realizada em corrente contínua

(CC). Os painéis são formados por um agrupamento de células fotovoltaicas conectadas em série, em geral, instaladas entre duas camadas de acetato de etil vinila (EVA), acoplados em um suporte e cobertos de vidro.

A conversão de energia de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) é realizada através do inversor de frequência. Em sistemas conectados à rede, a tensão de saída deve ser sincronizada com a tensão da rede, para que possa ser injetada com tensão, frequência e fase semelhantes (SOUSA, LEMOS e VARELLA, 2019).

2.4. Perdas do Sistema

Os fatores que provocam perdas na usina devem ser estudados afim de analisar os patamares de geração. Com isso, é importante métodos eficazes que busquem mitigar o máximo essas perdas e aumentar a eficiência do sistema. Algumas perdas como aquelas causadas por sombreamento nos módulos, perdas causadas por sujidades, por aumento de temperatura, perdas nos inversores, por módulos corrompidos e perdas nos cabeamentos prejudicam o rendimento/eficiência da geração pela usina fotovoltaica.

O sombreamento reduz a radiação incidente nos painéis, pois as células fotovoltaicas são associadas em série e sua corrente será limitada em todo o circuito. Um fator que causa o sombreamento parcial na superfície da placa é a sujidade como poeira, resíduos de animais, folhagens ou qualquer outra coisa que esteja na superfície do vidro.

Em caso dos módulos conectados em série, pode ocorrer a redução de corrente nas células devido a sombreamentos. Além disso, as placas podem ser danificadas pelo sombreamento parcial, o efeito *hotspot* em um módulo solar é um ponto de superaquecimento localizado numa célula individual, causado pela sua incapacidade de gerar energia e, em vez disso, consumir a corrente das células vizinhas, que podem ser boas e saudáveis.

A inspeção com auxílio de uma câmera termográfica busca identificar módulos defeituosos em um sistema fotovoltaico. Através delas são identificados diversos

problemas como pontos quentes que acabam reduzindo significativamente a produtividade de toda a usina.

O piranômetro ou solarímetro é um equipamento utilizado para medir a irradiância solar que atinge uma superfície. Essa irradiância é mensurada em watts por metro quadrado (W/m^2), sendo uma ferramenta essencial para estudar a eficiência energética através da radiação solar incidente na superfície dos módulos. Seu sensor apresenta um campo de visão de 180 graus.

O Rendimento Global do Sistema, também conhecido como *Performance Ratio* (PR), é fundamental para avaliar o desempenho de sistemas fotovoltaicos. Esse índice relaciona a energia gerada com a energia teoricamente disponível a partir da radiação solar incidente (ALVES, 2025).

Kumar (2025) aponta que um índice de desempenho na faixa de valores de 75% a 80% é consideravelmente bom, pois indica que uma usina solar fotovoltaica está convertendo a luz solar em energia de maneira eficiente. A PR é calculada através da divisão da energia gerada do sistema em kWh pela energia de geração estimada do sistema também em kWh.

No cálculo da energia estimada ou projetada é utilizada a energia mensal (E) projetada em kWh, o valor 30 é a quantidade de dias para se obter a geração mensal, a irradiância solar (G_m) diária média no plano inclinado em $kWh/m^2 \cdot dia$, a potência instalada (P_{kWp}) do sistema fotovoltaico em kWp e PR é o fator de desempenho.

$$E_{mês} = 30 * G_m * P_{kWp} * PR \quad (2.1)$$

Dessa forma, é possível analisar a diferença mensal entre a geração real e teórica.

2.5. Limpeza dos Módulos

Os painéis fotovoltaicos estão sujeitos a sujidades como poeira, dejetos de animais e outros resíduos que podem reduzir sua eficiência. Logo, é necessária a realização de uma limpeza regular. Estudos de Sousa, Lemos e Varella (2019) e Targino e Rocha (2023) apontam que longos períodos sem a realização de limpeza dos módulos pode prejudicar significativamente o desempenho do sistema. A limpeza

frequente da superfície dos painéis é, portanto, uma medida essencial para garantir a eficiência da usina.

A limpeza da usina, deve ser realizada após uma inspeção para verificar se realmente a mesma precisa de uma manutenção preventiva, evitando esforços desnecessários e também o desperdício de água. A periodicidade de limpeza dos painéis varia conforme as características da usina fotovoltaica, conforme o nível de sujeira na superfície, ou seja, caso a usina apresente uma camada de poeira ou outras sujidades que contribuam na diminuição dos níveis de geração, se faz necessário uma limpeza.

A limpeza dos módulos pode ser classificada em dois tipos: limpeza natural e limpeza através de métodos artificiais. A limpeza natural ocorre através de fenômenos ambientais como a chuva, o vento, a neve e a gravidade, que auxiliam de forma parcial na remoção de sujidades sobre a superfície dos módulos. Por outro lado, a limpeza artificial consiste na realização de procedimentos manuais ou mecanizados, aplicados de forma programada, com o intuito de garantir a limpeza completa dos painéis.

Figura 2.5 - Diferentes estratégias de limpeza.



Fonte: Adaptado (OSMANI *et al.* 2020).

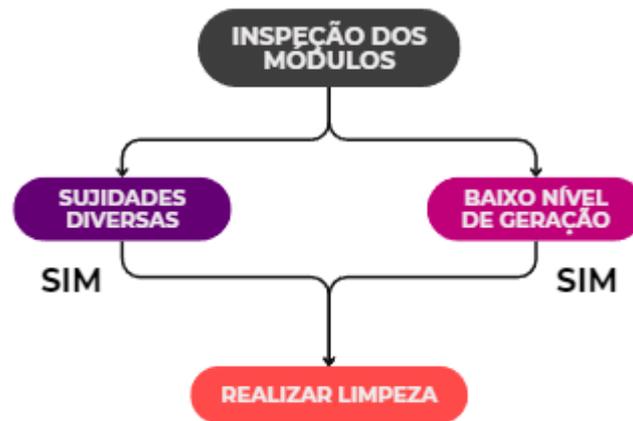
A frequência de limpeza dos módulos depende de alguns fatores:

- Clima da região;
- Características do ambiente da usina;
- Intensidade de sujidades;
- Queda dos níveis de geração de energia.

Durante períodos de chuva, ocorre uma limpeza natural dos módulos. No entanto, é essencial realizar uma inspeção para verificar se ainda há acúmulo de

sujeira em áreas onde a chuva não foi totalmente eficaz (Figura 2.6). Caso resíduos persistam após a precipitação, será necessária uma limpeza complementar. Outro fator que deve ser considerado para uma limpeza complementar é o desempenho de geração do sistema.

Figura 2.6 - Inspeção de módulos solares.



Fonte: autoria própria.

Os inversores e as caixas de proteção devem estar limpos, sem sujeira ou poeira e a limpeza deve ser realizada com pano seco e sempre com a utilização de luvas de proteção contra choques elétricos.

2.6. Outros Trabalhos

Os estudos bibliográficos anteriores contribuíram para o embasamento teórico sobre os métodos de manutenção em sistemas fotovoltaicos. A manutenção elétrica tem um papel importante para o desempenho de geração em usinas solar fotovoltaicas.

Pinho e Galdino (2014), apresentaram um manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos para impulsionar o uso de energia solar no Brasil, abrangendo os conceitos básicos, o conhecimento das tecnologias usadas atualmente no mercado, os procedimentos de elaboração, instalação e manutenção dos equipamentos. Visam promover uma melhor qualificação técnica dos profissionais envolvidos na área. Esse trabalho colaborou na estruturação de parte da fundamentação teórica, na compreensão dos aparelhos utilizados e na realização das atividades experimentais na usina em que outros elementos foram aprofundados.

O trabalho de Alves Filho (2023) buscou soluções para o gerenciamento energético do *campus* Garanhuns do Instituto Federal de Pernambuco. Seu estudo identificou e avaliou potenciais modos de falha, suas causas e efeitos, além de recomendar medidas de mitigação na UFV do campus. Através do preenchimento do formulário com aplicação de metodologia FMEA (Análise dos Modos e Efeitos de Falha), identificou vulnerabilidades e riscos associados à operação da usina solar fotovoltaica, bem como propôs medidas de manutenção para garantir a confiabilidade do sistema. Um aperfeiçoamento e olhar em desdobramento será apresentado ao longo dos próximos capítulos.

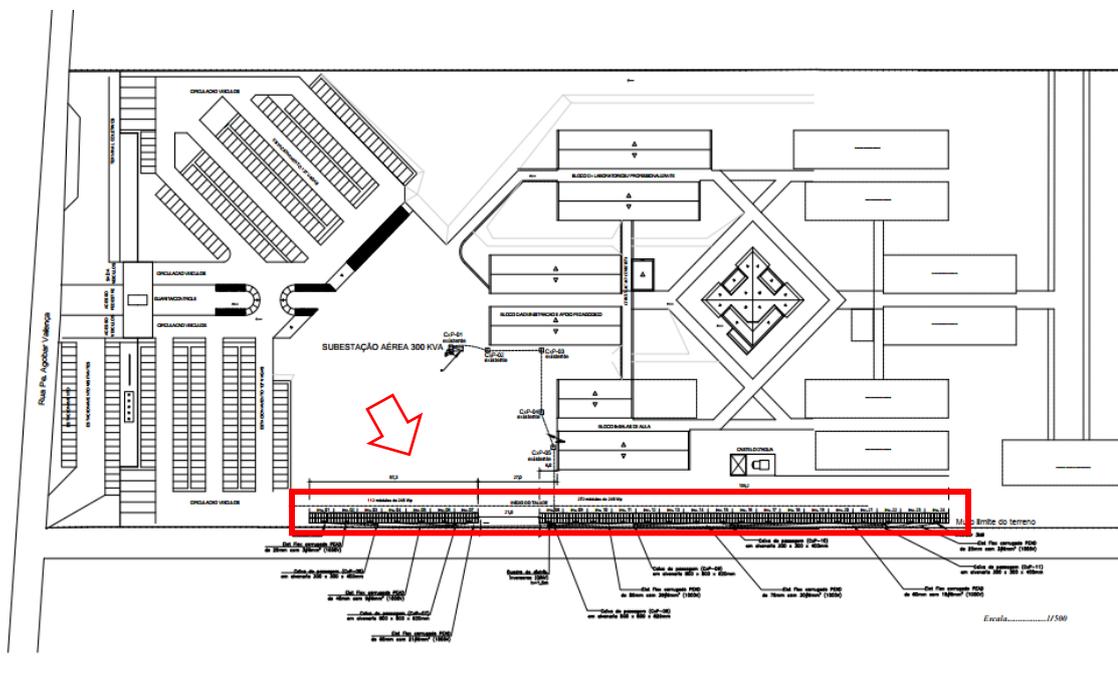
3. METODOLOGIA E DIAGNÓSTICO PRELIMINAR

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia adotada para a elaboração do trabalho, destacando seus objetivos e os procedimentos empregados. São descritos o desenvolvimento e a aplicação do projeto, que consiste em um plano integrado de manutenção elétrica para o IFPE – Campus Garanhuns, contemplando a usina solar fotovoltaica. O propósito central é promover maior eficiência operacional do sistema, reduzindo custos e fortalecendo a confiabilidade das instalações.

3.1. Levantamento de dados

A usina solar fotovoltaica do IFPE *Campus* Garanhuns (Figura 3.1) entrou em operação no mês de maio de 2021, desempenhando um papel essencial na economia tarifária e também na formação dos alunos dos cursos superiores de Engenharia Elétrica e do curso técnico de eletroeletrônica (modalidades integrado e subsequente). Ela também foi um ativo importante utilizado na formação de Eletricistas Fotovoltaicos do programa EnergIf.

Figura 3.1 - Planta com destaque à Usina Solar Fotovoltaica do IFPE.



Fonte: Pedrosa Filho (2017).

O campus tem uma usina solar fotovoltaica com potência instalada de 72 kW, sendo 97,92 kWp (quilowatt pico), classificada como microgeração de acordo com o

Art. 2º, inciso XXIX-A da Resolução Normativa Nº 1000, de 07 de dezembro de 2021 da ANEEL. Ela se encontra no formato *on-grid* (conectada à rede), sendo constituída por 384 painéis solares fotovoltaicos de silício policristalino de 255 Wp (watt pico) conectados à 24 inversores com potência de 3 kW cada, abrangendo uma área de 627 m² subdivididos em dois grandes segmentos.

Cada inversor, de modo geral, é conectado à duas *strings* formadas por 8 placas solares, sendo o total de 16 placas em cada inversor da usina (Figura 3.2). A usina é um agente importante para o desenvolvimento dos cursos ofertados no campus e, sobretudo, para administração financeira do insumo energia elétrica do campus.

Figura 3.2 – Exemplo de *string* da Usina Fotovoltaica do IFPE próxima do quadro CA.



Fonte: autoria própria.

O campus não dispõe de equipamentos para o auxílio da análise de dados em tempo real como sensores, o que impossibilita o monitoramento remoto do sistema. Atualmente não é aplicado um plano programado de manutenção e de limpeza na usina solar fotovoltaica do campus, havendo ações pontuais sob demanda baseadas normalmente em percepções de poeiras ou crescimento da vegetação no local onde a usina está instalada. A ausência de um plano bem estabelecido pode indicar uma capacidade remanescente de geração não utilizada.

3.2. Aplicação da Metodologia FMEA

Aplicou-se método FMEA com base em estudos bibliográficos e na pesquisa local desenvolvida por Alves Filho (2023), o qual propôs um plano de manutenção

para a usina fotovoltaica do campus Garanhuns, através da coleta de dados durante a inspeção de campo.

Tabela 3.1 - Plano de manutenção FMEA (Parte I).

ANÁLISE DO MODO E EFEITO DE FALHA											
Projeto: Proposta de manutenção da usina fotovoltaica do IFPE campus Garanhuns						FMEA nº: 01					
Organizado por: Múcio d'Emery Alves Filho						Componente: Usina fotovoltaica					
Responsável do projeto: Múcio d'Emery Alves Filho						Data: 14/06/2023					
INSPEÇÃO											
Item	Função	Modo de Falha	Efeito da Falha	SEVERIDADE	Causa da Falha	OCCORRÊNCIA	Controles atuais	DETECÇÃO	RISCO NPR	Ações recomendadas	Responsáveis
Painel Fotovoltaico	Conversão da radiação solar em energia elétrica	Sujeira ou sombreamento no vidro	Diminuição dos níveis de geração	4	Acúmulo de poeira; Dejetos animais; Vegetação local.	7	Manutenção não-programada	4	112	Inspeção visual periódica; Manutenção preventiva.	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Rupturas no vidro	Perda do produto; Risco de Choque Elétrico; Risco de Incêncio.	10	Interpérie meteorológica; Sobreaquecimento; Manuseio inadequado; Vandalismo.	3	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	5	150	Inspeção visual periódica; Manuseio adequado; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Corrosões na moldura	Danificação do painel; Exposição do painel à infiltração de agentes externos.	7	Exposição a água, umidade e/ou poeira.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	6	84	Inspeção visual periódica; Manutenção preventiva; Manuseio adequado; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Rupturas na moldura	Danificação do painel; Exposição do painel à infiltração de agentes externos.	7	Sobreaquecimento; Manuseio Inadequado.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	6	84	Inspeção visual periódica; Manuseio adequado; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.

Fonte: Alves Filho (2023).

Tabela 3.2 - Plano de manutenção FMEA (parte II).

INSPEÇÃO											
Item	Função	Modo de Falha	Efeito da Falha	SEVERIDADE	Causa da Falha	OCCORRÊNCIA	Controles atuais	DETECÇÃO	RISCONPR	Ações recomendadas	Responsáveis
Painel Fotovoltaico	Conversão da radiação solar em energia elétrica	Descoloração do encapsulante	Diminuição dos níveis de geração	6	Sobreaquecimento; Exposição a raios ultravioleta.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	5	60	Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Rupturas no encapsulante	Diminuição dos níveis de geração	6	Manuseio inadequado; Infiltração de agentes externos.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	5	60	Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Rupturas nas células	Diminuição dos níveis de geração; Pontos quentes;	8	Interpérie meteorológica; Manuseio inadequado.	3	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	5	120	Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Pontos quentes nas células	Diminuição dos níveis de geração	5	Células defeituosas; Sombreamento ; Diodos defeituosos.	6	Escolha de Materiais.	5	150	Inspeção periódica com uso de câmera termográfica; Utilizar materiais de qualidade.	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.

Fonte: Alves Filho (2023).

Tabela 3.3 - Plano de manutenção FMEA (parte III).

INSPEÇÃO											
Item	Função	Modo de Falha	Efeito da Falha	SEVERIDADE	Causa da Falha	OCCORRÊNCIA	Controles atuais	DETECÇÃO	RISCO NPR	Ações recomendadas	Responsáveis
Painel Fotovoltaico	Conversão da radiação solar em energia elétrica	Delaminação	Diminuição dos níveis de geração; Exposição do painel à infiltração de agentes externos.	7	Sobreaquecimento; Umidade.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	5	70	Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Defeitos nos diodos de passagem	Diminuição dos níveis de geração; Redução da tensão de circuito aberto;	6	Curto-circuitos; Descargas Elétricas; Materiais de baixa qualidade.	2	Escolha de materiais; Dispositivos de proteção elétrica.	3	36	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Bolhas ou rupturas na camada inferior (backsheet)	Diminuição dos níveis de geração; Exposição do painel à infiltração de agentes externos.	7	Sobreaquecimento; Umidade; Ação animal.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	6	84	Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Corrosão ou ruptura na caixa de junção	Exposição dos terminais elétricos à infiltração de agentes externos; Diminuição dos níveis de geração; Fuga de corrente; Curto-circuito; Risco de incêndio;	9	Sobreaquecimento; Exposição a água, umidade e/ou poeira; Ação animal.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada; Dispositivos de proteção elétrica.	4	72	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Inspeção visual periódica; Manutenção preventiva; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.

Fonte: Alves Filho (2023).

Tabela 3.4 - Plano de manutenção FMEA (parte IV).

INSPEÇÃO											
Item	Função	Modo de Falha	Efeito da Falha	SEVERIDADE	Causa da Falha	OCCORRÊNCIA	Controles atuais	DETECÇÃO	RISCONPR	Ações recomendadas	Responsáveis
Estrutura metálica	Proteção mecânica, fixação e sustentação dos painéis	Corrosão na estrutura	Danificação ou perda dos painéis	8	Exposição a água, umidade e/ou poeira; Ação animal; Material de baixa qualidade.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	5	80	Inspeção visual periódica; Manutenção preventiva; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Rupturas/Torções na estrutura	Danificação ou perda dos painéis	8	Sobreaquecimento; Material de baixa qualidade.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	5	80	Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
Condutores	Conduzir corrente elétrica por entre os diversos elementos que compõe a usina fotovoltaica	Condutor sobrecarregado	Sobreaquecimento do condutor; Risco de incêndio.	9	Condutores subdimensionados; Falha no sistema elétrico.	3	Escolha de materiais; Dispositivos de proteção elétrica.	2	54	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Defeitos na isolação do condutor	Curto-circuito; Diminuição dos níveis de geração; Abertura de circuito; Corrente de fuga; Sobreaquecimento; Risco de choque elétrico; Risco de incêndio.	10	Flexão dos condutores; Sobreaquecimento; Exposição a água, umidade e/ou poeira; Ação animal; Material de baixa qualidade.	2	Escolha de materiais; Dispositivos de proteção elétrica; Inspeção não-programada.	2	40	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Manutenção preventiva; Utilizar materiais de qualidade; Inspeção periódica; Teste de continuidade.	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.

Fonte: Alves Filho (2023).

Tabela 3.5 - Plano de manutenção FMEA (parte V).

INSPEÇÃO											
Item	Função	Modo de Falha	Efeito da Falha	SEVERIDADE	Causa da Falha	OCCORRÊNCIA	Controles atuais	DETECÇÃO	RISCONPR	Ações recomendadas	Responsáveis
Caixa de proteção (string box)	Proporcionar proteção elétrica ao circuito de corrente contínua da usina fotovoltaica	Corrosão ou ruptura no invólucro da string box	Exposição dos terminais elétricos à infiltração de agentes externos; Diminuição dos níveis de geração; Fuga de corrente; Curto-circuito; Risco de incêndio;	9	Sobreaquecimento; Exposição a água, umidade e/ou poeira; Ação animal.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada; Dispositivos de proteção elétrica.	4	72	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Manutenção preventiva; Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
Inversor	Converter a corrente elétrica contínua, proveniente dos painéis, para corrente elétrica alternada	Corrosão ou ruptura no invólucro do inversor	Exposição dos terminais elétricos à infiltração de agentes externos; Diminuição dos níveis de geração; Curto-circuito; Perda do equipamento; Risco de incêndio;	10	Sobreaquecimento; Exposição a água, umidade e/ou poeira; Ação animal.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada; Dispositivos de proteção elétrica.	4	80	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Manutenção preventiva; Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Sobreaquecimento do inversor	Danos ao equipamento; Diminuição dos níveis de geração; Risco de incêndio.	10	Falha dos dissipadores de calor; Acúmulo de poeira e/ou dejetos animais	3	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	4	120	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Manutenção preventiva; Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.

Fonte: Alves Filho (2023).

Tabela 3.6 - Plano de manutenção FMEA (parte VI).

INSPEÇÃO											
Item	Função	Modo de Falha	Efeito da Falha	SEVERIDADE	Causa da Falha	OCCORRÊNCIA	Controles atuais	DETECÇÃO	RISCO NPR	Ações recomendadas	Responsáveis
Inversor	Converter a corrente elétrica contínua, proveniente dos painéis, para corrente elétrica alternada	Sobrecarga no inversor	Sobreaquecimento no inversor; Dano ao equipamento; Diminuição dos níveis de geração	9	Falha elétrica	2	Dispositivos de proteção elétrica	2	36	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Inversor em falta elétrica	Interrupção da geração associada ao inversor	7	Queda de tensão; Falha nos painéis; Disparo dos dispositivos de proteção;	5	Inspeção não-programada	5	175	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Inspeção visual periódica.	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
Central de distribuição	Núcleo de proteção e transmissão de energia da usina fotovoltaica	Corrosão ou ruptura no invólucro da central de distribuição	Exposição dos terminais elétricos à infiltração de agentes externos; Perda da geração; Perda do equipamento; Curto-circuito; Risco de choque elétrico; Risco de incêndio;	10	Sobreaquecimento; Exposição a água, umidade e/ou poeira; Ação animal.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada; Dispositivos de proteção elétrica.	2	40	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Manutenção preventiva; Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
Malha de aterramento	Atuar na proteção contra descargas atmosféricas, dissipar cargas estáticas e mediar conexão Circuito-terra	Ruptura e/ou corrosão nos cabos de aterramento	Pane no sistema de segurança elétrico da usina; Dano ao equipamento; Diminuição dos níveis de geração; Risco de choque elétrico.	9	Interpéries meteorológicas; Sobreaquecimento; Ação animal.	1	Escolha de materiais; Inspeção não-programada; Dispositivos de proteção elétrica.	2	18	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Manutenção preventiva; Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.

Fonte: Alves Filho (2023).

Com base na proposta de Alves Filho (2023), realizou-se inspeções na usina para identificação de seus elementos e possíveis modos de falha. Também foram analisados fatores que não foram abordados no plano, mas que foram identificados ao longo da inspeção.

A inspeção foi realizada de forma visual seguindo a ordem de maior risco NPR apresentada na Tabela 3.1, pois esses índices elevados indicam alta probabilidade de falha, necessitando de uma atenção maior aos equipamentos no quesito de manutenção preventiva. Utilizou-se os equipamentos de proteção individual como luva, capacete e óculos de proteção ultravioleta para que não ocorresse nenhum incidente na realização da atividade.

Alguns modos de falha necessitam de ferramentas apropriadas para realizar a inspeção, equipamentos estes que o campus não tem, como um registrador de dados. Com relação às análises das características elétricas da usina solar fotovoltaica, ainda não é possível o monitoramento em tempo real de forma virtual, sendo o monitoramento realizado através da inspeção visual em cada inversor com o registro de geração total.

3.3. Inspeção da usina

A inspeção da usina foi realizada com a utilização de todos os equipamentos de proteção individual, garantindo a segurança na execução da atividade. Com objetivo de facilitar a identificação dos inversores e de suas *strings*, foram sinalizados o início e o final de cada *string* (Figura 3.3) e também na parte traseiras dos inversores (Figura 3.4), sendo divididos de acordo com o lado A (A1-A7) – compreendendo região oeste da USF e lado B (B1-B17) – lado leste da USF.

Figura 3.3 - Identificação da fronteira de strings adjacentes.



Fonte: autoria própria.

Figura 3.4 - Identificação dos inversores nas estruturas metálicas de suporte.



Fonte: autoria própria.

Verificou-se de forma visual os módulos solares, os inversores, as caixas de proteção (*string box*), os cabeamentos, a estrutura metálica, o aterramento e todo o entorno da usina conforme mostra o Formulário de Registro de Manutenção da Usina Solar Fotovoltaica do IFPE – Campus Garanhuns.

A atividade de inspeção visual foi registrada de forma fotográfica, escrita e, em parte, audiovisual. Manuais do fabricante dos principais equipamentos foram consultados com o objetivo de estudar o funcionamento e as condições de operação dos mesmos. Os inversores utilizados na usina do campus são da marca PHB Eletrônica Ltda., da série SS, o modelo PHB3000-SS. De acordo com o fabricante, o modelo atende rigorosamente as normas de segurança.

Figura 3.5 - Inversor PHB3000-SS.

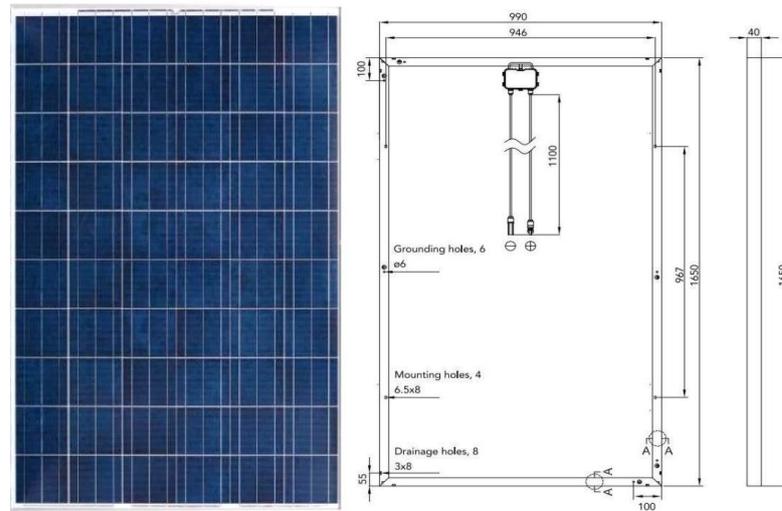


Fonte: autoria própria.

A PHB disponibiliza o manual do usuário do inversor que apresenta todas as orientações de segurança para instalação, operação e manutenção do equipamento, que foram seguidas neste trabalho.

Os painéis solares utilizados na UFV do *campus* Garanhuns foram fabricados pela Yingli Solar que distribui módulos de alta qualidade para uma ampla gama de mercados. Os painéis Yingli (Figura 3.6) são policristalinos com potência de 255 Wp (watt-pico) para aplicações *on-grid* e também *off-grid*.

Figura 3.6 - Módulo Fotovoltaico Yingli YL250P-29b e dimensões.



Fonte: <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-yingli-yl250p-29b-250wp.html?srsId=AfmBOoptrexJIX8AHKtvV2MkCt87izqARY8AUZvRkLDPSHDaXU30Hyhf> (2025).

As especificações de dados técnicos do módulo Yingli são apresentados na Figura 3.7.:

Figura 3.7 - Especificações do Módulo Solar Yingli YL250P-29b.

Model Number	YL250P-29b
STC Rating	250.0
PTC Rating	226.2
Open Circuit Voltage (Voc)	38.4
Short Circuit Current (Isc)	8.79
Frame Color	Silver
Origin	China
Power Tolerance (Watts)	-0 / +5
Module Efficiency	15.3%
Area (ft²)	73.2
Weight (lbs)	42.1
Length (in)	64.96
Width (in)	38.98
Height (in)	1.57

Fonte: Yingli Solar.

Assim como todo equipamento novo, os módulos solares também necessitam de procedimentos a serem seguidos na instalação, sendo indicados pelo fabricante para segurança e pleno funcionamento do sistema. A Yingli Solar recomenda que os

módulos fotovoltaicos sejam montados em um ângulo de inclinação mínimo de 10 graus para permitir a autolimpeza adequada com chuvas normais. Ainda, aponta que o sombreamento nos módulos pode reduzir significativamente o desempenho do sistema. Em geral, recomenda-se minimizar a quantidade de sombra no sistema para aumentar a quantidade de energia produzida pelos módulos fotovoltaicos (Yingli Solar, 2012).

Com o auxílio de uma câmera termográfica (Exemplo na Figura 3.8), é possível inspecionar pontos quentes na superfície dos módulos fotovoltaicos e também na superfície dos inversores, a fim de identificar se os equipamentos apresentam sobreaquecimento e se estão funcionando de acordo com indicações dos fabricantes. Para as ações foi planejado o uso da câmera termográfica modelo Flir C3-x da série Cx-Series, um equipamento portátil projetado para inspeções térmicas de alta precisão. Essa ferramenta é amplamente empregada em aplicações de manutenção elétrica, sistemas HVAC/R, instalações prediais e diagnósticos em edificações, permitindo a detecção eficiente de pontos de aquecimento, falhas em conexões e anomalias térmicas em componentes elétricos e estruturais.

Figura 3.8 - Câmera termográfica Flir C3-x.



Fonte: Autoria própria.

Constatou-se que haviam duas *strings* sem o inversor. Neste caso, realizaram-se testes de curto-circuito e circuito aberto para analisar o estado em que os módulos se encontravam, com auxílio de um multímetro utilizado como voltímetro e um alicate amperímetro. Um dos suportes necessários (equipamento) foi o multímetro Exbom MD-180L, instrumento digital portátil usado para medir diversas grandezas elétricas, como tensão (DC e AC), corrente (DC e AC), resistência e continuidade.

O alicate amperímetro utilizado foi o Aneng CM82 (Figura 3.9), não pertencente ao campus, usado para medir a corrente elétrica em um circuito sem a necessidade de interromper o fluxo de corrente. Esse modelo é projetado para medir tanto corrente alternada (AC) quanto corrente contínua (DC), além de outras grandezas elétricas como tensão, resistência e capacitância. É importante a disponibilização de alicate amperímetro nos processos de manutenção planejados, assim como a presença ideal de um instrumento deste tipo exclusivo para uso pelo setor de manutenção.

Figura 3.9 - Alicate amperímetro CC para medição da corrente em módulos.



Fonte: Autoria própria.

Diante desses apontamentos preliminares, nota-se que é necessário um plano de manutenção e limpeza da usina bem elaborado com todos os recursos necessários na realização da atividade e com os procedimentos indispensáveis que possam ser proporcionar aproximação à geração plena de energia. O serviço de limpeza deve considerado como parte da manutenção preventiva. Medições baseadas em instrumentos podem dar suporte aos processos de manutenção preventiva e preditiva.

3.4. Desenvolvimento do Plano de Manutenção

Um plano de manutenção foi desenvolvido com base no método FMEA, cuja organização prévia foi proposta por Alves Filho (2023). A isso, foram adicionados elementos complementares que não constavam na proposta, os quais foram observados a partir da inspeção realizada na usina, identificando novos elementos a serem analisados e possíveis falhas que não foram abordados/cadastradas anteriormente.

O plano foi organizado de acordo com o tipo de manutenção:

- preditiva: com foco na inspeção visual de todos os elementos do sistema e também entorno;
- preventiva: abordando como deve ser realizada a limpeza programada com segurança (a exemplo, reaperto de parafuso e verificação das conexões);
- corretiva: abordando todas as ações imediatas após identificação de defeitos ou falhas.

3.4.1. Elaboração dos Formulários Técnicos

Os formulários técnicos têm como objetivo guiar e orientar os indivíduos que irão realizar a manutenção na usina, seja preventiva, corretiva ou preditiva. É de grande importância que os formulários sejam respondidos e que todas as informações da manutenção sejam documentadas.

Na elaboração dos formulários, buscou-se detalhar o máximo de informações possíveis para que se tenha uma manutenção eficiente, diminuindo os riscos de acidentes e aumentando a segurança dos funcionários no momento da manutenção.

3.4.2. Informações e Alguns Protocolos para Limpeza

Inicialmente, buscou-se saber com os responsáveis da limpeza e manutenção da usina do campus como são realizados os procedimentos de limpeza, quais equipamentos de proteção são utilizados, os recursos disponíveis e as dificuldades enfrentadas atualmente na realização da atividade. Em seguida, foi escolhido um inversor para realizar a limpeza em duas *strings*, juntamente com os responsáveis.

Durante a realização da atividade, foram repassadas informações sobre a usina, os procedimentos recomendados/corretos a serem seguidos, discutiu-se o que pode ou não fazer na realização da limpeza e sobre os equipamentos que devem ser utilizados para segurança dos indivíduos e do sistema.

Com relação à limpeza dos painéis fotovoltaicos, é necessário seguir alguns protocolos de segurança, como:

1. utilizar equipamentos de proteção individual como calçados fechados de borracha, capacete, óculos de proteção e luvas de borracha;
2. usar roupas de proteção adequadas para evitar lesões nos cantos afiados da estrutura da usina e também no risco de encontrar animais peçonhentos;
3. utilizar equipamentos adequados para limpeza que não venham causar danos às superfícies dos módulos ou na estrutura.

Com base em estudos bibliográficos, foi elaborada a Tabela 3.7 com os procedimentos de limpeza dos módulos, apresentando cada etapa, a ação necessária e as orientações detalhadas sobre a atividade.

Tabela 3.7 - Procedimentos de Limpeza.

Etapa	Ação	Orientações Detalhadas
Antes da limpeza	Desligar a usina	Aguardar módulos esfriarem
Aplicação da água	Água limpa, pressão < 100 psi.	Evitar uso de jato contínuo ou dedo no bico da mangueira.
Remoção da sujeira	Usar esponjas macias e escovas de nylon.	Lado áspero da bucha apenas nas molduras.
Secagem	Rodo plástico não condutivo.	Iniciar pela parte superior dos painéis.
Avaliação	Verificar resíduos, marcas, sujeira persistente.	Repetir se necessário em áreas críticas.

Fonte: Autoria própria.

3.4.3. Requisitos e Procedimentos para a Limpeza dos Módulos

A seguir é apresentada uma sequência de detalhamentos vinculados à limpeza dos módulos fotovoltaicos.

- São permitidos vários tipos de esponjas macias, tecidos, vassouras e escovas macias. O uso de bucha é permitido, sendo que o lado mais áspero da bucha deve ser usado para limpar a estrutura de alumínio (deve-se prezar pelo uso de luvas com isolamento elétrico). A parte áspera da bucha não pode ser usada para limpar o vidro, pois pode arranhar a superfície e prejudicar o desempenho do sistema;
- A limpeza deve ser realizada no sentido de cima para baixo (Figura 3.10), posicionando-se o profissional na parte superior dos módulos. Esse procedimento evita que a água escorra sobre a estrutura do equipamento

de limpeza e também reduz riscos à segurança do trabalhador, prevenindo acidentes decorrentes do aumento da umidade no solo.

Figura 3.10 – Uso de elemento com material macio para a Limpeza dos painéis.



Fonte: <https://www.bv.com.br/bv-inspira/financiamento-para-energia-solar/limpeza-de-paineis-solares> (2025).

- Para garantir a segurança do profissional e também evitar choque térmico nos painéis, a limpeza deve ser realizada no início da manhã entre 06h e 08h da manhã ou no final da tarde entre 17h e 18h, quando a radiação solar é baixa e a superfície das placas não estão quentes, especialmente em regiões com temperaturas mais altas. É importante o uso de um medidor de temperatura caso seja necessário a limpeza em outro horário, pois a temperatura ideal é menor que 30° C preservando a integridade da placa;
- Utilizar mangueira com jatos suaves, evitar jatos contínuos e também evitar colocar o dedo na saída da mangueira para não receber choques elétricos por falhas no aterramento ou isolamento e eventual continuidade na propagação de elétrons entre a área energizada e o profissional;
- Sujidades pegajosas como fezes de pássaro, folhas e entre outras coisas, devem ser limpadas com tecido em um rodo ou escova.

Algumas situações devem ser evitadas no processo de limpeza: ações que podem prejudicar os painéis ou a integridade do sistema e outras que podem causar acidentes no indivíduo que está realizando a atividade (Tabela 3.8).

Tabela 3.8 - O que não deve ser feito na limpeza.

Situação	Ação Proibida	Justificativa
Limpeza dos módulos	Não limpar com módulos quentes (maior que 30° C)	Pode causar choque térmico e danificar o vidro.
Produtos	Não usar detergentes, produtos químicos ou abrasivos.	Pode corroer o vidro e comprometer o desempenho.
Ferramentas	Não usar facas, buchas de aço, MOP, ou vassouras condutivas.	Arranham o vidro e conduzem eletricidade.
Comportamento na limpeza	Não subir nos módulos.	Risco de quebra e acidentes.
Estrutura	Não apoiar ferramentas ou peso excessivo sobre as placas.	Pode causar microfissuras.
Componentes danificados	Não operar módulos trincados ou com cabos expostos.	Risco elétrico elevado.
Pressão de água	Não usar lavadora de alta pressão.	Pode quebrar o vidro e infiltrar água.
Ambiente	Não realizar limpeza à noite ou em total escuridão.	Risco de acidentes e baixa visibilidade.
Aterramento	Não ignorar sinais de corrosão ou rompimento dos cabos.	Compromete a segurança do sistema.

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 3.9 são apresentadas informações sugestivas sobre a frequência em que determinada atividade deve ser realizada em cada item relacionado aos painéis solares da usina:

Tabela 3.9 - Frequência de atividades.

Item	Atividade	Frequência	Observações
Superfície dos módulos	Inspeção visual (sujidades, trincas, manchas, delaminações)	Mensal	Verificar em dias nublados ou com sol baixo.
Limpeza dos módulos	Limpeza com água e escovas macias	Mensal (ou após inspeção)	Sempre das 6h às 8h ou das 17h às 18h.
Moldura	Verificar corrosão ou rachaduras	Semestral	Usar EPI e realizar testes visuais

Fonte: Autoria própria.

Um elemento importante que baliza o horizonte temporal apresentado é o local de instalação da USF do IFPE Campus Garanhuns, frequentemente atingido por poeira decorrente do perfil do terreno do campus, além de eventuais queimadas já verificadas em terrenos/áreas externas do campus, porém próxima da via que se encontra como limite lateral do terreno. Esta frequência, contudo, pode ser revista à medida que dados complementares justificarem. Como parte suplementar à proposta do plano de manutenção, foi realizada uma análise experimental para mensurar o ganho de eficiência elétrica decorrente da limpeza dos módulos fotovoltaicos. Para

isso, utilizou-se um piranômetro para medir a irradiância solar incidente e comparou-se a potência gerada no inversor antes e depois da limpeza de duas *strings* específicas conectadas no inversor. O piranômetro utilizado foi o modelo Kipp & Zonen CMP3 que possui uma sensibilidade $12,9 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Figura 3.11).

Figura 3.11 - Uso do piranômetro para medir a irradiância solar e registro da tensão de saída no multímetro habilitado como voltímetro.



Fonte: autoria própria.

Para realizar a medição, inicialmente pode ser colocado o piranômetro na borda de superfície dos módulos ou alguma estrutura de suporte auxiliar com a devida inclinação. Com auxílio de um multímetro é medida a tensão de saída (U_{emf}) do equipamento. Ao mesmo tempo, deve ser realizado o registro da potência que está sendo gerada no inversor de uma das *strings* correspondentes. Com isso, é realizado o cálculo para mensurar a eficiência nos módulos. É importante tomar cuidado para evitar que o medidor possa influenciar a leitura da potência por via de sombreamento do módulo.

É calculada a irradiação solar em watts/m^2 , através da equação abaixo:

$$E_{solar} = \frac{U_{emf}}{\text{Sensibilidade}} \quad (3.1)$$

Em seguida, calcula-se a potência média por painel em watts:

$$P_{m\u00e9dia} (\text{por_painel}) = \frac{P_{total_medida}}{16} \quad (3.2)$$

Para calcular a potência incidente no módulo é necessário saber a sua área em m^2 , através do seu datasheet ou medindo suas dimensões com auxílio de uma trena. A potência incidente é dada por:

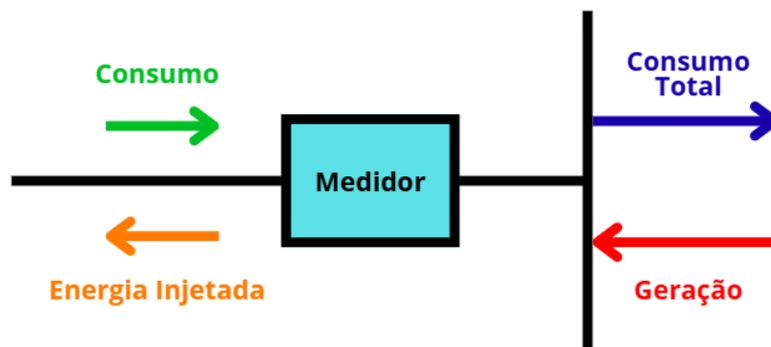
$$P_{incidente} = E_{solar} * \text{Área do painel} \quad (3.3)$$

Por fim, para calcular a eficiência dos módulos tem-se a equação:

$$Eficiência = \frac{P_{média(por_painel)}}{P_{incidente}} \quad (3.4)$$

Após a limpeza, averiguou-se também a eficiência nos módulos limpos e posteriormente nos módulos vizinhos que não foram lavados para fins de comparação. Com o objetivo de mensurar o impacto da limpeza dos módulos na fatura de energia do campus, analisou-se as faturas do ano de 2024. Com isso, fez-se o levantamento da carga do campus com base no consumo e na geração da usina, conforme o diagrama da Figura 3.12.

Figura 3.12 - Diagrama para análise do consumo de energia elétrica do campus.



Fonte: Autoria própria.

Ademais, os dados disponibilizados na fatura são do consumo mensal (ponta e fora ponta) e do valor da energia injetada no mês mensurados pelo medidor em kWh. Para definir o valor do consumo total se somou o consumo ativo faturado na ponta e fora ponta com a geração da usina.

$$\text{Consumo Total} = \text{consumo} + \text{geração da usina} \quad (3.5)$$

Um fator importante para analisar o impacto da limpeza da usina é o desempenho de geração apresentado atualmente no display dos inversores. Com isso, fez-se a análise e comparação desses dados. Os dados permitiram quantificar o impacto da sujidade sobre a geração da usina e fundamentar tecnicamente a periodicidade ideal da limpeza preventiva.

Foi realizada uma simulação com os dados da usina para saber sobre a geração esperada, afim de comparar os dados reais de geração e identificar as perdas

e limitações atuais do sistema. Na projeção da usina foram utilizados dados como: a potência instalada de 98,04 kWp, a irradiância global no plano inclinado na cidade de Garanhuns disponibilizados no Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª Edição (2017) conforme a tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Irradiância global (Wh/m²*dia) no plano inclinado na cidade de Garanhuns.

Anual	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
5245	5675	5536	5822	5309	4530	4084	4195	4787	5503	5638	6019	5846

Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª Edição (2017).

Os valores apresentados estão divididos pelos meses do ano e também é apresentado a irradiância solar anual. Adotou-se um Fator de Desempenho (PR) igual a 0,80 para estimar a geração projetada da usina fotovoltaica do campus. O PR representa a relação entre a energia efetivamente gerada pelo sistema e a energia teórica, considerando apenas a irradiação solar incidente nos módulos. A estimativa do PR reflete com mais fidelidade a situação atual da usina analisada e permite uma comparação realista entre a geração esperada e a geração medida. Na realização da projeção da geração da usina, realizou-se o cálculo da geração esperada em cada mês.

$$E_{projetada\ mensal} = 30 * Irradiação\ global\ (Wh/m^2 * dia) * Potência\ (kWp) * PR$$

Os valores medidos de geração foram disponibilizados pelo leiturista do campus, o qual realiza o registro da geração de forma mensal e individual de cada inversor. O valor disponibilizado é a potência total (E-TOTAL) gerada pelos inversores desde que a usina foi ligada. Para saber a potência gerada em cada mês realizou-se a subtração do mês anterior com o mês atual e assim, estruturou-se os dados de geração reais.

Os dados obtidos foram do ano de 2024, pois o leiturista registrou os dados de 10 meses do ano. Os dados dos outros anos não foram contemplados para fins de análise por estarem incompletos. Para os meses de janeiro e dezembro, em que não foram realizadas as medidas, calculou-se a média do mês antecessor e sucessor para completar a análise de 2024.

4. RESULTADOS E ANÁLISES: INSPEÇÕES, MEDIÇÕES E ESTIMATIVAS

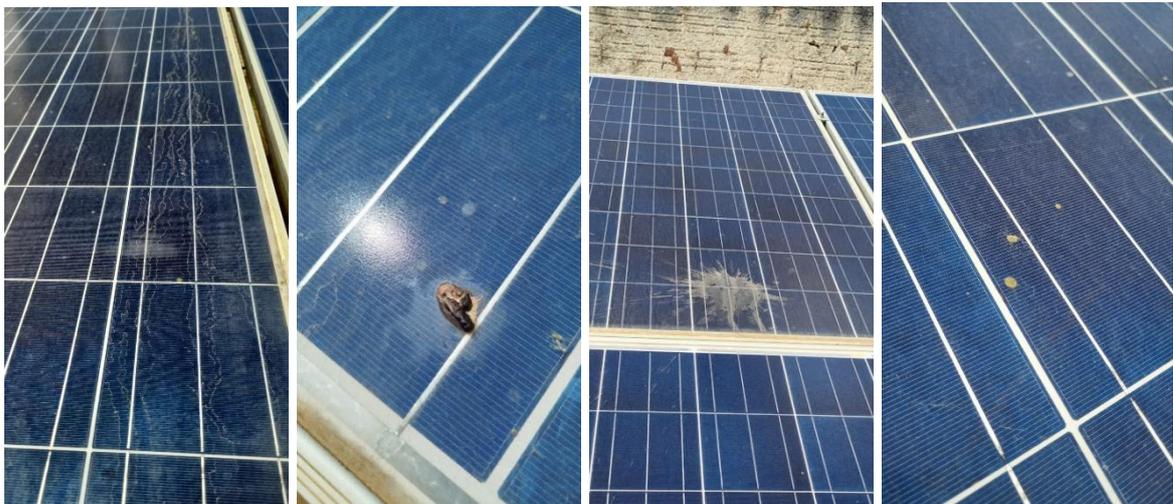
Nesta seção serão discutidos os resultados alcançados para os objetivos propostos no trabalho.

4.1. Inspeção e Falhas Identificadas

Para a coleta de dados da usina solar fotovoltaica realizou-se uma inspeção no local da usina, com base na Tabela elaborada por Alves Filho (2023) através do método FMEA, onde foram analisados alguns fatores apontados na tabela e também alguns fatores adicionais encontrados ao longo da inspeção, os quais não haviam sido abordados. A seguir serão apresentadas as análises realizadas na usina.

Observaram-se diversas sujidades nos módulos solares, resultando em uma menor captação de luz solar nas placas e diminuindo os níveis de geração.

Figura 4.1 - Sujidades em módulos da usina fotovoltaica do IFPE (Campus Garanhuns).



Fonte: Autoria própria.

Diversos tipos de acúmulos de poeira foram encontrados nas superfícies dos painéis solares e também dejetos de animais. Esses acúmulos podem provocar perdas de desempenho no sistema. Também foi encontrado barro na superfície, decorrente de respingos do solo em face da altura dos módulos. Isto ocorre como resultado da ação da chuva, em que alcançam a superfície dos módulos e prejudicam a performance do sistema.

A poeira na superfície dos módulos foi um dos pontos mais perceptíveis na inspeção. Percebeu-se que nas extremidades direita e inferior dos módulos havia uma

concentração maior de poeira do que nas extremidades esquerda e superior (Figura 4.2). Isso acontece por causa da direção do vento, que faz com que o pó se concentre nas extremidades dos painéis, sendo necessária uma limpeza eficaz para garantir uma boa radiação de luz nos módulos e não comprometer a geração.

Figura 4.2 – Acúmulo de partículas de poeira na superfície dos módulos.



Fonte: autoria própria.

Outro ponto a ser destacado é a perda de suporte mecânico do solo (erosão) – Fig. 4.3, ocasionando riscos à estabilidade mecânica pela proximidade da estrutura com relação ao barranco (ponto de inclinação limite do solo). Isso ocorre, sobretudo, como consequência da chuva que, ao longo do tempo, gerou a diminuição do espaço superior de terra através da erosão, expondo parte das bases de sustentação (alvenaria). Há a demanda de uma medida para mitigar esse problema poderia ser a instalação de calha coletora de água ou reforços no solo não venha a ceder mais ao longo do tempo, principalmente nos períodos de chuva (potencial deslizamento).

Figura 4.3 – Registro de erosão no solo e exposição da base da estrutura.



Fonte: autoria própria.

A estrutura metálica demonstrou alguns indícios de corrosão, principalmente nos parafusos e porcas de fixação dos módulos, acarretando a não segurança dos painéis e também da estrutura de sustentação do inversor e da *string box*, como mostra a Figura 4.4, sendo possível perceber o deslocamento de algumas placas, podendo causar danos ou perdas dos painéis. Além da ação corretiva eminente, o olhar cíclico para o estado de conservação destes elementos deve ser objeto de avaliação pelo setor correspondente.

Figura 4.4 - Estrutura metálica da usina.



Fonte: Autoria própria.

A caixa de proteção CC (*string box*) apresentou sujidades como dejetos de animais e também poeira, bem como nas travas de segurança da caixa. Verificou-se também que haviam travas entreabertas, comprometendo o isolamento dos equipamentos internos da caixa, permitindo a propagação de alguns insetos e pequenos animais em seu interior (aranhas, escorpiões). Outro ponto eminente é o aumento da umidade neste ativo, o que pode implicar em falhas futuras como curto-circuito nos barramentos, aceleração de processos corrosivos nos barramentos positivo e negativo.

Figura 4.5 – Detecção de sujeira na *Stringbox*.



Fonte: Autoria própria.

No processo de aplicação da metodologia, analisou-se os eletrodutos da saída dos inversores de frequência, em que alguns apresentaram desgaste em virtude do sol que impactou em seu rompimento (Figura 4.6). Esse problema evidencia riscos para a instalação elétrica e para a segurança do sistema. Há uma exposição dos condutores internos a ações externas (entrada de água, umidade, pequenos insetos), aumentando a probabilidade de curto-circuito.

Figura 4.6 – Danos constatados em Eletrodutos na saída dos inversores.



Fonte: autoria própria.

Na fixação dos eletrodutos e na fixação dos cabos condutores na estrutura metálica são utilizadas abraçadeiras de plástico, observou-se que algumas delas estavam ressecadas e rompidas, fazendo com que os condutores perdessem sua fixação na estrutura.

Figura 4.7 - Estrutura metálica da usina.



Fonte: autoria própria.

Na inspeção dos módulos solares, foi detectada a descoloração do encapsulante (Fig. 4.8). Esse fator contribui para diminuição dos níveis de geração, com mudanças evidentes nas curvas I-V e P-V, algo que pode ter como causa

eventual impacto ou quebra da cadeia polimérica do encapsulante, conduzindo à formação dos cromóforos, que podem aumentar drasticamente a absorção na escala espectral na faixa do ultravioleta ou do visível ou em ambos, causando o aumento da fotodegradação (CASSINI *et al.* 2018). Esse problema ocorre muito em regiões quentes e úmidas, onde a degradação térmica do EVA, provoca alterações na coloração do material, comprometendo o desempenho da usina ao longo do tempo.

Figura 4.8 – Descoloração do encapsulante: módulos solares prejudicados.



Fonte: Autoria própria.

Constatou-se que a vegetação local cresce abaixo e ao redor da usina (Figura 4.9). Isto traz diversos impactos negativos para a operação e segurança do sistema. Outrora havia resistência da vegetação remanescente em relação aos processos de limpeza. Em resultado, algumas espécies provocavam sombreamento. O olhar preventivo, neste cenário, se mostra oportuno.

Figura 4.9 - Estrutura metálica da usina.



Fonte: autoria própria.

Em uma das visitas a UFV do campus, observou-se que funcionários terceirizados estavam realizando a remoção da vegetação local (Figura 4.10). A remoção periódica de parte das espécies pode garantir a eficiência do sistema,

embora haja a necessidade de olhar mais preciso em relação à aceleração do processo de erosão.

Figura 4.10 – Condução de limpeza da vegetação ao redor da usina por terceirizado.



Fonte: autoria própria.

O sombreamento não é causado apenas pela vegetação (Fig. 4.11). Observou-se na inspeção que alguns parafusos de fixação das placas na estrutura causam sombreamento devido ao seu tamanho (não proporcional) ao objetivo de utilização.

Figura 4.11 - Sombreamento causado por parafuso da estrutura.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 4.12 é apresentado outro perfil de vegetação, próxima da usina, porém que se localiza na parte externa do campus, em que, devido à ação dos ventos, folhas são levadas até a superfície dos painéis, causando sombreamento e prejudicando o desempenho da geração. Diante disso, é necessário adotar medidas para amenizar os efeitos causados pela vegetação por parte do setor de manutenção. Ações que podem ser tomadas:

- realizar a poda das árvores externas de forma regular;

- recolher as folhagens ou utilizar um soprador de folhas sobre os módulos de maneira cíclica.

Figura 4.12 - Sombreamento causado por folhas de espécie de vegetação da área externa.



Fonte: Autoria própria.

Outro ponto de inspeção foi o sistema de aterramento da usina solar do campus, em que já há a demanda de manutenção corretiva por verificação da tampa quebrada em alguns pontos (Fig. 4.13). Em algumas caixas não foi verificada tampa, permitindo a entrada de animais, incluindo pequenos aracnídeos (já detectados). Este fator proporciona risco significativo para a segurança da instalação e das pessoas que circulam pelo local, incluindo os responsáveis pelas ações de limpeza da vegetação. Alguns roedores podem comprometer o estado dos cabos ou escavar ao redor das conexões, comprometendo a continuidade elétrica e reduzindo a eficácia do sistema de aterramento. Outra consequência é o aumento de umidade que pode acelerar o processo de oxidação das conexões, reduzindo a eficiência da proteção.

Figura 4.13 – Caixa de aterramento.



Fonte: Autoria própria.

As normas brasileiras de instalações elétricas e de sistemas fotovoltaicos afirmam que o sistema de aterramento deve ser mantido em condições seguras, garantindo a proteção contra falhas elétricas. Logo, se faz necessário ações que possam mitigar esse problema como substituir as tampas de proteção dos aterramentos ou a utilização de malhas de proteção para impedir a entrada de animais.

Com relação aos inversores, estão instalados abaixo dos módulos solares e não estão totalmente protegidos da chuva e do sol, como sugere o fabricante. Além disso, apresentaram sujidades em sua estrutura e isto pode comprometer o desempenho e a vida útil dos mesmos. As sujidades nos inversores (Fig. 4.14) podem obstruir as entradas e saídas de ventilação, reduzindo a dissipação de calor e proporcionando um sobreaquecimento do equipamento, levando à redução da sua eficiência e diminuindo os níveis de geração.

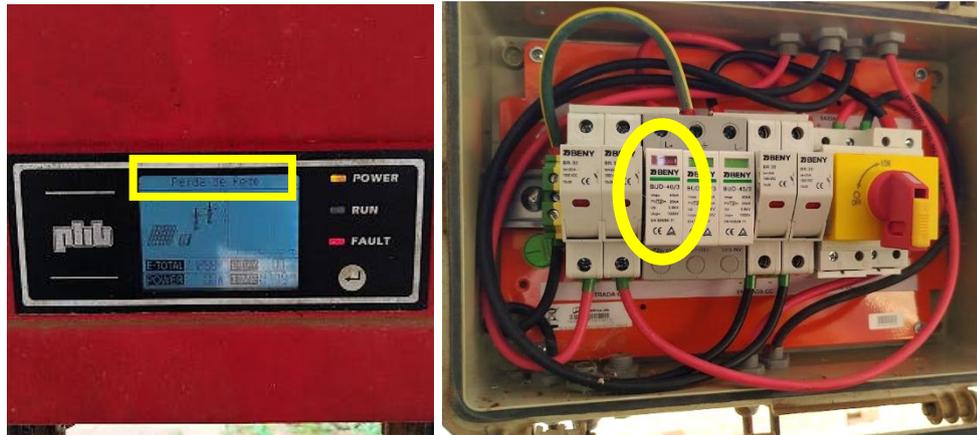
Figura 4.14 – Verificação de sujidades nas aletas metálicas de difusão de calor do Inversor.



Fonte: Autoria própria.

Dois inversores demonstraram problema: os de referência B12 e B14, em que o LED vermelho estava sinalizando alguma falha (*FAULT*), correspondente à “Perda de Rede”. Assim, a rede não se encontrava conectada, ocasionando demandas de manutenção corretiva, sendo necessária a verificação das conexões do lado CA e a verificação da tensão da rede para descobrir a causa da falha através da manutenção corretiva, conforme o manual do usuário do inversor. O Dispositivo de Proteção contra Surtos, conhecido como DPS, estava em vermelho sinalizando que o equipamento pode ter atingido seu limite de operação, necessitando de substituição por outro com características adequadas à instalação (Fig. 4.15).

Figura 4.15 – Inversor com perda de rede e DPS em aberto na *string box*.



Fonte: autoria própria.

É importante investigar as possíveis causas do surto, como descargas atmosféricas ou problemas que aconteceram na rede elétrica. Na realização da inspeção à usina fotovoltaica do campus, certificou-se que o inversor B1 se encontra ausente juntamente com toda *stringbox*. De acordo com os responsáveis pela manutenção da usina, o inversor foi retirado para reparo de problemas técnicos no dia 18 de outubro de 2023. Até o mês de julho de 2025 o inversor não foi reparado ou substituído, ocasionando na redução de aproximadamente 4,17% da geração total da usina. Todo o cabeamento das duas *strings* relacionadas ao inversor encontra-se desordenado e desconectado do restante da usina.

Figura 4.16 – *Strings* sem o inversor.



Fonte: autoria própria.

4.2. Testes Elétricos e Termografia

Em relação ao último ponto da seção anterior, foram realizados alguns testes com o objetivo de verificar o estado dos módulos fotovoltaicos pertencentes às duas *strings* que se encontram sem conexão ao inversor B1, testes de curto-circuito e circuito aberto, cujos resultados estiveram dentro dos parâmetros.

Os ensaios de tensão de circuito aberto (V_{oc}) e corrente de curto-circuito (I_{sc}) foram conduzidos utilizando um multímetro, com os resultados comparados aos dados fornecidos pelo fabricante. Os valores aferidos estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Teste de curto-circuito e circuito aberto.

Testes	Parâmetros do fabricante	Valores medidos
Curto-circuito (I_{sc})	8,79 A	4,69 A
Circuito aberto (V_{oc})	38,4 V	37,6 V

Fonte: Autoria própria.

A a tensão de circuito aberto (V_{oc}) apresentou um valor próximo ao nominal, o que indica que os módulos ainda estão recebendo irradiância e convertendo energia de forma razoável. Por outro lado, corrente de curto-circuito (I_{sc}) medida apresentou um valor significativamente inferior ao nominal especificado pelo fabricante. Essa diferença é resultado da influência de dois fatores:

- Baixa irradiância solar no momento da medição em decorrência do clima parcialmente nublado no dia dos testes;
- Acúmulo de sujeira e poeira na superfície dos módulos, que reduz a quantidade de radiação absorvida e prejudica o desempenho da geração.

Com o uso de uma câmera termográfica realizou-se a inspeção de alguns pontos quentes nas células dos módulos solares (Fig. 4.17) em alguns locais da usina e também o sobreaquecimento dos inversores, orientando a possibilidade de incorporação deste ativo em manutenção preditiva da instalação. Aspecto importante, neste sentido, seria capacitar responsável(is) pela inspeção na configuração e uso do equipamento.

Ainda na inspeção, verificou-se que uma placa da *string* conectada ao inversor B14 se encontrava com a coloração diferente, apresentando falha na geração do módulo. Com auxílio da câmera termográfica, identificou-se um ponto quente no módulo, sendo necessário um teste de curto-circuito e circuito aberto para saber se

realmente o painel apresenta falhas. Esta é uma ação complementar à inspeção auxiliada por equipamentos (preditiva), pois pode implicar em demanda de substituição do módulo ou mesmo retirada dele da associação (série, por exemplo) caso problemas de desempenho comprometam a geração global.

Figura 4.17 - Estrutura metálica da usina.



Fonte: autoria própria.

Um aspecto sugestivo importante que pode ser incorporado é o levantamento de um banco de dados termográfico das *strings* que compõem o sistema solar FV do IFPE Campus Garanhuns. Análises comparativas ao longo do tempo podem subsidiar intervenções no ativo.

4.3. Levantamento de Dados de Geração e Discussões

A estimativa da geração projetada da usina foi essencial para analisar o impacto da ausência dos três inversores, da limpeza dos módulos e, conseqüentemente, na fatura mensal do campus. Foi possível estimar os valores de geração como mostra a Tabela 4.2. Utilizou-se como referência, a geração projetada mensal da usina, calculada com base em dados médios de irradiação solar no plano inclinado de Garanhuns disponibilizados no Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª Edição (2017) e um fator de desempenho (PR) igual a 0,80, representando bem o cenário.

Tabela 4.2 - Dados da geração projetada.

Mês	Geração média mensal projetada (kWh/mês)
Janeiro	13.336,70
Fevereiro	13.010,04
Março	13.682,17
Abril	12.476,57
Mai	10.645,86
Junho	9.597,73
Julho	9.858,59
Agosto	11.249,83
Setembro	12.932,49
Outubro	13.249,75
Novembro	14.145,13
Dezembro	13.738,57

Fonte: autoria própria.

Como método de análise da geração real, os dados foram registrados por meio de leitura direta do inversor disponibilizada pelo leiturista do campus. Para mensurar a geração mensal, somou-se a potência de cada inversor e calculou-se a diferença do mês anterior, pois os valores disponibilizados no inversor são apenas os valores de geração total desde que a usina entrou em operação.

Para uma análise mais assertiva calculou-se a média de 30 dias sendo o ciclo de geração mensal para fins de comparação com a projeção do sistema, pois alguns valores representavam a geração de 35, 33 ou 29 dias, de acordo com o registro do leiturista (Tabela 4.3).

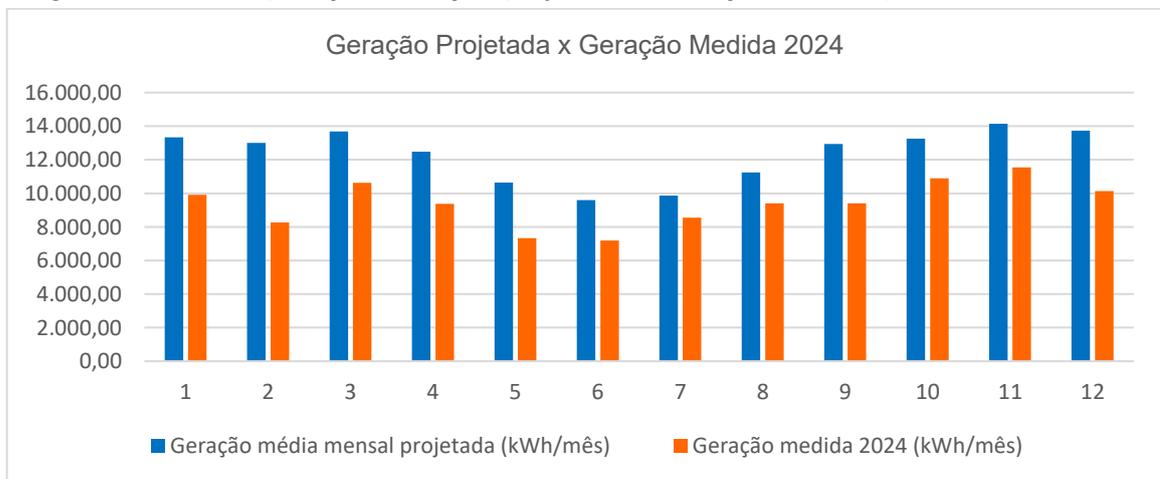
Tabela 4.3 - Dados da geração medida 2024.

Mês	Geração medida 2024 (kWh/mês)
Janeiro	9.910
Fevereiro	8.270
Março	10.620
Abril	9.380
Mai	7.330
Junho	7.181
Julho	8.550
Agosto	9.400
Setembro	9.410
Outubro	10.900
Novembro	11.550
Dezembro	10.140

Fonte: autoria própria.

Os dados não apresentam exatidão para com número de dias/mês, pois a leitura não é feita na mesma data em todos os meses. Geralmente ela é feita entre o terceiro e quinto dia do mês, o que impacta na comparação restrita dos dados de geração, porém a proposta indicada fornece uma boa aproximação (comparação apresentada na Figura 4.18). Para uma análise mais completa acerca dos dados de geração e dos dados de consumo do campus, seria importante que a medição da geração fosse realizada no mesmo dia que é feita a medição da fatura de energia, ou seja, no último dia de cada mês.

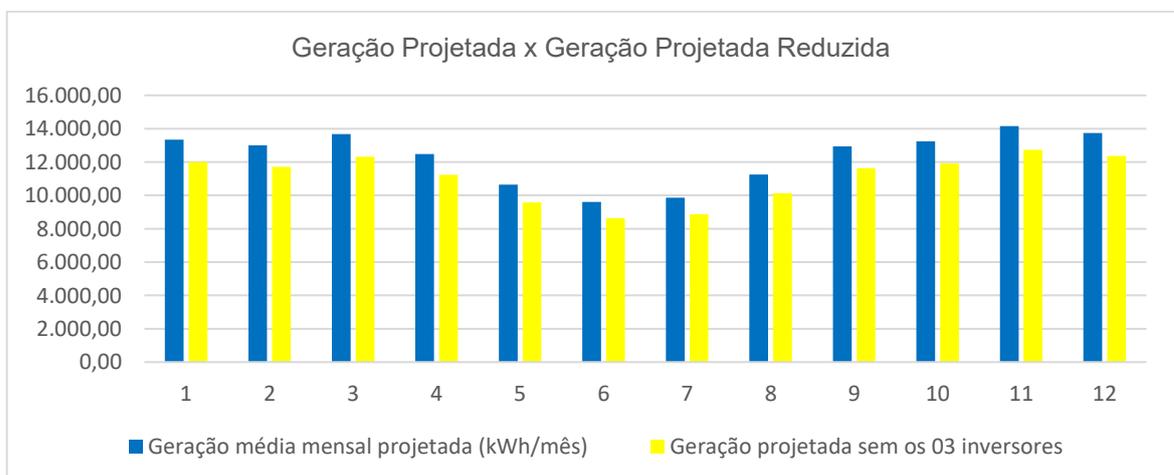
Figura 4.18 – Comparação Geração projetada x Geração medida para o ano de 2024.



Fonte: Autoria própria.

Atualmente, sem o funcionamento total do número de inversores, a usina do campus apresenta uma perda de aproximadamente 12,5% da capacidade de geração total. O cenário de projeção da usina em condições ideais de geração foi comparado com o cenário de projeção de 100% de funcionamento do sistema (Fig. 4.19).

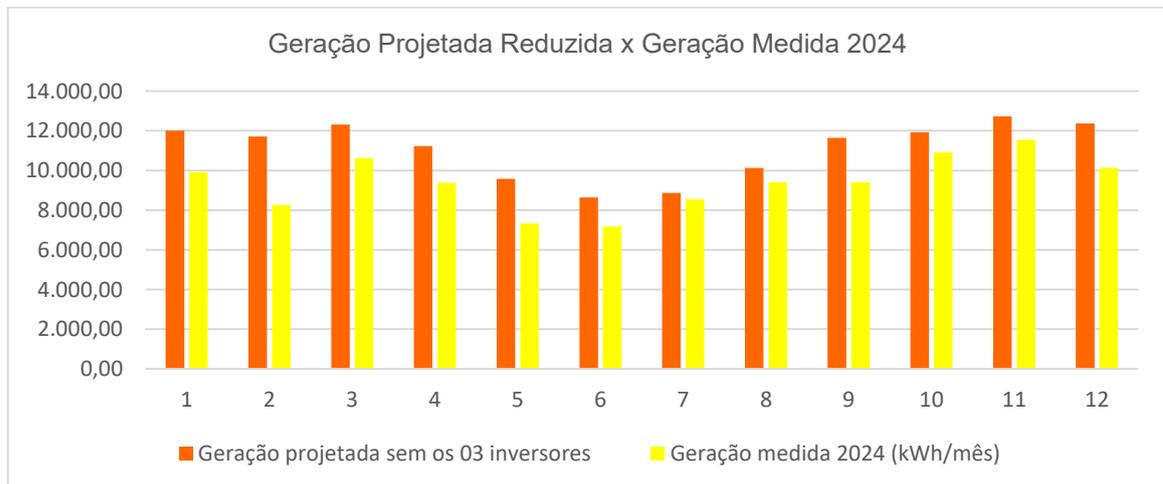
Figura 4.19 – Comparação entre Geração projetada x Geração projetada reduzida.



Fonte: Autoria própria.

Analisando o cenário de geração projetada reduzida em 12,5% e o cenário de geração 2024, observou-se que a geração medida não alcançou o desempenho esperado (Fig. 4.20).

Figura 4.20 – Comparação entre Geração reduzida x geração medida 2024.



Fonte: Autoria própria.

Essa defasagem pode ser atribuída a diversos fatores e cujo cenário de manutenção contribuiria sobremaneira. O acúmulo de sujidades sobre os módulos, a presença de sombreamentos parciais e perdas associadas ao cabeamento e conexões elétricas podem ser causalidades. Tais elementos impactam diretamente a eficiência do sistema, reforçando a importância de ações regulares de manutenção preditiva, preventiva e corretiva.

4.4. Perspectivas e Impactos da Limpeza do Sistema FV

Com o intuito de avaliar o impacto eventual da limpeza nos módulos fotovoltaicos da UFV do IFPE – *Campus* Garanhuns, realizou-se uma análise comparativa entre os dados de geração antes e depois da limpeza de duas *strings* compostas por 8 módulos. Essas *strings* estão conectadas ao inversor B2, que possibilita o monitoramento do comportamento da geração.

Com o auxílio do piranômetro foi medida a irradiância na superfície inclinada dos módulos antes e depois da limpeza, conforme apresentado na Tabela 4.4. As condições climáticas impactaram diretamente na geração no dia da limpeza e, por esse motivo, as potências medidas e a tensão de saída foram baixas. Ainda assim foi possível analisar o impacto da limpeza dos módulos, resultando no aumento da eficiência de 11,68% para 12,61%.

Tabela 4.4 - Impacto antes e depois da limpeza.

Ação	Horário (h)	Potência medida (W)	Tensão de Saída (mV)	Eficiência (%)
Antes da limpeza	15h23	1309,1	5,7	11,68
Depois da limpeza	16h08	792,8	3,2	12,61

Fonte: Autoria própria.

Três dias após a limpeza dos módulos, quando as condições climáticas estavam mais favoráveis (irradiância maior), mediu-se mais uma vez a eficiência na superfície dos painéis. Para fins de comparação, foram consideradas as *strings* do inversor vizinho (B3). Disso, averiguou-se a eficiência dos módulos que foram lavados (B2) em comparação a de uma *string* que não teve este tipo de ação.

Tabela 4.5 - Impacto da limpeza dos módulos limpos e não limpos.

Ação	Potência medida (W)	Tensão de Saída (mV)	Eficiência (%)
Módulos que não passaram por limpeza (B3)	2712	8,1	17,04
Módulos que passaram por limpeza (B2)	2751	7,5	18,67

Fonte: Autoria própria.

Os resultados foram satisfatórios quanto ao impacto que a limpeza pode causar na geração, demonstrando que de fato esta é uma ação corretiva importante, a qual contribui para melhoria do desempenho da usina. Ainda, tomando como base um cenário em que toda a usina estivesse nas mesmas condições das duas *strings* analisadas, contando com o funcionamento pleno dos 24 inversores, a limpeza completa dos 384 módulos poderia resultar em um ganho significativo na eficiência do sistema, reforçando a importância da manutenção no contexto da limpeza regular dos módulos da usina.

Vale ressaltar que a realização da atividade foi em época de inverno, ou seja, os módulos já tinham passado por limpeza parciais em decorrência do regime de chuvas. Isso mostra que a limpeza natural pode não resolver plenamente os efeitos das sujidades como a limpeza manual, sobretudo identificada a sujeira remanescente nas bordas inferiores dos módulos. De outro modo, a limpeza natural por intermédio da chuva não descarta a limpeza manual, a depender das condições verificadas em inspeção (o monitoramento cíclico pode ser incorporado às ações de manutenção preventiva). Outro fator importante para analisar a frequência de limpeza é o desempenho da usina através da potência indicada no inversor.

5. FORMULÁRIOS DE SUPORTE À MANUTENÇÃO DA USINA FOTOVOLTAICA

Um plano de manutenção bem elaborado pode proporcionar mais eficiência e segurança à usina solar fotovoltaica. Em desdobramento, há o objetivo de minimizar as falhas, garantir que os níveis de geração alcancem um bom desempenho e que os equipamentos possam ter uma vida útil prolongada, incorporando globalmente a manutenção preventiva, corretiva e preditiva.

Os módulos fotovoltaicos do campus foram fabricados pela Yingli Solar. A empresa recomenda que os sistemas fotovoltaicos sejam inspecionados periodicamente pelo instalador ou outra pessoa qualificada com o objetivo de garantir que todos os componentes do sistema estejam funcionando corretamente. Considerando ainda a *string box*, estruturas metálicas, quadro CA, caixas de passagem, sistema de aterramento, dentre outros, podemos destacar elementos instrumentais basilares a este processo preditivo: multímetro (com habilitação tipo voltímetro CC, CA), alicate amperímetro CA/CC, câmera termográfica, câmera fotográfica ou celular, trena, megôhmetro, binóculo e analisador de qualidade da energia.

Os demais itens da tabela devem ser inspecionados pelo menos duas vezes ao ano, pois as falhas não ocorrem com tanta frequência e são mais simples de serem identificadas. A identificação de intempéries climáticas também pode ser um indicador para análise de desempenho (queimadas, poeira).

É de grande importância manter documentado todas as falhas e manutenções. Sempre que identificado um problema com risco moderado ou crítico, deve-se realizar isolamento da área, reportar imediatamente ao responsável pela manutenção da usina, planejar uma ação corretiva e substituir peças defeituosas com base no manual do fabricante.

Ao setor de manutenção, é possível prover um documento de acompanhamento das atividades. Neste sentido, a seguir (Tabela 5.1) será apresentado um formulário para que sejam organizadas todas as etapas da manutenção preditiva.

Tabela 5.1 – Formulário de acompanhamento da manutenção da UFV do campus.

Formulário de Registro de Manutenção: USF do IFPE – Campus Garanhuns					
1. Identificação da Atividade					
Data da manutenção: ____/____/____					
Hora de início: _____ Hora de término: _____					
Profissional(is) responsável(is): _____					
Manutenção auxiliada por instrumentos/medidores? () sim () não					
Instrumentos utilizados: _____					

2. Condições Ambientais e de Segurança					
Item	Sim	Não	Observações		
EPIs utilizados corretamente	()	()			
Clima favorável para a atividade	()	()			
Sistema desligado e seguro para trabalho	()	()			
Área de trabalho sinalizada/isolada	()	()			
3. Checklist Técnico por Componente					
Item	Ação		Sim	Não	Observação
Módulos	Presença de sujeiras, fezes, poeira ou manchas.				
	Trincas no vidro, delaminação, hot spots visíveis.				
	Corrosão ou descoloração do encapsulante.				
	Verificação da integridade da moldura de alumínio.				
	Sombreamento causado por vegetação ou objetos externos.				
Estrutura Metálica	Parafusos e conexões firmes, sem afrouxamento.				
	Oxidação em perfis metálicos ou pontos de ancoragem.				
	Alinhamento estrutural e fixação de painéis.				
Inversor	Verificação de códigos de falha e status de LEDs (FAULT). Em caso de falhas consultar a sobre os Procedimentos para caso de falhas do inversor PHB				
	Corrosão ou ruptura.				
	Sujeira ou umidade na carcaça e entradas.				
Stringbox	Vedação da tampa e integridade da caixa.				
	Oxidação ou afrouxamento dos conectores internos.				
	Fusíveis e disjuntores operacionais.				
	Insetos ou resíduos no interior.				
Cabeamento	Isolamento preservado, sem fissuras ou desgaste.				
	Conectores MC4 bem encaixados e travados.				

	Continuidade elétrica verificada por multímetro.			
	Fixação dos cabos nas canaletas ou suportes.			
Aterramento	Integridade dos cabos e conectores			
	Conectores aterrados devidamente cravados.			
	Teste de continuidade do aterramento (Ω).			
	Corrosão nas conexões ao solo.			
Área Externa	Vegetação causando sombreamento nas placas.			
	Animais/insetos sob os módulos.			
	Resíduos acumulados ou lixo nas imediações.			

4. Componentes Inspeccionados e Ações Realizadas

Componente	Situação Encontrada	Ação Realizada	Recomendações/ Futuras Ações
Módulos			
Estrutura Metálica			
Inversores			
String Box			
Cabeamentos			
Aterramento			
Vegetação/ Ambiente			

5. Problemas Identificados

Nº _____ Descrição do Problema:

Localização (módulo, *string*, setor):

Ação recomendada:

Nº _____ Descrição do Problema:

Localização (módulo, *string*, setor):

Tabela 5.2 – Formulário de registro da geração mensal.

Formulário Inspeção – Inversor		
Mês: _____		Data: ____/____/____
Inversor	E-TOTAL	Status
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		

Fonte: Autoria própria.

O ambiente ao redor da usina deve ser inspecionado pelo menos três vezes ao ano, com o objetivo de identificar o crescimento da vegetação local (ciclo temporal baseado na incorporação de experiências dos terceirizados) e a moradia de animais que possam eventualmente prejudicar o sistema (pequenos roedores, cobras, corujas e pássaros de pequeno porte já foram observados).

A usina fotovoltaica do campus é composta por 384 placas e, deste modo, é necessário ter um planejamento do período de limpeza e dividir a área em subdivisões. Na realização da limpeza, a partir de verificação *in loco* junto a profissional terceirizado e havendo presente, pelo menos, dois profissionais (requisito verificado admitindo as tarefas de limpeza), é considerado uma média de tempo de limpeza (por módulo) de aproximadamente dois (02) minutos e meio. Isto, considerando uma limpeza manual, dependendo da *expertise* da equipe e da disponibilidade de equipamentos/materiais.

Na realização da limpeza dos módulos, o tempo registrado em campo foi de aproximadamente 40 minutos em duas *strings* - 16 módulos fotovoltaicos (com nosso auxílio em suporte a um único profissional do serviço terceirizado). O tempo médio por módulo pode ser ajustado ao longo do tempo em virtude da rotatividade eventual de profissionais, nível de capacitação e experiência com a realização deste tipo de tarefa.

Como modo de otimizar o processo, é recomendada uma equipe de três (03) a cinco (05) pessoas, impactando tempo global de realização desta atividade, dada as condições climáticas e o horário de entrada/saída dos profissionais. Isto se torna evidente devido ao tamanho da usina e o limite de tempo na parte da manhã (até que os módulos esquentem) e na parte do fim da tarde (iluminação natural reduzida ou ausente no local está instalada a usina).

A equipe deve ser ter presente um técnico na área de Eletroeletrônica ou afim, subsidiando questões de segurança e riscos ao realizar a vistoria. Também deve haver capacitação em relação ao preenchimento do formulário de limpeza. No decorrer da atividade de limpeza dos módulos, nota-se a demanda de um indivíduo para aplicar água, uma pessoa para fazer a remoção da sujeira e outra para realizar a secagem e/ou verificar a limpeza (no caso de dois profissionais, a secagem pode ocorrer após a limpeza úmida). Um fator importante identificado na inspeção é que próximo da usina existe apenas uma torneira, o que impossibilita a realização da atividade por equipes simultâneas. Outro fator a ser avaliado é a pressão de água naquele local do campus, cuja constatação demanda aperfeiçoamento.

Com isso, o tempo médio para limpeza completa da usina seria de 960 minutos, sem levar em consideração o tempo de preparo dos equipamentos e da locomoção até a usina. Logo, se faz necessário a formação de uma equipe para agilizar o processo da atividade, tendo em vista a limitação de tempo dos servidores e do aumento da temperatura que pode prejudicar os painéis caso sejam lavados nessas condições.

No formulário a seguir (Tabela 5.3) são apresentadas todas as informações básicas para realização da limpeza dos módulos da usina, com o objetivo de garantir a segurança das pessoas que irão realizar a atividade, do sistema e uma limpeza mais eficiente.

Tabela 5.3 – Formulário de acompanhamento da limpeza dos módulos.

Formulário de Registro de Limpeza dos Módulos Fotovoltaicos – Usina Solar IFPE – Campus Garanhuns			
1. Identificação da Atividade de Limpeza			
Data da limpeza: ____/____/____			
Hora de início: _____		Hora de término: _____	
Quantidade de pessoas: _____			
Equipe envolvida (nomes): _____ _____			
Materiais/ferramentas utilizadas: _____ _____			
2. Condições e Segurança no Momento da Limpeza			
Item	Sim	Não	Observações
Sistema desligado antes da limpeza.			
EPIs utilizados corretamente.			
Clima adequado para a atividade.			
Equipamentos adequados e seguros.			
3. Detalhes da Limpeza (se aplicável)			
Necessidade de limpeza confirmada? () Sim () Não			
Quantidade de módulos limpos: ____ de 384			
Algum módulo danificado durante a limpeza? () Sim () Não			
<i>Se sim, descrever o dano e como ocorreu:</i> _____ _____ _____			
4. Observações Finais _____ _____ _____			
5. Assinaturas			
Cargo	Nome	Assinatura	
Técnico responsável			
Responsável			

Fonte: Autoria própria.

Outro aspecto relevante é o olhar sobre a vegetação no entorno do sistema, a qual pode causar diversos danos como causar sombreamento nos módulos,

prejudicando o desempenho do sistema e também intensificando a passagem de animais que possam gerar sujidades nas instalações do sistema. Portanto, é de grande importância o gerenciamento da vegetação no local da usina e arredores para minimizar os danos causados e evitar falhas.

A limpeza nos arredores da usina é essencial também para evitar incêndios e a estabilização potencial de insetos ou roedores, os quais podem comprometer o sistema de cabeamento, aterramento ou outros equipamentos da usina. Todo tipo de material acumulado, folhas e também o lixo em torno da instalação deve ser retirado.

O inversor utilizado na usina do campus é o PHB3000-SS e seu manual do usuário (p.29) aponta que raramente o equipamento precisa de manutenção. No entanto, já foi constatada impregnação de sujeira nas aletas metálicas que auxiliam a troca de calor. Além disso, na ocorrência de falhas no sistema, devem ser adotados os procedimentos indicados na Tabela 5.4. Para que se tenha um bom desempenho, o local em que o inversor deve ser instalado é com temperatura ambiente menor que 45° C (isso pode estar sendo violado dada a proximidade com a parte inferior dos módulos). Deve-se evitar que o inversor tenha contato direto com o sol e com a chuva para garantir a vida útil do equipamento, algo que também não está plenamente em consonância. Disto, sugere-se a avaliação financeira para construção de ambiente específico para acomodação do conjunto de inversores (incluindo controle de temperatura), visando a ampliação da sua vida útil e melhoria da eficiência global.

Tabela 5.4 - Procedimentos para caso de falhas do inversor PHB.

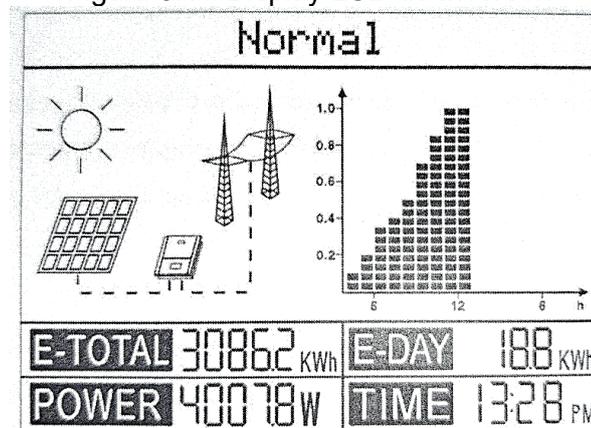
	Display	Ações Possíveis
Falhas do sistema	Falha de Isolação	1. Verifique a impedância entre terra, FV (+) & FV (-) e verifique se o inversor está aterrado. A impedância deve ser maior que 2MΩ. 2. Contate a PHB se o problema persistir.
	Falha corrente de fuga	1. A corrente no terra é alta. 2. Desconecte a entrada do gerador FV e verifique as conexões do lado CA. 3. Se o problema for encontrado, reconecte o gerador FV e verifique o comportamento do inversor. 4. Contate a PHB se o problema persistir.
	Falha Tensão de Rede	1. O inversor voltará a funcionar normalmente em até 5 minutos se a rede voltar ao normal. 2. Verifique se a tensão de rede corresponde às especificações. 3. Contate a PHB se o problema persistir.
	Falha Freq. Rede	1. O inversor voltará a funcionar normalmente em até 5 minutos se a rede voltar ao normal. 2. Verifique se a frequência de rede corresponde às especificações. 3. Contate a PHB se o problema persistir.
	Perda de Rede	1. A rede não está conectada.

		<ol style="list-style-type: none"> 2. Verifique as conexões do lado CA. 3. Verifique a tensão da rede.
Falha do Inversor	Sobretensão FV	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verifique se a tensão FV de circuito aberto é maior ou próxima da máxima tensão de entrada. 2. Se o problema persistir quando a tensão FV for menor que a máxima tensão de entrada, contate a PHB.
	Erros de Consistência	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desconecte as entradas FV (+) & FV (-) e reinicie o inversor. 2. Contate a PHB se o problema persistir.
	Sobre Temperatura	<ol style="list-style-type: none"> 1. A temperatura interna é maior que o valor especificado. 2. Reduza a temperatura ambiente. 3. Coloque o inversor em um local fresco. 4. Contate a PHB se o problema persistir.
	Falha Relé	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desconecte as entradas FV (+) & FV (-). 2. Aguarde alguns segundos. 3. Após o desligamento do LCD, reconecte as entradas e verifique o comportamento do inversor. 4. Contate a PHB se o problema persistir.
	Corrente CC Alta	
	Falha EEPROM	
	Falha SCI	
Barramento CC Alto		
Falha Ref 2.5V		
Falha GFCI	<ol style="list-style-type: none"> 4. Contate a PHB se o problema persistir. 	

Fonte: Manual do Usuário PHB Inversores SS Versão 1.0.

Ainda em casos de falhas, o led vermelho (FAULT) localizado no painel frontal irá sinalizar e será apresentado no display o tipo de falha do equipamento. Caso o display do painel frontal esteja desligado, é fundamental verificar as entradas FV. Se a tensão for maior que 125V, o fabricante solicita que entre em contato com o mesmo. O display é dividido em três partes (Fig. 5.1): superior, central e inferior. A parte superior do inversor indica suas informações de funcionamento, a parte central indica as informações de conexões da usina e também um histograma com a indicação da potência média fornecida à rede a cada 01 hora, a partir de 04:00 horas da manhã até 18:00 horas do dia mesmo dia.

Figura 5.1 - Display LCD do Inversor.



Fonte: Manual do Usuário PHB Inversores SS Versão 1.0.

A parte inferior do display apresenta a energia total gerada, a energia diária gerada, a potência instantânea fornecida à rede e o horário (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 – Dados da parte inferior display frontal inversor PHB.

Item	Descrição
E-TOTAL	Energia total gerada desde a primeira utilização do inversor. A unidade inicial é “kWh”; quando a geração de energia ultrapassar 999.9kWh, então a unidade muda para “MWh”.
E-DAY	Energia gerada do dia atual.
POWER	Potência instantânea fornecida à rede.
TIME	Relógio do inversor.

Fonte: Manual do Usuário PHB Inversores SS Versão 1.0.

Com base nesses dados e procedimentos, é possível verificar o status de geração da usina e também saber sobre o desempenho do inversor.

Na identificação de vidro quebrado dos módulos, o sistema deve ser desligado, o módulo deve ser desconectado e substituído o mais rápido possível. Deve-se realizar o registro da ocorrência, verificar a causa do dano e reportar ao responsável pela manutenção. Após isso, devem ser seguidos os procedimentos corretos para descarte do painel quebrado.

Por fim, qualquer tipo de problema na usina ou equipamento danificado, a área deve ser isolada para evitar acidentes elétricos ou mecânicos e, em seguida, o problema deve ser registrado com fotos e descrição detalhada e ser repassado para o setor responsável pela manutenção da usina do campus. O problema deve ser classificado de acordo com o nível de criticidade e o risco que pode causar no sistema para que seja definida a melhor forma de manutenção afim de corrigir o problema do equipamento ou realizar a substituição do mesmo.

De modo geral, os elementos levantados em relação à metodologia FMEA devem ser priorizados e aperfeiçoados com o tempo. Ainda, o treinamento dos profissionais (servidores administrativos, terceirizados) deve prover um suporte para que o setor de manutenção compreenda a variedade, quantidade e tipologia dos instrumentos e equipamentos cuja compra se mostra necessária, dados os resultados de inspeção já realizados.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como principal objetivo propor um plano de manutenção elétrica para as instalações fotovoltaicas do IFPE – Campus Garanhuns, com foco na eficiência energética e na sistematização das ações de inspeção, limpeza e acompanhamento operacional da usina.

A partir do diagnóstico do cenário atual da usina, foi constatada a inexistência de práticas estruturadas de manutenção. Na realização da inspeção observou-se a presença de sujeiras na superfície dos módulos, inversores desconectados da rede e até um inversor ausente, o que prejudica o monitoramento e desempenho do sistema. Nesse contexto, elaborou-se um plano de manutenção com alguns formulários técnicos, orientações operacionais e cronogramas que visam apoiar a gestão da usina solar.

A análise da geração projetada, considerando um fator de desempenho $PR = 0,80$, possibilitou mensurar o potencial da usina em suas condições normais de funcionamento. Na comparação desses valores com os dados reais de geração medidos 2024 e disponibilizados pelo leiturista, percebeu-se uma diferença significativa, cuja origem está relacionada, principalmente, à ausência de manutenção, falhas em componentes e acúmulo de sujeira na superfície dos painéis.

Para verificar o impacto da limpeza, foram realizadas medições de irradiância com piranômetro e o registro da potência gerada no inversor antes e depois da atividade. Com base nesses dados, foi possível estimar a eficiência das placas, percebendo um melhor desempenho após a limpeza. Embora essa eficiência não represente diretamente o ganho acumulado de energia, sua elevação indica maior capacidade de conversão da radiação solar, o que foi comprovado com o aumento na geração do inversor com as duas *strings* analisadas.

Projetando esse ganho proporcional para toda a usina, estima-se que a limpeza completa dos módulos poderia resultar em um incremento significativo na geração total, evidenciando o impacto das ações de manutenção básica na eficiência energética do sistema e resultando na economia da fatura elétrica do campus. Além disso, foram realizados diálogos, verificados procedimentos e apresentadas orientações junto a alguns dos profissionais responsáveis pelos procedimentos de limpeza dos módulos fotovoltaicos, com o objetivo de alinhar práticas seguras e

eficazes. De modo complementar, está prevista a realização de um treinamento/capacitação com a gestão e os funcionários responsáveis, a fim de orientá-los quanto à aplicação do plano de manutenção proposto e às técnicas adequadas de limpeza dos módulos. Condições ambientais relativas ao período de inverno limitaram parte destas ações.

A aplicação do plano de manutenção proposto pode trazer benefícios operacionais, técnicos e financeiros significativos. Como sugestão adicional de melhoria, recomenda-se a substituição dos inversores inoperantes e do equipamento ausente por inversores já disponíveis para uso educacional em laboratório do IFPE – Campus Garanhuns, medida parcial que pode ser implementada com baixo custo, solução corretiva imediata para recuperação de parte da geração da usina.

Como ações de curto prazo, recomenda-se a alocação de brita em uma área de 1 m² abaixo dos inversores, visando reduzir respingos de lama. Sugere-se ainda a instalação de calhas coletoras e o direcionamento adequado da água, de forma a minimizar processos erosivos no solo, além do reforço das bases de alvenaria da estrutura metálica da usina, uma vez que algumas já se encontram parcialmente descobertas e expostas em relação ao solo natural.

Como desdobramento prático deste trabalho, também foram ministrados minicursos sobre manutenção elétrica da usina fotovoltaica para estudantes do campus, com o objetivo de compartilhar os conhecimentos adquiridos durante o desenvolvimento do trabalho e fomentar o interesse pela área de energias renováveis.

Como sugestão adicional, propõe-se que a manutenção e a limpeza dos módulos fotovoltaicos sejam realizadas com o apoio de estudantes ou estagiários dos cursos técnicos e superiores do campus. Essa iniciativa, além de reduzir custos operacionais, contribuiria para o processo de ensino-aprendizagem, proporcionando aos discentes uma vivência prática em sistemas reais de geração de energia, reforçando os conteúdos vistos em sala de aula e estimulando a formação técnica aplicada em energias renováveis.

Recomenda-se, ainda, a implantação de monitoramento em tempo real para o acompanhamento eficaz do desempenho da usina. Espera-se que o conjunto de medidas propostas gere reflexão sobre os ganhos potenciais, que sejam implementadas segundo condições mapeadas pela gestão do campus, contribuindo

para a melhoria do desempenho da UFV e para a consolidação de boas práticas de manutenção. A adoção dessas ações tende a impactar também na economia de energia elétrica, além de fortalecer o compromisso institucional com a eficiência energética e a sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ABUBAKAR, Ahmad. **A Review of Solar Photovoltaic System Maintenance Strategies**. 14th IEEE International Conference on Industry Applications, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Ahmad-Abubakar-8/publication/354517356_A_Review_of_Solar_Photosvoltaic_System_Maintenance_Strategies/links/64ea11ab40289f7a0fb9f2c2/A-Review-of-Solar-Photovoltaic-System-Maintenance-Strategies.pdf. Acesso em: 20 fev. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021**. 7 dez. 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>. Acesso em: 11 mar. 2025.

ALVES FILHO, Múcio D'Emery. **Gestão da energia e da manutenção da usina solar fotovoltaica do IFPE – Campus Garanhuns**: avaliação tarifária e proposta FMEA. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Pernambuco – IFPE Campus Garanhuns. Garanhuns, PE. 2023. Disponível em: <https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/handle/123456789/1005>. Acesso em: 4 dez. 2024.

ALVES, Rodrigo Soares. **Como é calculado a Performance Ratio (PR) de uma Usina Solar?**. DIEFRA. Disponível em: <https://www.grupodiefra.com.br/site/energia/como-e-calculado-a-performance-ratio-pr-de-uma-usina-solar/#:~:text=O%20que%20%C3%A9%20o%20Performance,geral%20de%20um%20sistema%20fotovoltaico>. Acesso em 10 jul. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994. Disponível em: <https://ufsb.edu.br/propa/images/dinfra/coman/Legisla%C3%A7%C3%B5es/NBR-5462.pdf>. Acesso em: 4 dez. 2024.

BUENO, Edson Roberto Ferreira. **Gestão da manutenção de máquinas**. 1. ed. São Paulo: Contentus, 2020. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 04 ago. 2025.

CASSINI, Denio Alves *et al.* **Avaliação experimental do desempenho da degradação de módulos fotovoltaicos de si cristalino após 15 anos de exposição em campo**. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS). Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

CORREIA, Rafael Santos; NASCIMENTO, José Fernando Silva; NEVES, Fernando Frachone. Práticas De Inspeção e Manutenção Preventiva em Sistemas Fotovoltaicos. **Ciência & Tecnologia**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. e1514, 2023. DOI: 10.52138/citec.v15i1.279. Disponível em: <https://publicacoes.fatecjaboticabal.edu.br/citec/article/view/279>. Acesso em: 20 fev. 2025.

EQUIPE BV INSPIRA. **Limpeza de painéis solares:** saiba como fazer! BV Inspira, 29 de maio de 2025. Disponível em: <https://www.bv.com.br/bv-inspira/financiamento-para-energia-solar/limpeza-de-paineis-solares>. Acesso em: 10 jul. 2025.

FINOCCHIO, Marco Antonio Ferreira. **Manutenção Elétrica.** 2013. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/mafinocchio/disciplinas-da-graduacao/materiais-e-equipamentos-eletricos/et35p-materiais-e-equipamentos-eletricos/APOSTILAMANUTENOELTRICA.pdf>. Acesso em: 6 fev. 2025.

KUMAR, Udit. **What Is A Good Performance Ratio For Solar?**. ARKA, 2025. Disponível em: <<https://arka360.com/ros/good-performance-ratio-for-solar?>>. Acesso em 10 jul. 2025.

LABREN - Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia. **Dados de irradiação para o Estado de Pernambuco.** Disponível em: https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017_PE.html#mod. Acesso em: 10 jul. 2025.

LONGI. **Manual de Limpeza de módulos fotovoltaicos.** Disponível em: <https://genyx.com.br/novo-site/wp-content/uploads/2022/10/MANUAL-LIMPEZA-DE-MODULOS-PORTUGUES-MODULO-FOTOVOLTAICO-LONGI.pdf>. Acesso em 10 jul. 2025.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Energia solar para produção de eletricidade.** São Paulo: Artliber, 2012.

LUCENA, Myllene Rayane; OLIVEIRA, Fabrícia Nascimento. **Riscos Ocupacionais na Manutenção de uma Usina Fotovoltaica Localizada em Uma Instituição de Ensino Superior no Semiárido.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA. Mossoró, RN. 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/82844fc7-b41d-47a8-ae4e-157c58f089a9/content>. Acesso em: 6 fev. 2025.

MORAES, Caio. **Uma introdução aos sistemas fotovoltaicos.** Eletrônica de Potência, 2021. Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/sistemas-fotovoltaicos/>. Acesso em: 6 fev. 2025.

MORAIS, Carolina Vasconcelos da S.; PONTES, Isabel Cristina da C. **Boas Práticas de Operação E Manutenção Em Usinas Fotovoltaicas para Uma Maior Eficiência e Confiabilidade.** Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2022. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/60573/60573.PDF>. Acesso em: 6 fev. 2025.

OSMANI, Khaled; HADDAD, Ahmad *et al.* **A review on maintenance strategies for PV systems.** Lebano: School of Engineering, International University of Beirut BIU, Beirut; and School of Engineering, Lebanese International University LIU, Bekaa, Agosto 2020.

PEDROSA FILHO, Manoel Henrique de Oliveira. **Projeto Elétrico Instalação Sistema de Geração Solar Fotovoltaica de 72 kW.** Nov. 2017. Planta baixa.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL - CRESESB. Rio de Janeiro. Mar. 2014.

Disponível em:

http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 11 mar. 2025.

REIS, Lineu Belico dos. **Geração de energia elétrica**. 2º ed. rev. e atual. Barueri, SP: Manole, 2011.

SILVA, Matheus de Oliveira. **Segurança do trabalho com instalação e manutenção de módulos fotovoltaicos**. Itumbiara, 2022. Disponível em:

https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/1614/1/tcc_Matheus%20de%20Oliveira%20Silva.pdf. Acesso em: 6 fev. 2025.

SOUSA, Emanuella Maria Rodrigues; LEMOS, Herick Talles Queiroz; VARELLA, Fabiana K. de O. Martins. **Análise da Operação e Manutenção da Usina Solar Fotovoltaica da UFERSA**. Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), 2019. Disponível em:

<https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/7138535d-031f-4208-a3f4-8a75dc722af8/content>. Acesso em: 6 fev. 2025.

SOUZA, Wilison; SOUZA, Rubem; MINORI, Américo. **Boas Práticas de Manutenção Preventiva em Sistemas Fotovoltaicos**. XXXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Maceió, Alagoas, Brasil, 2018. Disponível em:

https://www.cdeam.ufam.edu.br/images/Publicacoes_e_artigos/2018/2018_Art_2_CDEAM.pdf. Acesso em: 10 jul. 2025.

TARGINO, Edson Freire; ROCHA, Ednardo Pereira. **Inspeção termográfica na usina solar fotovoltaica Mossoró II - UFERSA Campus Leste**. Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), 2019. Disponível em:

<https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/16e48108-c3b9-46e6-b4d8-219399448dfa/content>. Acesso em: 03 set. 2025.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 2º ed. Ver. E atual. São Paulo: Érica, 2025.

YINGLI SOLAR PV MODULES. **Installation and User Manual**. 01 de agosto 2012.

Disponível em: https://www.solaris-shop.com/content/YL250P-29b-H4-Blk%20Installation.pdf?srsItd=AfmBOodlKmVDoMjZ9_KvVdQAMovJfPJvOAZFE5DJj2_UOcbM5KqetZ1. Acesso em: 11 mar. 2025.