

DESENVOLVIMENTO DE UM PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO DE USINAS SOLARES FOTOVOLTAICOS: um estudo de caso aplicado no IFPE Pesqueira.

DEVELOPMENT OF A MAINTENANCE PLANNING FOR
PHOTOVOLTAIC SOLAR PLANTS: a case study applied at IFPE
Pesqueira

José Oliveira Morais Neto¹

jomn@discente.ifpe.edu.br¹

Edilson Juvêncio do Nascimento²

ejn6@discente.ifpe.edu.br²

Alexandre Manoel de Farias

alexandre.farias@pesqueira.ifpe.edu.br

RESUMO

Devido ao crescente número de sistemas fotovoltaicos instalados no Brasil, tem-se aumentado a necessidade da realização de inspeções e manutenções regulares para garantir que os equipamentos funcionem de acordo com as condições projetadas, minimizando riscos à saúde, à segurança e ao meio ambiente. No entanto, devido a falta de formação especializada, observa-se uma lacuna do conhecimento da maioria das empresas sobre a realização eficiente de tais procedimentos. Como contribuição sobre o tema, este artigo aborda um plano de manutenção que inclui um conjunto de diretrizes de boas práticas, com perguntas estratégicas específicas para cada aspecto relevante do sistema fotovoltaico em análise, tendo como objetivo criar um plano de manutenção detectiva, preventiva e corretiva que possa ser aplicado a sistemas fotovoltaicos, utilizando ferramentas de qualidade reconhecidas como o diagrama de Ishikawa e o Plano de Ação baseado no 5W2H. Em seguida, o modelo foi testado em uma usina de minigeração distribuída instalada em solo com estrutura fixa, a fim de definir as ações necessárias para a manutenção dos equipamentos. Os resultados obtidos evidenciam a importância da manutenção preventiva e corretiva, associada ao monitoramento contínuo dos sistemas, para garantir uma maior durabilidade e eficiência energética das usinas fotovoltaicas.

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos. Manutenção. Usina Fotovoltaica.

ABSTRACT

Due to the increasing number of photovoltaic systems installed in Brazil, there has been a growing need for regular inspections and maintenance to ensure that the equipment operates according to the designed conditions, minimizing risks to health, safety, and the environment. However, due to the lack of specialized training, a knowledge gap is observed in most companies regarding the efficient execution of such procedures. As a contribution to this topic, this article presents a maintenance plan that includes a set of best practice guidelines, with specific strategic questions for each relevant aspect of the photovoltaic system under analysis. The goal is to create a detective, preventive, and corrective maintenance plan that can be applied to photovoltaic systems, using recognized quality tools such as the Ishikawa diagram and the Action Plan based on the 5W2H method. The model was then tested at a ground-mounted distributed minigeneration plant with a fixed structure to define the necessary actions for equipment maintenance. The results highlight the importance of preventive and corrective maintenance, combined with continuous system monitoring, to ensure greater durability and energy efficiency of photovoltaic plants.

Keywords: Photovoltaic Systems. Maintenance. Photovoltaic Plant.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da geração de energia solar fotovoltaica tem sido notável, quebrando recordes recentemente. Segundo a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), em 2023, o Brasil ocupou o 6º lugar no ranking global, com uma capacidade instalada de 37 GW. A nível nacional, de acordo com o Balanço Energético Nacional – BEN, (2023), tomando 2022 como o ano base, a geração total de energia solar fotovoltaica saltou de 4,4 GWh, em 2013, para 30.126,5 GWh em 2022, onde no que diz respeito a geração de eletricidade por fonte, o Nordeste liderou tanto o ranking de geração solar, com 12.732 GWh quanto de geração de energia eólica, com 75.397 GWh, mostrando alta competitividade, principalmente destas fontes, na matriz energética. Vale ressaltar que a capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional – SIN na região Nordeste prevê um aumento de 21.641 MW (16% em dez/2014) para 45.499 MW (21% em dez/2024), representando um crescimento significativo em termos de potência total instalada em MW.

De acordo com mesmo estudo e em concordância com o Balanço Energético Nacional 2023 a região Nordeste atuará colaborando de forma expressiva para o crescimento da capacidade instalada da energia solar no SIN ao longo período estudado, apesar desta fonte renovável (representando 4,4% referente a energia solar e 6,1% referente a energia eólica) atualmente ter pouca representatividade de capacidade instalada, incluindo projetos de P&D. Apesar dos investimentos previstos em cerca de R\$ 97,35 bilhões, de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (2024), a energia solar fotovoltaica enfrenta desafios constantes na área de manutenção, impactando diretamente sua capacidade de geração.

No entanto, de acordo com, Amin et al. (2023) a produção de energia fotovoltaica enfrenta diversos obstáculos para garantir o pleno funcionamento dos módulos solares, abrangendo questões como sombreamento, acúmulo de sujeira e outros desafios operacionais e de comissionamento. Dessa forma, a manutenção eficiente desses sistemas é fundamental para superar tais desafios e garantir o pleno funcionamento dos módulos solares, evitando perdas significativas de energia elétrica, é neste contexto que a operação e manutenção do sistema desempenham um papel importante nos projetos de energia fotovoltaica, especificadamente na região Nordeste.

Em particular, a sujeira é um desafio sério que pode reduzir drasticamente a eficiência de conversão dos módulos fotovoltaicos, levando a uma significativa diminuição na produção de energia elétrica. Nesse contexto, a operação e manutenção do sistema são fundamentais nas usinas fotovoltaicas, pois quando executadas adequadamente, aumentam consideravelmente a probabilidade de o projeto alcançar ou superar a taxa de desempenho planejada, evitando perdas por meio de estratégias de otimização bem planejadas, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental, redução de custos e garantia de fornecimento estável de energia.

Ely e Swart (2014) afirmam que a energia elétrica está classificada como o principal desafio entre os dez maiores enfrentados pela humanidade nos próximos 50 anos, principalmente em relação a problemática do fornecimento de energia elétrica em regiões isoladas dos grandes centros populacionais, assim como muitos outros problemas têm surgido referentes as crises energéticas anteriores. Por exemplo,

durante a crise hídrica, entre 2013 e 2016, em que o Brasil implementou soluções mitigadoras para o fornecimento de energia elétrica, como a adoção de geradores termelétricos, resultando em custos operacionais elevados e altas emissões de CO₂, diante disso as tecnologias continuam sendo desenvolvidas e aprimoradas para maximizar o aproveitamento das fontes renováveis como a energia solar fotovoltaica, expandindo assim seu papel na matriz energética global.

Em complemento, Pinho e Galdino (2014), defendem que um dos principais fatores que colaboram para uma melhor eficiência do sistema solar fotovoltaico está no uso de tecnologia estratégica em conjunto com a eficiência, segurança da geração e manutenção dos sistemas, onde a manutenção preventiva se destaca com um leque de possibilidade como: limpeza periódica dos módulos solares, estudo do ângulo de inclinação dos módulos com regularidade, medição e monitoramento das variáveis elétricas do sistema de geração, estudo das curvas individuais de desempenho e geração dos módulos, identificação de pontos quentes com a utilização da termografia, entre outras medidas disponíveis.

De acordo com Amin et al. (2023), a definição de um plano de manutenção eficaz para o sistema solar fotovoltaico é fundamental para melhorar a confiabilidade e o desempenho a longo prazo, considerando que um sistema bem projetado e comissionado pode ter uma vida útil de aproximadamente 30 anos. Assim, uma limpeza regular e adequada dos módulos pode desempenhar um papel significativo na garantia do pleno funcionamento do sistema. Dessa forma, para garantir a eficácia na aplicação de planos de manutenção e de otimização nos sistemas fotovoltaicos, é fundamental possuir um conhecimento integral do projeto e das condições operacionais bem detalhadas. Além disso, é necessário contar com uma equipe qualificada e cautelosa em relação aos protocolos de segurança e trabalho em altura.

Este artigo busca analisar as principais fontes de perdas em usinas solares fotovoltaicas conectadas à rede elétrica na região nordeste, sendo esta uma região caracterizada por altas temperaturas e exposição solar intensa ao longo do ano, o que desempenha um papel significativo na eficiência operacional dos sistemas fotovoltaicos, e assim propor um plano de manutenção preventivo a ser aplicado de forma estratégica visando o aumento da eficiência operacional da usina em estudo.

Objetiva-se com este artigo, contribuir não apenas para o aprimoramento técnico desses projetos, mas também para a expansão sustentável da energia solar, bem como colaborar com a manutenção devida de usinas já em operação, considerando os desafios e restrições enfrentados para cada tipo de usina, as soluções propostas e os benefícios esperados, visando um panorama mais claro e estratégico para a eficiência operacional em sistemas fotovoltaicos na região nordeste.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os projetos, instalação e manutenção de Sistemas fotovoltaicos conectados à rede têm evoluído bastante desde a publicação da Resolução normativa 482. Isso tem proporcionado vários estudos que possibilitam otimizar e consolidar esta fonte energética na geração distribuída. Dentre os principais desafios e dificuldades, destacam-se a intensidade e variação da luz solar, a manutenção, o armazenamento de energia, os requisitos de instalação e regulamentação, os custos iniciais e a sobrecarga da rede. Esta seção abordará inicialmente as características específicas

da geração de energia solar fotovoltaica, destacando as condições climáticas predominantes e seus impactos na produção de energia.

Em seguida, serão discutidos os fatores de desempenho e manutenção que afetam diretamente a eficiência dos sistemas solares fotovoltaicos, considerando aspectos como a qualidade dos componentes, o design do sistema e as condições ambientais. Por fim, serão tratados os diferentes tipos de manutenção aplicáveis a sistemas fotovoltaicos, com foco nas estratégias preventivas e corretivas que podem ser adotadas para minimizar as perdas e maximizar a produtividade, correspondendo ao desenvolvimento de um plano de manutenção preventivo estratégico que, além de aprimorar o desempenho técnico dos projetos, contribua para a expansão sustentável da energia solar e para a manutenção eficiente das usinas já em operação na região Nordeste.

2.1 Características da Geração de Energia Solar Fotovoltaica no Nordeste

O semiárido brasileiro e a região Nordeste em geral enfrentam graves problemas econômicos e sociais, conforme indicado por Dantas (2020). A estrutura agrária regional contribui para a concentração de terras, com cerca de 1,5 milhão de famílias ocupando apenas 4,2% das terras agricultáveis, enquanto 38% estão em latifúndios com mais de 1 mil hectares. A alta radiação solar, embora dificulte a vida na seca, pode ser aproveitada através da energia solar.

Uma das vantagens que o semiárido possui diz respeito ao aproveitamento da energia solar devido à sua localização próxima ao Equador, que recebe maior radiação solar. Dantas (2020) afirma que a homogeneidade do regime solar ao longo das estações, devido à baixa latitude, também é mencionada. Apesar do enorme potencial de geração fotovoltaica no Brasil, principalmente na região do semiárido, a quantidade de energia produzida dessa forma ainda não é significativa. O país ultrapassou no dia 7 de março de 2024 a marca de 200 GW (gigawatts) de potência, onde somente no dia 10 de abril do mesmo ano o Brasil somou 201.108,7 MW de potência fiscalizada, de acordo com dados do Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA), onde 84,41% das usinas são consideradas renováveis. (Aneel, 2024).

A introdução da geração distribuída pode ter um impacto significativo na diversificação das fontes de energia no Brasil, onde para Santos (2023), esse tipo de geração refere-se à produção de energia elétrica conectada diretamente à rede de distribuição ou localizada nas instalações do consumidor. Em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) regulamentou essa modalidade por meio da Resolução Normativa (RN) nº 482/2012. Essa regulamentação estabeleceu o sistema de compensação, conhecido internacionalmente como net metering, que incentiva o uso de sistemas fotovoltaicos em outros países da América Latina. Esse sistema permite que a energia ativa fornecida à rede por uma unidade consumidora seja compensada pelo consumo de energia posteriormente. Em contrapartida, a geração centralizada é caracterizada por grandes centrais de produção de energia elétrica, predominantemente usinas hidrelétricas ou termoelétricas com capacidades instaladas significativas no Brasil.

Nesse sentido, segundo Dantas (2020), a Resolução Normativa (RN) nº 687/2015 da Aneel trouxe benefícios significativos para os microgeradores. Uma das mudanças importantes foi a possibilidade de geração distribuída conjunta, onde a energia gerada pode ser compartilhada entre várias residências dentro da mesma área de concessão,

como em condomínios. Os créditos de energia passaram a ter validade de 60 meses, a potência máxima de geração por unidade aumentou para 5 MW e o processo de adesão à rede de distribuição para a geração distribuída foi simplificado. Essas alterações, segundo a Aneel (2018), contribuíram significativamente para o aumento das instalações de sistemas fotovoltaicos nos últimos anos.

Na geração da energia, parte dela, não se converte em eletricidade, tendo assim que se considerar diversos fatores para calcular o potencial técnico. Um desses fatores é a eficiência das placas fotovoltaicas, que pode chegar a mais de 20% nos módulos comerciais de silício cristalino (Dantas, 2020). Para Vitti e Alvares (2006), além do custo por kWh gerado, a eficiência dos sistemas fotovoltaicos é crucial para comparar diferentes tecnologias de geração solar. A eficiência dos módulos depende principalmente de dois fatores. Primeiramente, há a eficiência de conversão das células solares, pois parte da energia solar é perdida antes de ser convertida em eletricidade. O segundo fator é a disposição dos módulos em relação ao sol, incluindo sua orientação, inclinação e possíveis sombreamentos.

Outro aspecto importante é a *Performance Ratio* (PR), que reflete as perdas na conversão e é calculada como a relação entre a energia utilizável e a energia convertida pelo sistema fotovoltaico. O PR não está ligado diretamente à quantidade de radiação solar recebida, nem à localização do sistema ou à posição dos módulos solares. Diversos elementos podem influenciar esse índice, como a temperatura de operação (um dos principais fatores de influência na eficiência), a intensificação da radiação, a sujeira nos módulos, as perdas devido à resistência elétrica, a eficiência dos inversores de frequência, as diferenças de potência entre módulos do mesmo modelo (*mismatch*) e a presença de sombras.

Para mitigar essas perdas, os inversores apresentam algumas estratégias de rastreamento do ponto de máxima potência, que consiste na identificação do ponto onde a potência do gerador fotovoltaico é máxima, calculada pela multiplicação da tensão pela corrente elétrica nesse ponto (Torres, 2016). Essa estratégia é crucial para garantir que um algoritmo siga a máxima potência de um módulo ou gerador solar, já que a potência gerada depende de vários fatores, como a radiação solar incidente e a temperatura de operação.

Durante o projeto, execução e operação das usinas, é possível estabelecer uma cadeia de valores fundamental para o seu bom funcionamento. Dantas (2020) destaca que essa cadeia é composta por quatro principais etapas. A primeira fase abrange o desenvolvimento do projeto, onde são determinados a potência da usina, sua localização, a empresa de engenharia envolvida, os fornecedores de componentes, entre outros aspectos. Após a conclusão desta fase e a consolidação do projeto, segue-se para a aquisição dos componentes do sistema fotovoltaico fabricação e montagem dos componentes. A terceira etapa compreende a montagem da usina, enquanto a quarta engloba o comissionamento e operação, que por sua vez pode ser subdividida. Além disso, etapas transversais como financiamento e pesquisa e desenvolvimento (P&D) podem acompanhar todo o processo de desenvolvimento da usina.

No Brasil é comum a elaboração de projetos e a integração de sistemas fotovoltaicos, já que o país possui várias empresas com expertise e profissionais qualificados para realizar esses projetos e instalações (Dantas, 2020). Apesar de ainda estar em estágio inicial e discreto, o mercado fotovoltaico brasileiro está em

rápido crescimento, o que abre amplas oportunidades para inovação, especialmente com o envolvimento de startups no setor.

2.2 Fatores de Desempenho e Manutenção de um Sistema Solar Fotovoltaico

Em um sistema solar completo, além das perdas nos módulos solares, destacam-se as perdas no inversor de frequência e as perdas por efeito da massa de ar atmosférica, que reduzem a irradiação incidente. Para mitigar esses fatores, estratégias como manutenção regular e limpeza dos módulos são essenciais. Nesse sentido, o fator de desempenho é afetado principalmente em relação a sua capacidade de converter energia solar em eletricidade utilizável. Dessa forma, estratégias como a manutenção regular e limpeza dos módulos podem reduzir a sujeira e o sombreamento, bem como a escolha de materiais de alta qualidade colaboram para um aprimoramento da eficiência do sistema (Vitti e Alvares, 2006).

Todos os tipos de módulos solares, independentemente de sua composição, demonstram um padrão de funcionamento e eficiência nas Condições Padrão de Teste (STC), onde para Torres (2016), as condições meteorológicas locais, como a umidade do ar, a precipitação e a velocidade do vento, influenciam de forma sistemática o desempenho do sistema, especialmente pela temperatura de operação do dispositivo fotovoltaico. Adicionalmente, a eficiência dos módulos pode variar consideravelmente com base na tecnologia de produção utilizada. Atualmente, tecnologias como PERC (Passivated Emitter Rear Cell), TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) e heterojunção (HJT) apresentam eficiências superiores a 22%, com avanços contínuos em viabilidade econômica. Nesse contexto, o mesmo autor reforça que a contínua inovação e desenvolvimento dessas tecnologias prometem avanços significativos na eficiência energética e na viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos, tornando-os uma opção cada vez mais atrativa para a geração de energia sustentável.

Os sistemas fotovoltaicos, assim como outros sistemas elétricos, enfrentam fatores que diminuem a produção de energia e reduzem o rendimento da instalação. Esses fatores incluem altas temperaturas nas células solares (superior ao valor padrão de 25 °C), eficiência dos inversores na conversão de energia, perdas de tensão nos cabos, variações na fabricação dos módulos (mesmo modelo e fabricante podem ter diferenças), sombreamentos diários, e acúmulo de sujeira nos módulos, todos contribuindo para a diminuição da eficiência de geração (Candine, 2018).

Sujidade, conhecida como soiling, é processo pelo qual os módulos fotovoltaicos apresentam uma redução da sua produção de eletricidade, Forte (2023) afirma que a higienização dos módulos, deve ocorrer anualmente, exceto em regiões com baixa pluviosidade e alta incidência de poeira, onde deve ser realizada a cada seis meses.

Ao observar que os módulos solares estão muito sujos, é hora de proceder com a limpeza. O acúmulo de sujeira reduz gradativamente a produção de energia. Mesmo uma leve camada de poeira pode ocasionar uma queda na eficiência do módulo solar de 5% podendo ultrapassar 20% quando os módulos apresentam sujeira acumulada. Santos (2023) e Candine (2018), ressaltam que a deposição de sujeira nos módulos solares reduz a quantidade efetiva de radiação solar e causa perdas na eficiência de conversão de energia do sistema, esse processo é considerado o terceiro fator ambiental mais impactante na geração de energia pelos sistemas fotovoltaicos, após a radiação solar e a temperatura. A perda de eficiência se deve ao fato do acúmulo

de sujeira criar uma barreira para a passagem dos fótons. Em superfícies lisas, por exemplo, a sujeira tende a se distribuir de maneira mais uniforme, ao contrário do que ocorre em superfícies texturizadas, onde há uma variação significativa na distribuição das partículas de sujeira, podendo resultar em áreas com menor transmissão de luz em comparação a outras áreas no mesmo módulo.

Vale ressaltar que a sujeira nos módulos solares pode variar dependendo da região, mas geralmente inclui partículas como solo (argila, silte, areia), resíduos de cimento, cinzas, carbono, minerais como limonita e sílica, substâncias orgânicas como fezes de pássaros, lama, poluentes diversos e detritos. Candine (2018) e Santos (2023) ainda abordam o fato de que a sujeira orgânica de origem animal e vegetal é especialmente prejudicial, pois bloqueia a luz solar nas células, gerando sombras que diminuem a eficiência do sistema, onde essas áreas sombreadas persistem até que haja limpeza, impactando toda a geração do sistema, já que os módulos estão conectados em série e a redução em um afeta o desempenho de todo o arranjo, reduzindo a potência total gerada. Logo, a composição da poeira e a velocidade de acumulação variam conforme a localização geográfica, sendo a deposição de poeira um desafio significativo em áreas com alta concentração atmosférica.

A frequência e abordagem da limpeza dos módulos solares variam conforme o local, clima, vegetação existente e nível de poeira no ar. Em áreas tropicais secas, como a região Nordeste, a limpeza semanal é necessária devido à raridade das chuvas e à alta incidência de poeira, assim como em regiões com precipitação significativa, a chuva é considerada o método mais eficaz de limpeza, reduzindo as perdas causadas pela sujeira. Segundo Candine (2018), o vento desempenha um papel importante, transportando partículas de sujeira e ajudando a resfriar os módulos, aumentando a eficiência do sistema, onde a limpeza manual também é comum em sistemas menores, enquanto usinas em grande escala requerem jatos de água pressurizados seguidos de escovação, sendo um método eficaz e menos agressivo, sendo mais econômico e tendo menor impacto ambiental.

Além disso, Santos (2023) destaca que diversas formas de degradação podem impactar a produção elétrica em sistemas fotovoltaicos, como a presença de umidade nos componentes, o desgaste térmico e a corrosão. Para prevenir ou reduzir essas degradações, é crucial realizar inspeções e manutenções periódicas nos sistemas fotovoltaicos. Manter os módulos limpos e minimizar o sombreamento também são medidas importantes para garantir a máxima eficiência na geração de energia solar.

As conexões elétricas é um outro fator que também afetam significativamente o desempenho do sistema solar fotovoltaico, incluindo cabos, conexões e os inversores. Estes componentes devem ser cuidadosamente monitorados para evitar perdas de energia por resistência elétrica e aquecimento por mal contatos. Problemas elétricos podem resultar em perda de eficiência e até mesmo em falhas completas do sistema. Para usinas com sistemas de rastreamento, que ajustam a posição dos módulos para seguir o movimento do sol, aumentando a captação de energia, a parte mecânica, que envolve parafusos, estruturas de suporte e componentes de montagem, também pode ter a eficiência prejudicada. Esse tipo de sistema, necessita de manutenções periódicas para garantir que os motores e mecanismos de movimentação funcionem corretamente.

A degradação natural dos materiais, como a descoloração e o desgaste das células fotovoltaicas, bem como a corrosão dos componentes metálicos, também

pode diminuir a eficiência do sistema ao longo do tempo, logo para mitigar esses efeitos, é essencial implementar um plano de manutenção que inclua inspeções periódicas, reparos e substituições de componentes desgastados, garantindo assim a longevidade e a performance ideal do sistema fotovoltaico.

2.3 Tipos de Manutenção em um Sistema Solar Fotovoltaico

Sendo a junção de todas as atividades técnicas, administrativas e de supervisão, destinadas a manter ou restaurar um componente, equipamento ou uma instalação a um estado em que ele possa executar uma função requerida, a manutenção é uma etapa obrigatória a ser executada em uma instalação fotovoltaica. Ela pode ser vista como um conjunto de tarefas destinadas a assegurar o bom funcionamento do item ao qual se deseja manter seu funcionamento. A literatura destaca quatro tipos de manutenção: preditiva, corretiva, preventiva e detectiva que serão descritos nos parágrafos a seguir.

A relevância da manutenção para esse tipo de sistema de geração está vinculada ao investimento e à dependência entre a disponibilidade e a receita gerada pelo sistema, onde a implementação da gestão da manutenção nesse cenário visa principalmente a redução dos custos operacionais decorrentes da manutenção dos equipamentos, é importante destacar que dependendo da aplicação do projeto são utilizadas diferentes tipologias de plantas, assim como são várias as necessidades de manutenção nos sistemas fotovoltaicos. Forte (2023) defende que isso se deve ao fato de não possuírem, em sua maioria, peças móveis sujeitas a desgaste ou que necessitem de lubrificação. Apesar dessa vantagem, a manutenção é fundamental para garantir o melhor desempenho do sistema. Um projeto de engenharia sólido e o uso de equipamentos de qualidade são importantes, mas seguir os procedimentos corretos de instalação é fundamental para reduzir os custos com manutenção.

Nesse contexto em relação a manutenção preditiva, Barreto (2024) e Forte (2023) destacam que esta envolve o monitoramento constante da produção de energia solar. O objetivo é detectar precocemente sinais de danos, como arranhões, manchas ou rachaduras nos módulos, o que pode ser realizado pelo proprietário do sistema para reduzir os custos com manutenção, onde isso inclui inspeções visuais nos componentes principais, como módulos solares, inversores e cabos, para identificar sinais precoces de danos, como arranhões ou rachaduras. Essas inspeções são complementadas pelo monitoramento da geração de energia, acessível por meio de diferentes dispositivos e softwares integrados aos inversores. A análise em tempo real desses dados permite identificar e corrigir falhas antes que causem paradas não planejadas, resultando em redução de custos associados a essas interrupções.

Assim, a manutenção corretiva, segundo Forte (2023), é realizada exclusivamente em situações de falhas ou problemas detectados em algum dos componentes do sistema. Esta intervenção ocorre quando há uma queda significativa na produção de energia ou quando o sistema deixa de funcionar, requerendo a contratação de uma empresa para realizar a avaliação e reparo do dano identificado. A proposta da manutenção corretiva é solucionar a questão que gerou o problema no equipamento ou sistema. Se uma peça do sistema quebra ou apresenta mau funcionamento, interferindo assim em sua operação principal, é necessário acionar um serviço de manutenção corretiva, que pode ser realizado por técnicos especializados, podendo ser realizada de uma das seguintes formas:

- **Manutenção Corretiva Não-planejada:** Ocorre em resposta a falhas ou perdas de desempenho repentinas, sem tempo para preparação prévia, apesar dos inconvenientes causados por eventos inesperados, esse tipo de manutenção continua sendo amplamente praticado atualmente, sendo caracterizado pela ausência de ações preventivas ou preditivas.
- **Manutenção Corretiva Planejada:** É realizada a intervenção devido ao desempenho abaixo do esperado ou à ocorrência de uma falha, baseada em decisões de gestão. A situação foi monitorada pela manutenção preditiva e optou-se por continuar dessa forma até a falha, que já estava prevista e para a qual já temos uma solução.

A manutenção preventiva inclui a realização periódica da limpeza das placas solares, a higienização do inversor e uma inspeção abrangente de todos os componentes elétricos, como inversores e conectores, e mecânicos, como suportes e estruturas de fixação, visando otimizar o desempenho, identificar/reparar danos e prolongar a vida útil dos equipamentos (Forte, 2023). A execução de atividades de inspeção, reparo e substituição de componentes em intervalos regulares e previamente definidos, mesmo na ausência de falhas evidentes no equipamento (Barreto, 2024).

O principal objetivo é prevenir a ocorrência de falhas e otimizar a disponibilidade do equipamento. Essa forma de manutenção, segundo Barreto (2024), é planejada com base em análises do histórico de falhas e dados de desempenho do equipamento. Para executar essas tarefas, é necessário subir no telhado; nesse sentido, o proprietário do sistema pode realizar a limpeza dos módulos solares seguindo as precauções necessárias ou contratar os serviços de empresas especializadas, que possuem equipe certificada, conforme NR 10 e NR 35, equipamentos de segurança e ferramentas adequadas para realizar o trabalho. A implementação de um modelo preventivo proporciona maior confiabilidade nos prazos de funcionamento do sistema produtivo, reduzindo o tempo de inatividade para reparos e minimizando o número de intervenções corretivas, ou seja, as falhas.

A manutenção detectiva é focada na identificação precoce de indícios de falhas em estágios iniciais. Essa nova manutenção é abordada por Barreto (2024), e envolve correções menores realizadas pelos operadores dos equipamentos. A abordagem detectiva agiliza a identificação e resolução de problemas técnicos, reduzindo o tempo entre intervenções e eliminando esperas por reparos. Para otimizar esse processo, é essencial utilizar ferramentas de gestão de manutenção como o Diagrama de Causa e Efeito, Procedimentos Operacionais Padrões (POPs) e o Método Kaizen. Além disso, métodos como a análise do modo de falha e seus efeitos (FMEA) podem ser empregados para fortalecer a eficácia dessa estratégia.

Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs) são ferramentas que podem ser usadas na manutenção detectiva, de acordo Barreto (2024) e Rediske (2023) abrangem as principais visões dos administradores de usinas FV e dos provedores de serviços de operação e manutenção, atuando como métricas quantificáveis que refletem o desempenho de uma empresa em alcançar seus objetivos estratégicos e operacionais, na manutenção detectiva, os KPIs são usados para monitorar e melhorar a eficácia das atividades de manutenção. Alguns dos KPIs comuns utilizados incluem:

- Tempo Médio Entre Falhas (MTBF), que mede a confiabilidade dos equipamentos, indicando o tempo médio que o equipamento opera sem falhas.
- Tempo Médio para Reparo (MTTR) que mede a eficiência do processo de reparo, indicando o tempo médio necessário para consertar uma falha.
- Taxa de Disponibilidade que mede a porcentagem do tempo em que o sistema está operacional e disponível para uso.
- Taxa de Falhas que mede a frequência com que ocorrem falhas em um período específico,
- Custo de Manutenção que avalia os custos associados à manutenção, incluindo peças, mão de obra e outros recursos.
- Eficiência Operacional que mede a eficiência geral do sistema em termos de produção de energia versus capacidade instalada.

A identificação dos elementos e, conseqüentemente, a criação dos KPIs destinados a avaliar esses elementos, constituem para Rediske (2023), um procedimento fundamental para garantir a precisão do modelo e esclarecer suas possíveis limitações. Dada a complexidade dos sistemas fotovoltaicos, é necessário um amplo conjunto de KPIs abordando várias facetas relacionadas à gestão de O&M. Portanto, os KPIs escolhidos devem extrair apenas dados essenciais sobre o desempenho de gestão do sistema, de modo a limitar sua quantidade. Na definição dos KPIs, a empresa deve garantir que eles proporcionem informações mensuráveis, exatas, confiáveis e aplicáveis para implementar correções quando o desempenho não atender aos objetivos ou para aprimorar a eficácia dos processos.

Como este trabalho busca-se garantir o funcionamento ideal e a entrega máxima da energia solar fotovoltaica gerada, a metodologia abordará a aplicação da manutenção preventiva e detectiva por meio do desenvolvimento de um Plano de Manutenção contendo as ferramentas da qualidade: Plano de Ação 5W2H integrado ao Diagrama Ishikawa. Essas ferramentas combinadas indicarão quais são as manutenções necessárias mediante aos erros apontados. Este plano de manutenção foi adaptado às condições climáticas e ambientais específicas da região Nordeste, atuando como aliado na análise da implementação de tecnologias de monitoramento e comissionamento de forma eficiente para cada tipo de usina de usina implementada na região, porém pode ser adaptado a outras regiões.

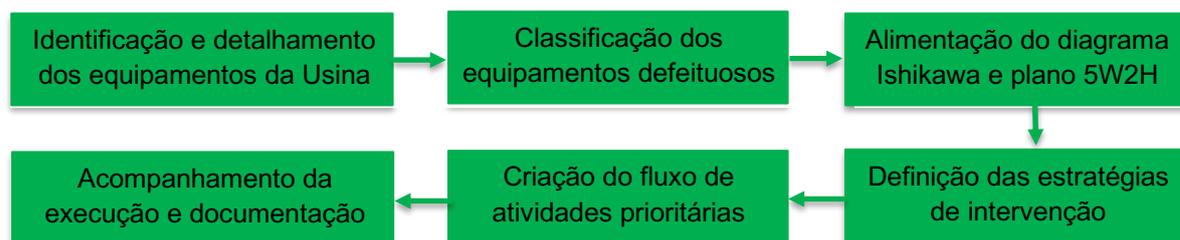
3 METODOLOGIA

A abordagem estratégica de manutenção discutida neste estudo concentra-se na aplicação de uma metodologia preventiva e detectiva, que consiste na realização de atividades em intervalos regulares conforme padrões e critérios predefinidos. O objetivo é mitigar a ocorrência de falhas e perdas de produção não programadas, especialmente em Usinas Fotovoltaicas de Microgeração, para tanto, a Figura 1 engloba um fluxograma com as etapas fundamentais para a elaboração do plano de manutenção proposto.

O plano de manutenção desenvolvido foi baseado em diretrizes de boas práticas extraídas de normativas técnicas do setor como a NBR 16274, NBR 5410, NBR 14039, Resoluções Normativas ANEEL N° 482/2012 e N° 687/2015, manuais de fabricantes e estudos de caso de usinas similares, onde a elaboração do plano inicia com a

realização de uma análise detalhada dos componentes principais da usina, incluindo módulos solares, inversores, estruturas de fixação e componentes elétricos.

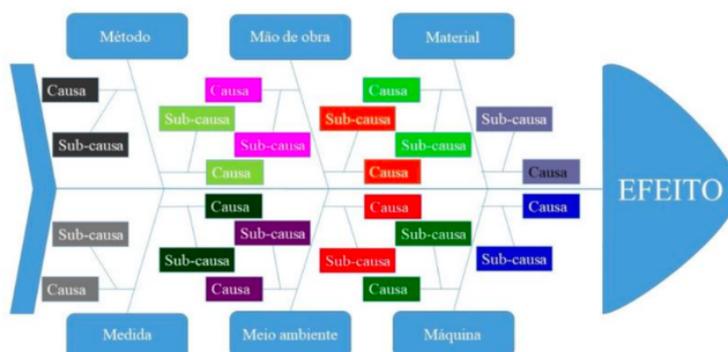
Figura 1 – Fluxograma com as etapas do plano de manutenção



Fonte: Autores.

No que diz respeito às ferramentas de gestão estratégica da qualidade utilizados para a criação de um plano de manutenção eficiente, o diagramas de causa x efeito, também conhecido como Diagrama Ishikawa, criado em 1960 por K. Ishikawa, de acordo com Moreira (2021), permite elencar suas possíveis causas, bem como o motivo dessas, possibilitando diagnosticar as respectivas causas para que assim seja possível elaborar um plano de ação que resolverá ou mitigará o efeito analisado, sendo usado também para promover melhorias em seus métodos de trabalho avaliando as causas relativas a materiais, pessoas, métodos, ambiente, máquinas e sistema de medição. Neste trabalho será utilizado o modelo de causa x efeito, também conhecido como diagramas “espinha de peixe” organizadas em seis categorias (6 M’s): Método; máquina; medida; meio ambiente; material e mão de obra, mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Diagrama de Ishikawa – 6Ms



Fonte: Moreira (2021).

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

- **Medida:** Está relacionada principalmente ao controle de qualidade e mensuração de indicadores de desempenho, instrumentos de medição, entre outros fatores quantitativos e qualitativos. No diagrama proposto nesse artigo foi feita a correlação das medidas com o Sistema Elétrico, onde foram analisadas as condições elétricas dos condutores, stringbox, disjuntos, DPS e fusíveis e a oxidação dos componentes.

- **Métodos:** Estão relacionados a padronização de processos e metodologias de trabalho. Podem ser considerados critérios de priorização e execução de tarefas, métodos de registro, consulta de informações ou adequação do planejamento para a capacidade de execução. No diagrama proposto nesse artigo foi feita a correlação dos métodos com as strings de módulos, onde foram analisados os aspectos de sombreamento dos módulos, utilização do diodo by-pass, problemas com trincas, sujidade e identificação de pontos quentes com relação a baixa qualidade de geração das strings.
- **Máquinas:** Também são considerados como equipamentos para o trabalho, como computadores, máquinas automatizadas, estado de manutenção das mesmas entre outros equipamentos usados no processo que possam estar defeituosos. No diagrama proposto nesse artigo foi feita a correlação das máquinas com os inversores string, onde foram analisadas a falta de monitoramento e dimensionamento do sistema.
- **Meio Ambiente:** São fatores circunstanciais que interferem diretamente o efeito estudado. Questões relacionadas à saúde e segurança no trabalho são os principais fatores considerados neste aspecto. No diagrama proposto nesse artigo foi feita a correlação do ambiente com o meio ambiente de instalação, onde foram analisados os aspectos de origem da sujidade, sombreamento, invasão de insetos, assim como o risco de trinca por objeto e corrosão de conexões.
- **Materiais:** São os materiais utilizados no processo que têm como o resultado o efeito avaliado. Podem ser a conformidade de matéria prima, materiais de comunicação e outros materiais não automatizados. No diagrama proposto nesse artigo foi feita a correlação dos materiais com a usina fotovoltaica, onde foram analisadas as trincas nos módulos com o passar do tempo, impacto da falta de equipotencialidade, aterramento e dimensionamento adequado, bem como o impacto da incompatibilidade da estrutura.
- **Mão de obra:** Neste aspecto de causa são considerados fatores de formação de pessoal e a inadequação do nível de aprendizagem e qualificação, valor de salários, benefícios, nível de satisfação, comunicação e outros fatores relacionados aos colaboradores da empresa e que possam influenciar o efeito avaliado. No diagrama proposto nesse artigo foi feita a correlação das pessoas com o time de execução, onde foram analisados os impactos em relação a desalinhamento da estrutura, trincas em decorrência da instalação, falta de treinamento adequado e mal contato das conexões.

Uma outra ferramenta fundamental para que se tenha um bom fluxo de trabalho é a ferramenta 5W2H, que tal qual a o Ciclo PDCA, pode ser aplicada para implantação de planejamento de ações, também desenvolvida no Japão após a 2ª Guerra Mundial, Moreira (2021) ressalta que por ser simples e objetiva para elaboração de planos de ação, é comumente utilizada em gestão de projetos; análise de negócios; elaboração de planos de negócios, planejamento estratégicos, entre outras atividades ligadas à gestão.

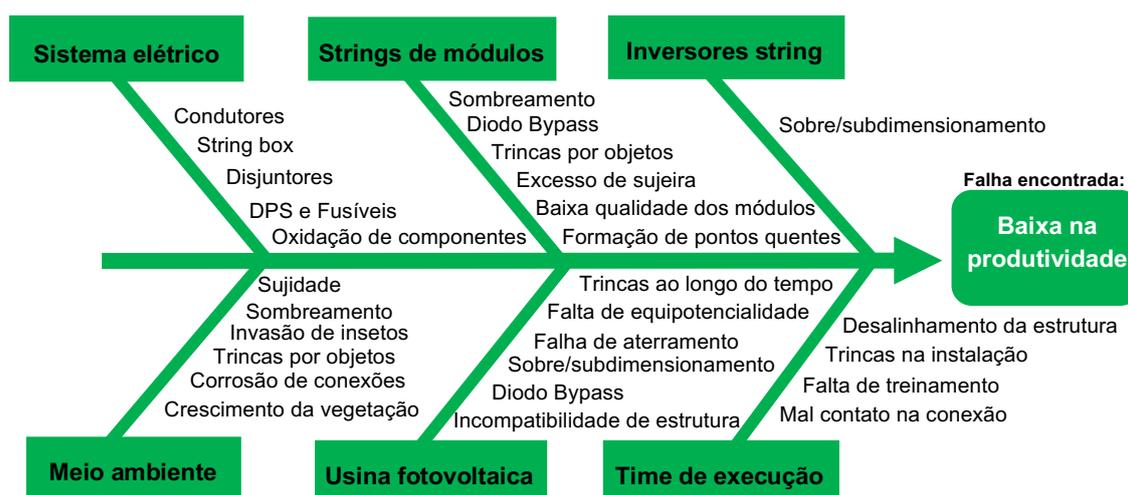
Assim, o Plano de Ação 5W2H é empregada para facilitar o entendimento e a execução das mais diversas tarefas de manutenção. Sua utilidade está em diminuir os ruídos de comunicação entre pessoas de um setor, departamentos e projetos objetivando aumentar a eficiência, os aspectos analisados nesta ferramenta são:

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

Este plano de ação é essencialmente uma ferramenta que auxilia na elaboração de ciclo de melhoria contínua, não só de um setor em específico, mas de todos os setores possíveis da sua implementação. Nesse contexto, a partir dessa análise, são identificados os aspectos críticos que serão selecionados para manutenção regular e especificações necessárias para que o preenchimento do Diagrama Ishikawa, conforme ilustrado na Figura 3 e detalhado no Quadro 1, e Plano de Ação 5W2H, conforme ilustrado no Quadro 2, seja viabilizado.

Dessa forma, com o detalhamento da usina fotovoltaico se torna mais fácil a realização do levantamento e definição de todos os parâmetros necessários para a devida execução da medida preventiva e/ou detectiva.

Figura 3 – Aspectos considerados para o preenchimento do Diagrama Ishikawa



Fonte: Autores.

Quadro 1 – Aspectos de causa dos erros aplicáveis ao Diagrama Ishikawa.

ASPECTOS CONSIDERADOS	VERIFICAÇÃO RECOMENDADA NA VISITA
Sistema Elétrico	Durante a visita as instalações devem ser verificadas todos os componentes elétricos da instalação: conectores, cabos CC e CA; os dispositivos de proteção: disjuntores, DPS e fusíveis; além de possíveis oxidações nos cabos e conectores.
<i>String</i> de módulo	Durante uma visita, deve-se verificar a presença de sombreamento parcial ou total nos módulos e funcionamento dos diodos by-pass para garantir seu funcionamento correto. É essencial realizar uma inspeção visual para identificar trincas, rachaduras ou sujeira acumulada nos painéis. Utilizar termografia para detectar pontos quentes, que indiquem falhas ou baixa eficiência nas <i>strings</i> , também é recomendado.
Inversor <i>string</i>	Durante uma visita, deve-se verificar o funcionamento e o estado do inversor <i>string</i> , garantindo que o sistema de monitoramento esteja ativo e coletando dados corretamente. Inspeccione as conexões elétricas, tanto CC quanto CA, para identificar possíveis falhas de contato ou sinais de superaquecimento, assim como verificar se o inversor está adequado à potência nominal das strings (séries de módulos). Examinar o equipamento quanto a sinais de desgaste físico ou acúmulo de poeira que possam comprometer seu desempenho e vida útil.
Meio ambiente	Durante uma visita, deve-se avaliar os fatores ambientais que podem afetar a eficiência do sistema como as ameaças a sombreamento, invasão de insetos e o crescimento da vegetação.
Usina fotovoltaica	Durante uma visita, deve-se operar uma usina fotovoltaica como um todo, verificando a integridade dos módulos fotovoltaicos em relação a trincas, impactos mecânicos e oxidação nas conexões. Certificando-se de que o aterramento esteja correto e que a equipotencialidade entre os componentes seja adequada.
Time de execução	Durante a visita, é fundamental avaliar se a equipe de execução possui treinamento adequado (NR 10, NR 35) para lidar com a manutenção do sistema fotovoltaico. Verificando se o alinhamento dos módulos está correto, se as conexões elétricas estão bem-feitas e se os procedimentos de instalação foram seguidos corretamente para evitar trincas nos painéis ou mau contato nas conexões. Também é importante verificar a compatibilidade da estrutura com os painéis e a existência de qualquer dano relacionado à corrosão ou desgaste estrutural. Além disso, comprova-se que os profissionais estão cientes das melhores práticas de segurança e que contam com a supervisão adequada.

Fonte: Autores.

Quadro 2 – Indicadores para a elaboração do Plano de Ação 5W2H.

		5W			2H		STATUS
ONDE (WHERE?)	O QUÊ (WHAT?)	POR QUÊ (WHY?)	QUEM (WHO?)	QUANDO (WHEN?)	COMO (HOW?)	QUANTO CUSTA? (HOW MUCH?)	

Onde fazer?	O que será feito?	Porque fazer?	Quem irá fazer?	Quando será feito?	Como será feito?	Quanto custará?	- Andament o -Finalizado -Ñ finalizado
MÓDULOS							
Usina de solo	Limpeza dos módulos da usina	Impactos na produtividade de energia e na redução de perdas	Equipe de manutenção qualificada e capacitada devidamente treinada	Trimestralmente, ou após eventos climáticos (ex.: tempestades de areia)	Utilização de água desmineralizada, escovas de cerdas macias e kit de limpeza não abrasivo. Evitar horários de alta irradiação para prevenir choque térmico	-	-
Usina solo e Rooftop (telhado)	Inspeção termográfica com análise de temperatura	Identificação de pontos quentes (hotspots), falhas em células e conexões, que reduzem eficiência e segurança	Técnico certificado em termográfica e NR-10	Semestralmente, ou quando o sistema indicar queda de desempenho de >10%	Uso da câmera termográfica FLIR E6 (sensibilidade $\leq 0,05^{\circ}\text{C}$). Registrar temperaturas superior a 20°C acima da média do arranjo	-	-
Usina solo e Rooftop (telhado)	Teste de medições elétricas	Verificar a qualidade elétrica da instalação	Técnico em Eletricidade	Após a detecção de pontos quentes ou quando tectado a diminuição da produção de energia.	Uso de Multímetros, Analisadores de rede e Megometro.		
Usina solo	Inspeção visual das strings	Evitar a infiltração de água	Equipe de manutenção qualificada e habilitada com NR10	Assim que forem identificadas a perda de eficiência do sistema e a corrosão de componentes na inspeção	Inspeções fotográficas mensais na usina com baixa produtividade	-	-
Usina Rooftop (telhado)	Inspeção com drone das strings da usina	Evitar a danificação nos conectores	Engenheiro de comissinamento	Trimestralmente ou baseado nos alertas do sistema de monitoramento	Inspeções com drone trimestrais na usina com baixa produtividade	-	-
Usina solo e Rooftop (telhado)	Inspeção da vegetação local	Evitar a sujidade e módulos danificados ou roubados	Equipe de manutenção devidamente treinada	Trimestralmente ou baseado nos alertas do sistema de monitoramento	Inspeções fotográficas trimestrais na usina com baixa produtividade	-	-
INVERSORES							

Usina solo e Rooftop (telhado)	Inspeção termográfica e teste de medições elétricas	Detectar pontos quentes e fuga de corrente	Equipe técnica de manutenção elétrica com NR10	Assim que for identificada a perda de eficiência no sistema e danos físicos na estrutura dos módulos na inspeção	Inspeções visuais mensais com o termovisor	-	-
Usina solo e Rooftop (telhado)	Inspeção e mitigação de ruídos e vibrações	Prevenir falhas mecânicas, aumentar a vida útil e eficiência do equipamento	Engenheiro de comissinamento	Semestralmente, ou imediatamente ao detectar ruídos ou vibrações anormais	Inspeções visuais e auditivas com medidor de vibrações e análise dos dados de operação	-	-
Usina solo e Rooftop (telhado)	Limpeza dos filtros de ar no inversor	Evitar o superaquecimento e manter longevidade	Equipe de manutenção elétrica com NR10	Trimestralmente ou baseado nos alertas do sistema de monitoramento	Remoção e limpeza do filtro	-	-
ESTRUTURA DE FIXAÇÃO							
Usina solo e Rooftop (telhado)	Inspeção visual das estruturas de fixação	Evitar a corrosão e quebra dos conectores	Engenheiro de comissinamento	Assim que for identificado na inspeção	Inspeções visuais mensais com drones na usina com baixa produtividade	-	-
Estruturas metálicas associadas ao inversor da usina solo e Rooftop (telhado)	Inspeção visual nas estruturas metálicas	Garantir a integridade mecânica dos componentes e evitar a corrosão	Engenheiro mecânico/civil de comissinamento	Monitoramento fotográfico contínuo para detectar áreas corroídas.	Testes de continuidade e resistência e utilização da ferramenta Eddy Current de detecção de corrosão	-	-
Usina solo	Inspeção visual nas estruturas metálicas	Evitar erosão do solo e desalinhamento das <i>strings</i>	Engenheiro mecânico/civil de comissinamento	Trimestralmente ou imediatamente após a identificação dos sinais de escoamento de água e erosão	Com a utilização de sensores de inclinação e desalinhamento em pontos críticos identificados na inspeção visual	-	-
CABEAMENTO							
Usina solo e Rooftop (telhado)	Inspeção no cabeamento da usina	Evitar a perda de produtividade	Equipe de manutenção elétrica com NR10 e NR35	Manutenção periódica anual ou quando for identificada uma diminuição da produtividade.	Inspeções termográficas mensais e teste de medição de continuidade	-	-
TRANSFORMADOR							

Usina solo e Rooftop (telhado)	Inspeção e mitigação de ruídos e vibrações	Prevenir falhas mecânicas, aumentar a vida útil e eficiência do equipamento	Equipe de manutenção elétrica com NR10 e NR35	Semestralmente ou imediatamente ao detectar ruídos ou vibrações anormais	Inspeções visuais e auditivas, com o medidor de vibrações e análise dos dados de operação	-	-
Usina solo e Rooftop (telhado)	Inspeção do estado da pintura e a presença de oxidação	Evitar falhas causadas por oxidação, aumentar a vida útil e eficiência do equipamento	Engenheiro de comissionamento	Semestralmente ou quando a oxidação ou a deterioração da pintura forem identificadas	Inspeção visual detalhada do transformador com o drone	-	-
Usina solo e Rooftop (telhado)	Inspeção do estado das buchas do transformador	Garantir a integridade e eficiência do transformador	Engenheiro de comissionamento	Semestralmente, com testes elétricos trimestrais	Inspeção visual detalhada do transformador com o drone	-	-
ATERRAMENTO							
Usina solo e Rooftop (telhado)	Inspeção da continuidade da equipotencialização em todos os componentes metálicos da usina	Garantir a segurança elétrica e comissionamento do sistema	Engenheiro de comissionamento	Semestralmente ou imediatamente após a identificação do erro no inversor	Medição da continuidade em toda a extensão dos circuitos e pontos de aterramento com o terrômetro	-	-
DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO							
Usina solo e Rooftop (telhado)	Inspeção visual das chaves seccionadoras da usina	Garantir a correta operação viabilizando uma manutenção segura da usina	Equipe de manutenção elétrica com NR10	Semestralmente ou imediatamente após a identificação do erro nas chaves	Inspeção visual com a execução de testes operacionais de acionamento e de isolamento com o multímetro	-	-
Usina solo e Rooftop (telhado)	Inspeção visual dos DPS da usina	Garantir a proteção do sistema contra danos por surtos elétricos	Equipe técnica de manutenção elétrica com NR10	Anualmente ou imediatamente após a identificação de surtos elétricos	Inspeção visual com a execução de testes funcionais com o simulador de surtos elétricos, multímetro ou analisador de qualidade de energia	-	-

Usina solo e Rooftop (telhado)	Inspeção dos disjuntores da usina	Garantir a proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos no sistema	Equipe técnica com supervisor de manutenção elétrica com NR10	Semestralmente ou imediatamente após a identificação de sobrecargas ou curtos-circuitos	Inspeção visual com o termovisor e com a execução de testes funcionais como o acionamento manual.	-	-
--------------------------------	-----------------------------------	--	---	---	---	---	---

Fonte: Autores.

De forma prática, o plano (detecção, análise e preenchimento das ferramentas) abrange tanto manutenções preventivas quanto detectivas, visando mitigar o máximo de ocorrências de falhas e minimizar perdas de produção não programadas, conforme os casos abordados no tópico de resultados, que mostram a maioria das situações problemas identificados nas inspeções e que necessitam de um plano de execução para a respectiva manutenção.

Nesse sentido, para as manutenções preventivas, o plano inclui inspeções visuais mensais, limpezas trimestrais dos módulos solares, verificações semestrais dos inversores e testes anuais de componentes elétricos. A aplicação do Diagrama Ishikawa se mostra fundamental para a identificar as possíveis causas de falhas em cada componente do sistema, como danos físicos nos módulos solares, conexões elétricas desgastadas ou corroídas, instabilidades nas estruturas de fixação e problemas de desempenho nos inversores.

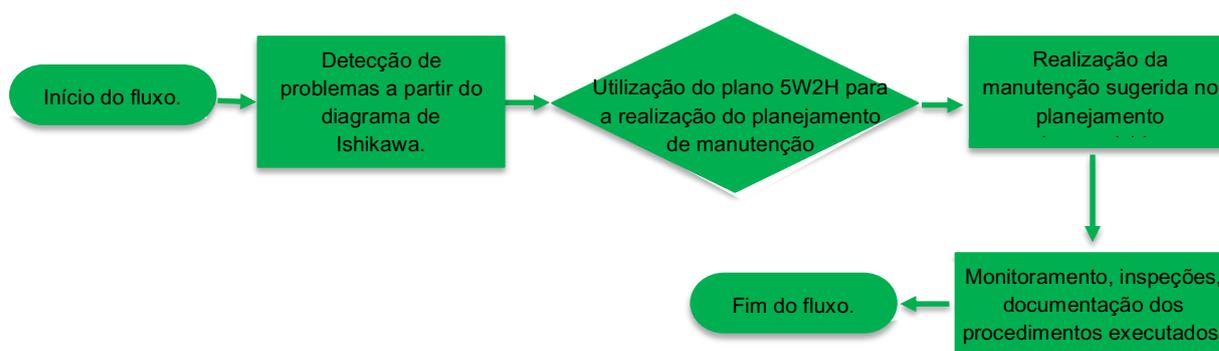
Partindo dessa análise, o Plano de Ação 5W2H é implementado para definir detalhadamente as ações a serem realizadas, por exemplo, as inspeções visuais mensais dos módulos solares visam detectar danos físicos precocemente, com técnicos qualificados responsáveis por realizar a inspeção (Who), utilizando um checklist específico (How), no local de instalação dos módulos (Where), mensalmente (When), para evitar perdas de eficiência (Why), com um custo determinado por visita (How much).

Em relação as manutenções detectivas as ferramentas se mostram necessárias, pois proporcionam um monitoramento contínuo do desempenho dos sistemas fotovoltaicos, através de sistemas de monitoramento remoto, que permitem a detecção imediata de desvios nos parâmetros operacionais. A análise mensal dos dados de desempenho é realizada para identificar tendências e anomalias que possam indicar problemas iminentes. Testes termográficos semestrais são conduzidos para identificar pontos quentes que possam causar falhas futuras.

Nesse sentido a utilização Plano de Ação 5W2H detalha as ações preventivas que serão realizadas afim de sanar o problema detectado, ao passo que o Diagrama Ishikawa possibilita a visualização das causas potenciais detalhadas dos desvios de desempenho. A partir da identificação de todas as causas para os erros apontados no Diagrama de Ishikawa e definição do escopo de execução no Plano de Ação 5W2H, elabora-se o fluxograma com a priorização sequencial para cada problema identificado. Por exemplo, caso seja identificado no Plano de 5W2H um erro que afete o sistema de geração, o Diagrama Ishikawa fornecerá uma análise detalhada dos indicadores que ajudarão a realizar a manutenção adequada de acordo com o fluxo ilustrado na Figura 4.

Dessa forma, este plano de manutenção, apoiado pelas ferramentas de gestão da qualidade, assegura uma abordagem proativa e sistemática para a operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos, reduzindo significativamente o risco de falhas e otimizando a eficiência operacional. Onde as ferramentas permitirão o planejamento detalhado e uma execução eficiente das atividades de manutenção, garantindo a longevidade e a confiabilidade das usinas fotovoltaicas.

Figura 4 – Ilustração modelo da gestão de prioridades das manutenções definidas



Fonte: Autores.

A periodicidade das atividades de manutenção é determinada ao fim do processo definido pelo fluxo de execução, com base na análise das condições específicas de cada equipamento identificado com defeito e levando em consideração fatores como a importância deste para o processo de geração e o nível de confiabilidade exigido. Além disso, são consideradas as recomendações dos fabricantes, as condições ambientais da instalação e os termos de garantia dos equipamentos. Por exemplo, a limpeza periódica dos módulos fotovoltaicos é realizada trimestralmente em regiões com alto índice de poeira ou poluição, conforme a recomendação dos fabricantes, afim de garantir a máxima eficiência de geração. Da mesma forma, a inspeção de pontos quentes é realizada semestralmente, utilizando câmeras termográficas, afim de identificar possíveis falhas antes que elas se agravem e afetem a geração do sistema, garantindo assim a confiabilidade e a segurança da usina.

Vale pontuar que as atividades planejadas ainda podem ser influenciadas por diversos aspectos, como a tecnologia empregada, as condições ambientais da instalação, os termos de garantia, os manuais de operação e as recomendações dos fabricantes dos equipamentos, além da conformidade com as normas e regulamentos aplicáveis onde esses elementos também determinam a periodicidade da execução das ações de manutenção preventiva.

O plano de manutenção é um documento dinâmico, atualizado conforme a usina opera e as equipes de manutenção adquirem experiência. Informações como históricos de manutenção, dados operacionais e resultados de testes elétricos são coletados continuamente e utilizados para revisar e aprimorar os planos de manutenção preventiva ao longo do tempo de operação do sistema. Essas revisões garantem que o plano seja relevante e eficaz na prevenção de falhas e na otimização do desempenho da usina. As atividades planejadas são influenciadas pela tecnologia empregada, pelas condições ambientais da instalação, e pelas normas e regulamentações aplicáveis. A conformidade com esses elementos é fundamental para garantir a segurança e a eficiência das operações de manutenção. Portanto, este trabalho é categorizado como um estudo prático aplicado no desenvolvimento de um

plano de manutenção para usinas fotovoltaicas conectadas à rede, no qual os dados analisados abrangem evidências qualitativas específicas do contexto em análise.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

Conforme as descrições e indicadores levantados, em conjunto a metodologia adotada neste estudo, o plano de manutenção proposto foi aplicado a uma usina fotovoltaica de solo composta por 80 módulos fotovoltaicos da marca Yingli Solar – YL255P-29b, com potência de 255W cada módulo, conforme a Figura 5, e 06 inversores *string* trifásicos da marca PHB – PHB3000-SS de potência 3kW cada inversor *string*.

Figura 5 – Usina solar com 80 módulos fotovoltaicos da marca Yingli Solar



Fontes: Autores.

Após a visita técnica à referida usina solar fotovoltaica de potência de 20,4kW da IFPE Campus Pesqueira no dia 10 de agosto de 2024, localizada na BR 232 – Km 214 – Loteamento Redenção - Prado, Pesqueira - PE, 55200-000, foi possível utilizar o Diagrama de Ishikawa da Figura 2, sendo um ponto importante para a identificação de todas as causas de falhas na produtividade que a usina apresentou, as quais foram constatadas durante a visita técnica realizada no local de operação. Após a identificação abrangente de todas as causas de colaboraram para a redução de produtividade da usina, foi utilizado o plano 5W2H para a elaboração do planejamento de manutenção que será detalhado a seguir.

Todo o Plano de Manutenção foi executado baseado no fluxograma citado na Figura. 4, respeitando a análise de cada erro encontrado na usina em questão. De modo geral, o objetivo do plano de manutenção é minimizar ou eliminar a ocorrência de falhas, paradas não programadas e a deterioração das funções do equipamento, além de assegurar que o processo de manutenção seja organizado, padronizado e com um fluxo contínuo de melhoria e monitoramento. As definições identificadas em relação ao funcionamento da usina fotovoltaica em questão foram: sistema elétrico; *strings* de módulos; inversores *string*; time de execução; meio ambiente; usina fotovoltaica.

Para a realização das verificações foram utilizados os equipamentos apresentados na Figura 6 e descritos abaixo:

- a) **Multímetro:** Instrumento de medição utilizado para verificar diversas grandezas elétricas, como tensão, corrente elétrica e resistência. Modelo: Minipa ET-2233 (Figura 6A).

- b) **Alicate amperímetro:** Equipamento utilizado para medir a corrente elétrica que flui em um condutor, sem a necessidade de interrupção do circuito. Ele "abraça" o condutor e mede a corrente por indução magnética. Modelo: Minipa ET-3320A 100ª (Figura 6B).
- c) **Câmera termográfica:** Dispositivo que capta e registra imagens térmicas, permitindo a visualização da distribuição de temperatura em um equipamento ou superfície. É muito utilizado para identificar problemas de aquecimento ou falhas em componentes elétricos e mecânicos. Modelo: Flir E6 (Figura 6C).

Figura 6 – Principais equipamentos utilizados na inspeção da usina.



Fonte: Autores.

4.1 Plano de ação para falhas no sistema elétrico

Durante a visita técnica à usina solar, em relação ao sistema elétrico, foram identificadas problemas da instalação dos quadros elétricos do inversor, como a mal distribuição do quadro de proteção geral (Figura 7A), cabeamento exposto (Figura 7B), instalação vulnerável a condições externas com presença de insetos (Figura 7C) e derretimento de conectores MC4 (Figura 7D). Essas irregularidades representam riscos significativos à segurança e à eficiência operacional da usina. Para mitigar esses problemas, propõe-se um plano de manutenção, conforme o Quadro 3, que inclui a inspeção e devida substituição dos materiais diretamente danificados, bem como checagem dos demais componentes do sistema.

O processo deve ser realizado pela equipe de manutenção devidamente treinada, que desligará o sistema de alimentação para evitar falhas futuras, utilizando equipamentos de medição adequados, conforme mostrado na Figura 6. Essa intervenção deverá ocorrer imediatamente ao perceber-se queda de produtividade no sistema, prevenindo danos maiores e garantindo a operação segura da usina.

Figura 7 – Verificação do cabeamento e quadro elétrico dos inversores



Fontes: Autores.

Quadro 3 – Indicadores para a elaboração do Plano de Ação 5W2H.

5W					2H		STATUS
ONDE (WHERE?)	O QUÊ (WHAT?)	POR QUÊ (WHY?)	QUEM (WHO?)	QUANDO (WHEN?)	COMO (HOW?)	QUANTO CUSTA? (HOW MUCH?)	
Onde fazer?	O que será feito?	Porque fazer?	Quem irá fazer?	Quando será feito?	Como será feito?	Quanto custará?	- Andament o -Finalizado -Ñ finalizado
SISTEMA ELÉTRICO							
Cabeamento, conectores, inversores, disjuntores e dispositivos de proteção	Desligar todo o sistema de alimentação elétrica da usina	Inspecionar os conectores e cabeamento do sistema	Equipe técnica supervisionada por engenheiro eletricista com certificação NR-10	Assim que a falha na produtividade for percebida	Com a utilização dos equipamentos de medição elétrica adequados	-	-

Fontes: Autores.

4.2 Plano de ação para falhas nas *strings* de módulos

No que diz respeito a distribuição das *strings* de módulos, foram identificadas diversas falhas as quais podem comprometer a eficiência do sistema e sua longevidade. A análise revelou situações críticas como uma *string* descontínua com módulos sob risco de trinca, corrosão incipiente na estrutura, e módulos expostos à sujeira do ambiente, conforme registrado na Figura 8 (A) Sting descontínua e módulos em risco de trinca; (B) Estrutura com início de corrosão; (C) Módulo com exposição a sujeira do ambiente. Em casos mais severos, foi observada sujeira acompanhada de infiltração e corrosão, além da presença de insetos e alta corrosão em uma *string*.

Também foi constatada a danificação na proteção do cabeamento de um módulo, conforme registrado na Figura 8 (D) Módulo exposto a sujeira, infiltração e corrosão; (E) Sting exposta a presença de insetos e alta corrosão; (F) Módulo com danificação na proteção do cabeamento. Para mitigar esses problemas, propõe-se um plano de manutenção, conforme o Quadro 4, o qual inclui a inspeção trimestral da limpeza e das conexões de cada *string*, conduzida por uma equipe de manutenção devidamente treinada. A inspeção visual será comparada aos dados iniciais da usina, assegurando

a detecção precoce de falhas no sistema elétrico e garantindo a eficiência operacional contínua.

Figura 8 – Verificação dos módulos fotovoltaicos da usina



Fontes: Autores.

Quadro 4 – Indicadores para a elaboração do Plano de Ação 5W2H.

5W					2H		STATUS
ONDE (WHERE?)	O QUÊ (WHAT?)	POR QUÊ (WHY?)	QUEM (WHO?)	QUANDO (WHEN?)	COMO (HOW?)	QUANTO CUSTA? (HOW MUCH?)	
Onde fazer?	O que será feito?	Porque fazer?	Quem irá fazer?	Quando será feito?	Como será feito?	Quanto custará?	- Andament o -Finalizado -Ñ finalizado
STRINGS DE MÓDULOS							
Nos módulos de cada <i>string</i>	Monitorar o rendimento de geração da usina e verificar as conexões dos módulos	Garantir a máxima produtividade dos módulos	Equipe técnica especializada de manutenção devidamente treinada	Em seguida o monitoramento e descarte dos erros com o sistema elétrico	Inspeção visual em comparação com dados iniciais da usina	-	-

Fontes: Autores.

4.3 Plano de ação para falhas nos inversores *string*

No que diz respeito a distribuição aos inversores *string* da usina fotovoltaica, foram observadas falhas destacando-se duas situações principais. A primeira refere-se à localização dos inversores, expostos a condições adversas como mofo e umidade excessiva, sem ventilação adequada, segundo a Figura 9 (A) Inversores em local com mofo e umidade excessiva, sem ventilação. Já a segunda falha identificada foi a falta de organização e estruturação do cabeamento e conector do inversor, segundo a

Figura 9 (B) Falta de estruturação do cabeamento e conector do inversor, o que pode comprometer sua eficiência.

Com base nessas falhas, foi proposto um plano de manutenção, conforme o Quadro 5, que inclui o monitoramento contínuo do painel de funcionamento dos inversores, pois é através desse painel que os erros na conversão de energia CC para CA são detectados. A equipe de manutenção, devidamente treinada, será responsável pela verificação, priorizando a substituição ou reparo dos componentes com falhas após a detecção via painel e a análise da garantia do equipamento.

Figura 9 – Verificação dos inversores da usina



Fontes: Autores.

Quadro 5 – Indicadores para a elaboração do Plano de Ação 5W2H.

5W					2H		STATUS
ONDE (WHERE?)	O QUÊ (WHAT?)	POR QUÊ (WHY?)	QUEM (WHO?)	QUANDO (WHEN?)	COMO (HOW?)	QUANTO CUSTA? (HOW MUCH?)	
Onde fazer?	O que será feito?	Porque fazer?	Quem irá fazer?	Quando será feito?	Como será feito?	Quanto custará?	- Andamen- to -Finalizado -Ñ finalizado
INVERSORES STRING							
Inversores string	Monitoramento remotamente no aplicativo o funcionamento do inversor e da geração	Os erros na conversão de energia CC em CA são mostrados pelo painel do inversor	Equipe técnica supervisionada de manutenção devidamente treinada	Em seguida o descarte dos demais erros anteriores e após a detecção de falhas pelo painel de monitoramento	Verificação da garantia do equipamento e devida troca dos elementos ou do próprio inversor	-	-

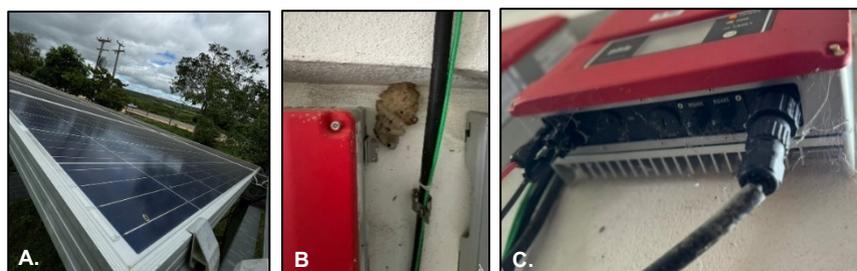
Fontes: Autores.

4.4 Plano de ação para falhas no meio ambiente de instalação

No que diz respeito ao ambiente de instalação da usina fotovoltaica, foram identificadas falhas que comprometem a eficiência do sistema, como a exposição dos módulos à sujeira de pássaros e a presença de insetos nos inversores, conforme ilustrado nas Figura 10 (A) Módulos expostos a sujeira de pássaros; (B) e (C) Inversor com exposição a insetos. Essas condições podem impactar negativamente a produtividade, causando sombreamento dos módulos e possíveis danos aos componentes eletrônicos.

Diante disso, foi proposto um plano de manutenção, conforme o Quadro 6, que envolve a análise detalhada do local de instalação para identificar fatores de risco. A equipe de manutenção, devidamente treinada, realizará inspeções visuais periódicas e o uso de drones para monitoramento. Esse plano será implementado durante a definição do projeto da usina, com o objetivo de evitar impactos futuros no desempenho do sistema.

Figura 10 – Verificação da situação ambiental de instalação



Fontes: Autores.

Quadro 6 – Indicadores para a elaboração do Plano de Ação 5W2H.

5W					2H		STATUS
ONDE (WHERE?)	O QUÊ (WHAT?)	POR QUÊ (WHY?)	QUEM (WHO?)	QUANDO (WHEN?)	COMO (HOW?)	QUANTO CUSTA? (HOW MUCH?)	
Onde fazer?	O que será feito?	Porque fazer?	Quem irá fazer?	Quando será feito?	Como será feito?	Quanto custará?	- Andamento -Finalizado -Ñ finalizado
AMBIENTE DE INSTALAÇÃO							
Ambiente de instalação	Análise técnica do terreno para evitar sombreamento futuro	Prevenir perdas por sombreamento de vegetação / estruturas durante a operação	Engenheiro civil e equipe de topografia	No decorrer da definição do projeto da usina	Visitas técnicas com a inspeção visual e com auxílio de drone	-	

Fontes: Autores.

4.5 Plano de ação para falhas na usina fotovoltaica

No que diz respeito as falhas na usina fotovoltaica, foram identificadas três falhas principais que podem comprometer o desempenho e a segurança da operação. A primeira falha observada, conforme a Figura 11 (A) Exposição perigosa das conexões da usina; refere-se à exposição perigosa das conexões da usina, o que pode aumentar o risco de acidentes e comprometer a integridade do sistema elétrico. A segunda falha, conforme a Figura 11 (B) Módulos armazenados em locais com risco de trincas, envolve o armazenamento inadequado de módulos em locais suscetíveis a trincas, elevando a probabilidade de danos ao material.

Para mitigar esses problemas, foi proposto um plano de manutenção abrangente, conforme o Quadro 7, que inclui a verificação de todos os equipamentos conectados à usina, com foco em partes críticas sujeitas a interferências durante a instalação. O

objetivo é facilitar a identificação de trincas, desalinhamentos e a formação de pontos quentes, garantindo a integridade da estrutura antes da aprovação pela concessionária. A equipe de manutenção, devidamente treinada, realizará inspeções visuais comparando as condições atuais com o projeto original, além de utilizar equipamentos de medição adequados para garantir a precisão das avaliações.

Figura 11 – Galeria sobre a usina fotovoltaica



Fontes: Autores.

Quadro 7 – Indicadores para a elaboração do Plano de Ação 5W2H.

5W					2H		STATUS
ONDE (WHERE?)	O QUÊ (WHAT?)	POR QUÊ (WHY?)	QUEM (WHO?)	QUANDO (WHEN?)	COMO (HOW?)	QUANTO CUSTARÁ ? (HOW MUCH ?)	
Onde fazer?	O que será feito?	Porque fazer?	Quem irá fazer?	Quando será feito?	Como será feito?	Quanto custará ?	- Andament o -Finalizado -Ñ finalizado
USINA FOTOVOLTAICA							
Em todos os equipamentos conectados com a usina	Inspecionar as conexões elétricas e realizar medições elétricas no sistema	Facilitar a identificação de trincas, desalinhamento da estrutura e aparecimento de pontos quentes	Equipe técnica supervisionada por engenheiros de manutenção	Realização periódica conforme plano de manutenção (semestral ou anual)	Inspeção visual e termográfica para detecção de hotspots e falhas estruturais	-	

Fontes: Autores.

4.6 Plano de ação para falhas em relação ao time de execução da instalação

No que diz respeito ao time de execução da instalação da usina, foram identificadas diversas falhas. Dentre os problemas apresentados, a medição na *string* box apresentou inconsistências, segundo a Figura 12 Medição na *string* box inconsistente, impactando a eficiência da geração de energia.

Propõe-se um plano de manutenção conforme o Quadro 8, que inclui a verificação da qualificação da equipe de instalação, garantindo que todos os profissionais envolvidos possuam treinamento adequado em normas de segurança (NR-10 e NR-35) e experiência comprovada em sistemas fotovoltaicos. Essa medida preventiva visa

evitar falhas durante a instalação que possam gerar demandas de manutenção corretiva futura, como trincas em módulos ou riscos elétricos. A supervisão técnica será realizada por um engenheiro responsável, que validará a conformidade dos procedimentos com as regulamentações antes do início das atividades.

Figura 12 – Galeria sobre o time de execução da instalação



Fontes: Autores.

Quadro 8 – Indicadores para a elaboração do Plano de Ação 5W2H.

5W					2H		STATUS
ONDE (WHERE?)	O QUÊ (WHAT?)	POR QUÊ (WHY?)	QUEM (WHO?)	QUANDO (WHEN?)	COMO (HOW?)	QUANTO CUSTA? (HOW MUCH?)	
Onde fazer?	O que será feito?	Porque fazer?	Quem irá fazer?	Quando será feito?	Como será feito?	Quanto custará?	- Andamen- to -Finalizado -Ñ finalizado
MÓDULOS							
Equipe de manutenção da usina	Certificação de que o time de execução esteja capacitado e habilitado para instalar e operar a usina	Garantir segurança durante intervenções e prevenir falhas humanas	Engenheiro de segurança do trabalho	Antes de serem iniciadas as atividades de instalação da usina	Certificação de que todo o time esteja capacitado com as NR's necessárias para o trabalho com eletricidade em altura	-	

Fontes: Autores.

Além das falhas mapeadas nos planos de ação anteriores, observou-se que a acumulação de sujeira nos módulos fotovoltaicos atingiu níveis críticos, exigindo limpeza imediata para evitar perdas significativas de eficiência energética. Adicionalmente, a estrutura de cabeamento apresenta riscos operacionais devido à exposição de condutores sem isolamento adequada e à ausência de aterramento integrado, comprometendo a segurança do sistema e da equipe de manutenção.

Na *String Box*, verificou-se que dispositivos de proteção contra surtos (DPS) já acionados não foram substituídos, aumentando a vulnerabilidade do sistema a descargas elétricas. O quadro de distribuição também carece de aterramento adequado, violando normas de segurança. Quanto aos inversores *string*, um deles apresentou falha crítica no rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT),

resultando em curto-circuito e danos ao conector (Figura 7D). Embora o resfriamento dos inversores seja passivo, a ausência de ventilação adequada no local de instalação (ambiente úmido e sem fluxo de ar) agrava riscos térmicos, exigindo realocação do equipamento para garantir condições operacionais seguras.

No Quadro C.A, foi identificado que é necessária uma melhoria nos acabamentos da instalação, pois foi verificada a ausência da tampa de proteção da caixa do quadro e dos terminais de bornes de neutro e terra, representando um outro risco aos operadores do sistema. Também foi constatado que o quadro está em contato com poeira e casas de marimbondos, o que pode provocar uma futura paralisação do sistema e riscos a equipe que precise fazer as intervenções no local. Finalmente, a casa dos inversores está em um local inadequado, pois se encontra em uma casa de arquivo morto, sujeito a umidade, mofo, aparição de animais peçonhentos e com pouca troca de arrefecimento, sendo este um requisito para a instalação dos inversores, o que também prejudica o desempenho dos inversores. O sistema visitado atualmente segue em funcionamento, mas com algumas falhas, conforme aqui pontuadas, em decorrência à falta de manutenção.

Dando continuidade ao fluxo de manutenção desenvolvido na Figura 4, a próxima etapa seria a realização da manutenção da usina. Foi apresentado ao gestor da instituição o plano 5W2H desenvolvido para que seja adquirido o material para a realização da manutenção.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo entender as principais falhas identificadas na instalação e manutenção de uma usina solar fotovoltaica, com o propósito de propor um plano de manutenção preventiva e detectiva que melhore a eficiência operacional e reduza riscos de acidentes. A análise foi realizada a partir de uma visita técnica e inspeção detalhada dos componentes e procedimentos utilizados, complementada por uma revisão das normativas técnicas aplicáveis.

Para atingir uma compreensão completa sobre as falhas na instalação da usina, foram definidos alguns objetivos específicos principais. O primeiro objetivo foi analisar as condições dos equipamentos de segurança e medição durante a instalação. Verificou-se que os instrumentos de medição, como a câmera termográfica e o alicate amperímetro, permitiram a identificação precisa de falhas e riscos na área de instalação, oferecendo uma visão clara dos pontos que necessitavam de manutenção. Outro objetivo foi avaliar a estrutura da usina, onde se verificou a assimetria na disposição dos módulos, incidência de sombreamento e descontinuidade nas *strings*, prejudicando o desempenho geral do sistema. Por fim, também foram avaliados os parâmetros críticos em relação ao desempenho do sistema de geração, como a sujidade, sombreamento das *strings* e trincas dos módulos fotovoltaicos.

Com isso, a hipótese do trabalho, de que as falhas na instalação poderiam ser minimizadas por meio da manutenção preditiva e detectiva foi confirmada. A correta capacitação do time de instalação e o uso apropriado de equipamentos, como o alicate amperímetro e a câmera termográfica, são fundamentais para prevenir problemas no sistema de geração e falhas de operação da manutenção. Dessa forma, responde-se ao problema de pesquisa, destacando que a ausência de um planejamento estratégico de manutenção eficaz e a falta de capacitação adequada da equipe de execução podem impactar negativamente na operação e na manutenção da usina

solar, comprometendo tanto a segurança quanto o desempenho energético do sistema.

Os instrumentos de coleta de dados, como o uso de equipamentos de medição e inspeção visual, permitiram uma avaliação precisa das condições da usina e das falhas encontradas, reforçando a necessidade de manutenções periódicas e o uso correto dos dispositivos de monitoramento. Em pesquisas futuras, pode-se aprofundar a análise sobre o impacto de diferentes padrões de manutenção em outras regiões com características climáticas adversas e com a consideração de outros fatores no plano de manutenção proposto neste artigo, bem como incentivar treinamentos mais específicos para equipes de instalação e monitoramento, assegurando a conformidade com as normas de segurança e eficiência energética.

REFERÊNCIAS

- AMIN, A.; XIAOCHAN, W.; ALROICHDI, A.; IBRAHIM, A. **Designing and manufacturing a robot for dry-cleaning PV solar panels**. International Journal of Energy Research, v. 2023, p. 1–15, 2023. Disponível em: <https://downloads.hindawi.com/journals/ijer/2023/7231554.pdf?_gl=1*1budahi*_ga*NjAxNTc2MDU2LjE3MTMwNzA5MDk.*_ga_NF5QFMJT5V*MTcxMzA3MDkxMC4xLjAuMTcxMzA3MDkxMC42MC4wLjA.&_ga=2.207745236.755375764.1713070909-601576056.1713070909>. Acesso em: 07 de abril de 2024.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro: 1994.
- BARRETO, F. J. **Planejamento Centrado na Manutenção de Usinas Fotovoltaicas: Uma Abordagem Visando a Eficiência**. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pela UFRGS, Porto Alegre, 2024. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/274163>>. Acesso em: 04 de maio de 2024.
- CANDINE, M. V. S. **Análise de Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos, Considerando a Influência da Sujeira na Região Sul de Goiás: Estudo de Caso no Instituto Federal de Goiás – Campus Itumbiara**. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo IFPE, Itumbiara - GO, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/1234/1/TCC_MarcosCandine.pdf>. Acesso em: 02 de maio de 2024.
- CORREIA, R. S.; NASCIMENTO, J. F.; NEVES, F. F. **Práticas de Inspeção e Manutenção Preventiva em Sistemas Fotovoltaicos**. Ciência & Tecnologia: FATEC-JB, Jaboticabal - SP, v. 15, n. 1, p. 1-9, ISSN 2178-9436, 2023. Disponível em: <<https://publicacoes.fatecjaboticabal.edu.br/citec/article/view/279/234>>. Acesso em: 03 de maio de 2024.
- DANTAS, S. G. **Oportunidades e Desafios da Geração Solar Fotovoltaica no Semiárido do Brasil**. Repositório do Conhecimento do IPEA, p. 9-60, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9680/1/TD_2541.pdf> Acesso em: 01 de abril de 2024.
- ELY, F. SWART, J. W. **Energia solar fotovoltaica de Terceira geração**. Revista O Setor Elétrico. p. 138-139, 2014. Disponível em: <<https://www.ieee.org.br/wpcontent/uploads/2014/05/energia-solar-fotovoltaica-terceira-geracao.pdf>>. Acesso em: 25 de março de 2024.
- FERREIRA, L. C. **Elaboração de Planejamento de Manutenção Preventiva em Usina de Geração Solar Fotovoltaica**. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pela UFES, Vitória – ES, 2019. Disponível em: <https://ele.ufes.br/sites/engenhariaeletrica.ufes.br/files/field/anexo/projeto_de_graduacao_-_leonardo_de_castro_ferreira_-_final_-_revisado.pdf>. Acesso em: 03 de junho de 2024.
- FERREIRA, R. A. M. **Metodologia para Avaliação do Desempenho de Painéis Fotovoltaicos Utilizando um Modelo Elétrico-Térmico e Termografia**

Quantitativa. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica pela UFMG, Belo Horizonte - BH, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-B62JU2/1/tese_n_174___rafael_augusto_magalhães_ferreira.pdf>. Acesso em: 07 de maio de 2024.

FORTE, F. J. S. **Estudo de Caso dos Impactos Relacionados a Falta de Manutenção de um Sistema Fotovoltaico para Garantir sua Eficiência Energética.** Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil pela Faculdade Ari de Sá, Fortaleza, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.faculdadearidesa.edu.br/handle/hs826/243>>. Acesso em: 04 de maio de 2024.

MOREIRA, M. M. A. C.; AZEVEDO, T. C.; SILVEIRA, S. R.; Et. al. **Ferramentas da qualidade: uma revisão de Diagrama de ISHIKAWA, 5W2H, Ciclo PDCA, DMAIC e suas interrelações.** 5º SiPGEM – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, p. 1-6, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.usp.br/directbitstream/b7f13b16-0640-4823-9809-9f76cc7a7df8/3170-9459-2-PB.pdf>>. Acesso em: 02 de junho de 2024.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** CRESESB, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 31 de março de 2024.

REDISKE, G. **Modelo de Avaliação do Desempenho de Operação e Manutenção de Usinas Fotovoltaicas de Minigeração Distribuída.** Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Produção pela UFSM, Santa Maria - RS, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/29379/TES_PPGEPP_2023_REDISKE_GRACIELE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 31 de abril de 2024.

SANTOS, S. W. **Detecção de Sujidade e Sombreamento em Painéis Solares com Inteligência Artificial Utilizando Aplicativos Móveis.** Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação pela UFSM, Santa Maria – RS, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/31399/Santos_Samuel_Winckler_2023_TCC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 08 de abril de 2024.

SOUZA, T. M. **Estudo de Técnicas de Manutenção Preventiva em Instalações Fotovoltaicas.** Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pela UNB, Brasília – DF, 2021. Disponível em: <https://bdm.unb.br/bitstream/10483/29752/1/2021_ThiagoMirandaDeSouza_tcc.pdf>. Acesso em: 28 de abril de 2024.

TORRES, I. C. **Análise do Desempenho Operacional de Sistemas Fotovoltaicos de Diferentes Tecnologias em Clima Tropical – Estudo de Caso: Sistema Fotovoltaico Comercial Conectado à Rede.** Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Título de Mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares pela UFPE, Recife – PE, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/17711/1/DISSERTA%20c3%87%20c3%83O%20FINAL%20-%20IGOR%20CAVALCANTE%20TORRES%20-%2004_02_16.pdf>. Acesso em: 05 de maio de 2024.

VITTI, D. C.; ALVARES, L. M. **Avaliação da Eficiência de Sistemas Fotovoltaicos.** Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pela UNB, Brasília – DF, 2006. Disponível em: <https://bdm.unb.br/bitstream/10483/903/1/2006_DiegoVittiLeandroAlvares.pdf>. Acesso em: 28 de abril de 2024.