

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FABRÍCIO JAENISCH BARRETO

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

**PLANEJAMENTO CENTRADO NA MANUTENÇÃO DE USINAS
FOTOVOLTAICAS: UMA ABORDAGEM VISANDO A EFICIÊNCIA**

Porto Alegre

2024

FABRÍCIO JAENISCH BARRETO

**PLANEJAMENTO CENTRADO NA MANUTENÇÃO DE USINAS
FOTOVOLTAICAS: UMA ABORDAGEM VISANDO A EFICIÊNCIA**

Projeto de Diplomação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Gladis Bordin

Porto Alegre

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FABRÍCIO JAENISCH BARRETO

**PLANEJAMENTO CENTRADO NA MANUTENÇÃO DE USINAS
FOTOVOLTAICAS: UMA ABORDAGEM VISANDO A EFICIÊNCIA**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da disciplina de Projeto de Diplomação do Curso de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pela orientadora e pela banca examinadora.

Prof^a. Dr^a. Gladis Bordin
Orientadora

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a. Gladis Bordin

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Igor Pasa Wiltuschnig

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Tiago Oliveira Weber

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Rosane e José Luís, por todos os ensinamentos. Meu pai me ensinando a ser o que sou e minha mãe me ensinando a não ser o que não sou. Sempre me mostraram que tudo na vida se obtém por merecimento e dedicação. Além disso, agradeço a eles por todos os momentos felizes, fáceis e difíceis, que vivemos e ainda viveremos, pois são esses momentos que nos mostram que o que temos na vida é a família.

A minha irmã, Mariana, que mesmo sendo mais nova, já me ensinou, e ainda ensina muito, sobre como viver uma vida profissional e acadêmica de êxito.

Às minhas avós, Maria Adelaide e Maria Teresa, a primeira conheci pouco e a segunda me viu passar no vestibular e, de alguma forma, ambas me ajudam e me dão forças em diversas situações da vida. Quando penso nelas, transcende algo inexplicável.

Agradeço a minha namorada, Candida, por me mostrar o potencial que tenho e me fazer perceber, de forma clara, que as ações que tomo têm impacto em mim e ao redor. Sem contar na paz, leveza, amor e sincronia que temos.

Meu Sensei de judô, Moraes, que me passou sábios ensinamentos. Em suas palavras: “No judô, o teu amigo é o que te derruba, pois o judoca é aquele que cai 6 vezes e levanta 7”.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos professores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, na figura da minha orientadora, a Prof.^a Dra. Gladis Bordin, pela dedicação em assegurar um ensino de qualidade e pelo auxílio durante toda a minha trajetória acadêmica. De alguma forma, mesmo antes de ser seu aluno em Análise de Sistemas de Potência, eu já sabia que teria lugar especial na minha formação.

RESUMO

O crescente debate ambiental tem impulsionado estudos que buscam explorar alternativas sustentáveis ao desenvolvimento. Usinas de geração de energia fotovoltaica ganham destaque nesse sentido pela capacidade de produção energética frente ao baixo impacto ambiental que proporcionam. O debate no campo ambiental deve ser estendido ao campo da gestão e organização, especialmente, no que tange à manutenção e permanência desses empreendimentos no mercado. Neste sentido, o objetivo desse estudo é analisar o modelo de Planejamento e Controle de Manutenção (PCM) de uma usina fotovoltaica localizada na região centro-oeste. A partir de um estudo de caso, avaliou-se o modelo de manutenção atualmente em uso na planta solar analisada. Identificou-se que a empresa faz uso de um sistema de manutenção em níveis, distribuídos em períodos (mensal, trimestral, semestral e anual), que comportam determinadas atividades de controle, limpeza e manutenção. O diagnóstico inicial foi realizado por meio do Diagrama de Ishikawa e do Ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act*), identificando os pontos fracos, as ações a serem realizadas e os principais elementos que demandam atenção. Essa avaliação permitiu o desenvolvimento de um novo modelo de PCM, utilizando as ferramentas de modo de falha e seus efeitos, FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) e 5W2H (What, Where, When, Who, Why, How e How Much). A elaboração de um novo plano de PCM conservou as atividades já realizadas junto à usina fotovoltaica, ampliando ações de manutenção preditiva e detectiva, considerando que a empresa fazia uso de manutenção preventiva. Com base no estudo realizado é possível avaliar as principais falhas e explorar as melhorias que são posteriormente aplicadas, como, por exemplo, a taxa de falha dos inversores que através de análise chegou-se em 5,4% no período de um ano.

Palavras-Chave: Eficiência, Planejamento e Controle de Manutenção e Usina Fotovoltaica.

ABSTRACT

The growing environmental debate has driven studies that seek to explore sustainable alternatives to development. Photovoltaic power generation plants stand out in this regard due to their energy production capacity given the low environmental impact they provide. The debate in the environmental field must be extended to the field of management and organization, especially regarding the maintenance and permanence of these enterprises on the market. In this sense, the objective of this study is to analyze the Maintenance Planning and Control (PCM) model of a photovoltaic plant located in the central west region of Brazil. Based on a case study, the maintenance model currently in use in the analyzed solar plant was evaluated. It was identified that the company uses a maintenance system in levels, distributed in periods (monthly, quarterly, semi-annual, and annual), which include certain control, cleaning, and maintenance activities. The initial diagnosis was carried out using the Ishikawa Diagram and the PDCA Cycle, identifying the weak points, the actions to be carried out and the main elements that require attention. This evaluation allowed the development of a new PCM model, using the failure mode and its effects (FMEA) and 5W2H tools. The development of a new PCM plan maintained the activities already carried out at the photovoltaic plant, expanding predictive and detective maintenance actions, considering that the company used preventive maintenance. Based on the study carried out, it is possible to evaluate the main flaws and explore improvements that are subsequently applied, such as the failure rate of inverters, which through analysis reached 5.4% over a period of one year.

Keywords: Maintenance, Photovoltaic Plant and Planning and Control (PCM).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistemas <i>off grid</i> (a) e <i>on grid</i> (b).....	16
Figura 2 – Valores diários de irradiação no Brasil no plano latitudinal inclinado – média anual.....	17
Figura 3 – Evolução da capacidade de geração de energia solar no Brasil de 2010 a 2020 (em MW).....	18
Figura 4 – Composição básica de uma célula fotovoltaica.....	20
Figura 5 – Características de gráfico J-V para uma célula fotovoltaica ideal ...	21
Figura 6 – Diferença em porcentagem do aproveitamento energético	23
Figura 7 – Modelo de inversor CC-CA.....	25
Figura 8 - Linha do Tempo na Evolução da Manutenção	28
Figura 9 - Modelos de manutenção em relação a performance do ativo no tempo	29
Figura 10 - Diagrama de Ishikawa para o planejamento de custos de manutenção na eficiência de usinas fotovoltaicas	31
Figura 11 – Estrutura básica de aplicação do FMEA	33
Figura 12 – Modelo de diagrama de planejamento de manutenção.....	39
Figura 13 – Detalhamento das curvas IV e PV	41
Figura 14 – Metodologia para o PCM de uma usina fotovoltaica	45
Figura 15 – Etapas de desenvolvimento do estudo	47
Figura 16 – Planta de localização da usina sob análise	49
Figura 17 – Caracterização da usina FV analisada.....	50
Figura 18 – Detalhamento do funcionamento dos inversores.....	53
Figura 19 – Detalhamento do funcionamento do plano de manutenção por níveis	55
Figura 20 – Variáveis observadas no estabelecimento do modelo inicial de manutenção.....	56
Figura 21 – Caracterização da usina fotovoltaica na região Centro-Oeste.....	57
Figura 22 – Aplicação do modelo para avaliação do período	58
Figura 23 – Aplicação do modelo no calendário de manutenção	58
Figura 24 – Diagrama de Ishikawa aplicado ao projeto de PCM	60
Figura 25 – Clima proeminente na região de atividade da usina fotovoltaica....	62
Figura 26 – PDCA aplicado ao processo de manutenção empregado na usina	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Definição de cada uma das etapas do 5H2W	35
Quadro 2 – Dimensionamento do sistema FV 325 Wp utilizado na usina.....	52
Quadro 3 – Dimensionamento do sistema FV 330 Wp utilizado na usina.....	52
Quadro 4 – Modos de falha e seus efeitos	57
Quadro 5 – Definição de cada uma das etapas do 5H2W	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensionamento do sistema FV utilizado na usina	51
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	12
1.2	HIPÓTESE	13
1.3	OBJETIVOS	13
1.3.1	Objetivo Geral	13
1.3.2	Objetivos Específicos	13
1.4	JUSTIFICATIVA	14
1.5	ESTRUTURA DA MONOGRAFIA	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	16
2.1.1	Usinas Fotovoltaicas: Funcionamento e Principais Componentes	19
2.1.2	Célula Fotovoltaica	20
2.1.3	Inversores	22
2.1.4	Transformadores	24
2.1.5	Condutores CC e CA e Caixa de Junção	24
2.2	PRINCIPAIS FALHAS	25
2.3	MANUTENÇÃO: UMA ABORDAGEM GERAL	27
2.3.1	Manutenção Corretiva	29
2.3.2	Manutenção Preventiva	29
2.3.3	Manutenção Preditiva	30
2.3.4	Manutenção Detectiva	30
2.3.5	Ferramentas Aplicadas à Manutenção	30
2.3.5.1	<i>Modo de Falha e Seus Efeitos (FMEA)</i>	32
2.3.5.2	<i>Plan-Do-Check-Adjust (PDCA)</i>	34
2.3.5.3	<i>5W2H</i>	35
2.4	PLANEJAMENTO E CONTROLE DE MANUTENÇÃO (PCM)	35
2.4.1	Planos de Manutenção	38
2.4.2	Manutenção Aplicada a Sistemas Fotovoltaicos	40
3	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	43
3.1	DELINEAMENTO DA PESQUISA	43
3.2	MÉTODO DE PESQUISA	44

3.3	UNIVERSO DA PESQUISA	46
3.4	COLETA E ANÁLISE DE DADOS	46
3.5	LIMITAÇÕES DO MÉTODO	48
4	ESTUDO DE CASO	49
4.1	DESCRIÇÃO DA EMPRESA	49
4.2	ANÁLISE SITUACIONAL DO PCM DA USINA FOTOVOLTAICA	54
4.3	PROPOSIÇÃO DE MODELO DE PCM	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
	REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

No cenário mundial, a acirrada competitividade exige a máxima redução de custos e ampliação constante da produtividade. Um dos principais fatores que contribuem para a melhoria dos processos é, justamente, o estabelecimento de medidas que possam garantir que a capacidade produtiva de uma planta industrial tenha um protocolo seguro e eficiente para que a probabilidade de falhas seja consideravelmente baixa (SOUSA, 2021). O modo mais fácil e atingir esse nível e a acurácia é por meio da implementação de estratégias adequadas de manutenção que, quando bem planejadas e executadas, podem prolongar a vida útil de equipamentos, reduzir perdas e quebras de equipamentos críticos, garantir a qualidade dos produtos, ampliar a disponibilidade de equipamentos e auxiliar na avaliação do desempenho, em conjunto com outros indicadores, segundo Seleme e Seleme (2012).

Em conjunto com o debate sobre melhorias na produção, cresce a perspectiva de uma produção mais limpa, buscando ampliar fontes de geração de energia que afetem em menor escala o meio ambiente. Conforme Vieira e Crisóstomo (2023), nos últimos anos, com o intuito de suprir as necessidades energéticas e, simultaneamente, preservar o meio ambiente, a geração de energia tem adotado fontes renováveis e sistemas revolucionários. De acordo com os dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2022), o Brasil vem realizando acréscimos significativos de fontes de energia renovável, destacando-se o investimento em energia fotovoltaica (FV), dispondo de mais de 5 GW de potência em operação de fontes solares em usinas fotovoltaicas consideradas de grande porte, correspondendo a cerca de 2,2% da matriz elétrica.

Prevendo-se um aumento do consumo energético no mundo, energias renováveis se tornam opções interessantes para suprir a demanda. Tomando como base o período de 2017, prevê-se um aumento na demanda de até 37% até 2040 e, acompanhando essa tendência de aumento, a produção de energia renovável não atingiu nem os 26% em 2020, como fora anteriormente previsto. Apesar disso, o crescimento de energia gerada em usinas fotovoltaicas cresceu 31% só em 2018, indicando não apenas a capacidade produtiva brasileira, mas também o potencial de desenvolvimento nacional (SOUSA, 2019). Nesse contexto, contudo, deve-se destacar o papel do processo de manutenção para garantia da eficiência das plantas fotovoltaicas.

Gastos relacionados com a manutenção aumentaram de 3,6% do PIB no ano 2000 para aproximadamente 4,7% no ano 2010. O percentual é derivado do custo médio da manutenção em geral das empresas brasileiras e representa uma ampliação de cerca de 116 bilhões de dólares em gastos com manutenção (INFOMET, 2000; SOUSA, 2021). Isso é associado a uma cultura de que a manutenção é incontrolável e custosa, o que reduz investimento em aprimoramento de processos, treinamentos e adequação do modelo de manutenção ao procedimento e aos equipamentos, explicam Ferreira *et al.* (2022).

A gestão de manutenção nas empresas é, como explica Sousa (2021), de suma importância para a garantia da qualidade da produção, da continuidade dos serviços e para a própria redução de custos a médio e longo prazo. Estabelecer o projeto de planejamento da manutenção como atividade prioritária é uma forma eficiente de garantir que o setor de geração e energia fotovoltaica apresente um desempenho ainda melhor a médio prazo, o que não apenas incentiva investimento no setor, mas também garante que as operações apresentam maior qualidade em seu desempenho (MORAES; MORAES; BARBOSA, 2019). Nesse cenário, a discussão em torno desse tema se faz interessante a nível técnico e econômico.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Existem diversos fatores que podem afetar o bom funcionamento de placas fotovoltaicas. A falta de planejamento do processo de manutenção ou a falta de limpeza podem afetar o funcionamento da célula fotovoltaica ao impedirem que as ondas eletromagnéticas provenientes do sol cheguem em sua totalidade à célula. Isso também afeta o funcionamento dos ativos da usina, impactando no painel e, diretamente, na sua eficiência. Acúmulos de sujeira com apenas dois meses podem levar a uma perda de produção energética de até 6,5% (SARVER; AL-QARAGHULI; KAZMERSKI, 2013).

A garantia de eficiência, cujo objetivo último é envolver a alta qualidade a um baixo custo, entrelaça-se diretamente com um bom planejamento do processo preventivo, visando uma estrutura de manutenção que compreenda os pormenores dos cuidados com células fotovoltaicas (SOUSA, 2021). Diante dessas considerações e do cenário brasileiro atual, o problema de pesquisa, questiona: quais as contribuições que o Planejamento e Controle de Manutenção (PCM) podem trazer no

evitamento de falhas e problemas relacionados aos cuidados com células fotovoltaicas?

1.2 HIPÓTESE

A hipótese levantada nesse estudo sugere, como coloca Ferreira *et al.* (2022), que o PCM é uma ferramenta aliada à redução dos custos no que tange aos cuidados com equipamentos.

As falhas podem impedir a execução de determinadas tarefas, a implementação de um modelo de manutenção eficiente não apenas pode evitar que elas ocorram, ou pelo menos prever a possibilidade, mas também reduzir custos, estabelecer um cronograma de trabalho eficiente e responder melhor às demandas e aos objetivos estabelecidos pelas organizações.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos, geral e específicos desse estudo são apresentados a seguir.

1.3.1 Objetivo Geral

Propor um modelo de Planejamento e Controle de Manutenção de uma usina fotovoltaica localizada no centro-oeste do Brasil.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a. Realizar uma revisão de literatura em torno dos principais conceitos sobre o tema manutenção;
- b. Identificar os elementos centrais que compõe o Planejamento e Controle de Manutenção;
- c. Avaliar o modelo de Planejamento e Controle de Manutenção atualmente adotado pela empresa;
- d. Propor sugestões de melhorias e mudanças para o processo.

1.4 JUSTIFICATIVA

A manutenção de sistemas fotovoltaicos é uma temática pouco explorada na literatura. Unindo essa lacuna com a possibilidade de aplicar mudanças na manutenção em um projeto futuro, essa monografia se justifica pela sua aplicabilidade prática, tendo em vista que o autor tem proximidade com o assunto, e sua contribuição teórica. Entende-se que cada empresa apresenta um modelo de Planejamento e Controle de Manutenção, no entanto, trabalhos sobre o tema podem ser utilizados como suporte para o aprimoramento de sistemas internos.

Segundo Ferreira *et al.* (2022), o atual cenário comercial demanda que empresas de pequeno a grande porte, independente do segmento no qual estejam atuando, estejam organizadas para lidarem com os desafios de um cenário cada vez mais competitivo. Especialmente no que tange à manutenção competitiva, os autores ressaltam que um conjunto adequado de atividades e ferramentas de produção e logística desempenham um papel fundamental na sobrevivência e na geração de lucros, tornando-se, desse modo, essencial ao planejamento estratégico. Gregório e Silveira (2019) destacam ainda que o alto custo muitas vezes impede que os gestores compreendam que a manutenção pode ser a base para a transformação financeira.

Como descreve Alvez Filho (2023), a geração fotovoltaica tem sido cada vez mais atrativa aos consumidores no Brasil, por fatores que variam do preço à eficiência, o que faz crescer a procura e o investimento nesse tipo de empreendimento. Trabalhos nesse sentido, portanto, podem apresentar abordagens multidisciplinares ou darem enfoque a estratégias específicas para manutenção e desenvolvimento desses empreendimentos. Justamente por causa desses cenários que esse trabalho tem em si o peso teórico e prático que almeja, reunindo conceitos que orientam o modelo prático que pode ser replicado por outros estabelecimentos.

1.5 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

A presente monografia está estruturada em 6 capítulos, além deste introdutório que apresenta o tema, o problema, os objetivos e estabelece a justificativa para o seu desenvolvimento, indicando os primeiros passos na elaboração da pesquisa.

O Capítulo 2 consiste no desenvolvimento do referencial teórico que serve de base para o desenvolvimento do estudo. Os fundamentos teóricos versam sobre o Planejamento e Controle de Manutenção (PCM), o mercado fotovoltaico (FV) e a relação entre qualidade, custo e eficiência na aplicação e um PCM estruturado.

O Capítulo 3 aborda as ferramentas metodológicas empregues no desenvolvimento da análise, em que se caracteriza a pesquisa e abordam-se as ferramentas utilizadas na coleta de dados.

O Capítulo 4 consiste na apresentação o Estudo de Caso, descrevendo detalhadamente os processos de manutenção empregues pela empresa estudada a fim de identificar os pontos de melhorias que possam ser aplicados no futuro. Em seguida, apresenta-se um plano de melhorias, identificando os pontos fracos e as falhas observadas ao longo do estudo de caso, permitindo a interação entre os conceitos da disciplina e a avaliação do processo prático.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais sobre o trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esse capítulo apresenta os principais conceitos relacionados ao Planejamento e Controle de Manutenção (PCM) no que tange ao mercado de geração de energia fotovoltaica (FV). Aborda-se conceitos como manutenção, célula fotovoltaica, energias renováveis, custos, eficiência, métodos de planejamento, entre outros, que buscam construir conhecimento para o desenvolvimento da análise posterior.

2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Embora existam outros métodos para a geração e energia elétrica, o uso de energia solar tem se sobressaído, dando destaque para a tecnologia fotovoltaica (FV). A partir do uso de células fotovoltaicas, a luz solar é convertida diretamente em eletricidade. As células são reunidas em módulos com variadas capacidades, que podem ser utilizados separadamente ou associados a empreendimentos de geração e qualquer porte, seja em sistemas autônomos (*off grid*) ou em sistemas ligados à própria rede elétrica (*on grid*), conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Sistemas *off grid* (a) e *on grid* (b)



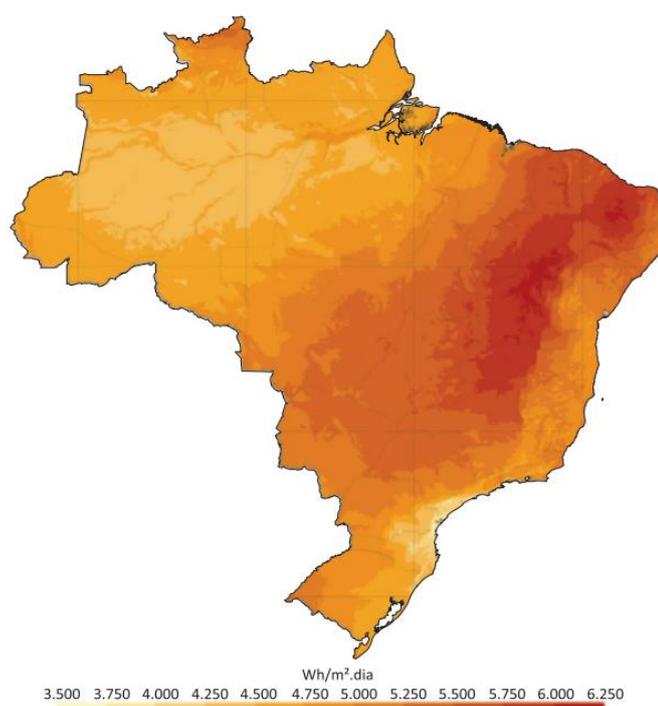
Fonte: Google (2023).

A energia elétrica gerada pelo uso de tecnologia FV pode ser comercializada ou destinada ao autoconsumo, apresentando diferentes estruturas a depender do interesse de uso. A geração e distribuição deve atender às normas impostas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), conforme dispõem as Resoluções normativas 482/2012 e 678/2015 (BEZERRA, 2021). Conforme Araújo (2022, p. 17), a geração de energia FV “[...] consiste na utilização de células fotovoltaicas, a partir

das quais a luz solar é convertida em eletricidade”. A energia solar é considerada uma fonte abundante, inesgotável e limpa dentre as fontes existentes. A energia do sol interceptada pela terra equivale a cerca de $1,8 \times 10^{11}$ MW por ano, valor superior ao consumo mundial de energia, o que torna a modalidade uma das melhores no aproveitamento de uma fonte limpa de energia (REDISKE, 2023).

O Brasil é detentor de um território que comporta índices bastante elevados de irradiação solar. Em 2017, devido a essas condições, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) publicou um estudo que evidencia as características da irradiação solar no Brasil, dando destaque à região Nordeste, com uma média anual de $6,25 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$ e com menor taxa de variabilidade interanual ao longo do ano (VIEIRA; CRISÓSTOMO, 2023). De acordo com o Araújo (2022), a região encerrou o ano de 2022 com um aumento de 95% nas instalações de usinas de energia solar, com um regime operacional considerável. No entanto, Sauaia (2019) ressalta o potencial visível de todo o território brasileiro para a produção de energia advinda de fontes renováveis. Conforme a Figura 2, é possível verificar os valores médios anuais de irradiação solar em todo o território brasileiro.

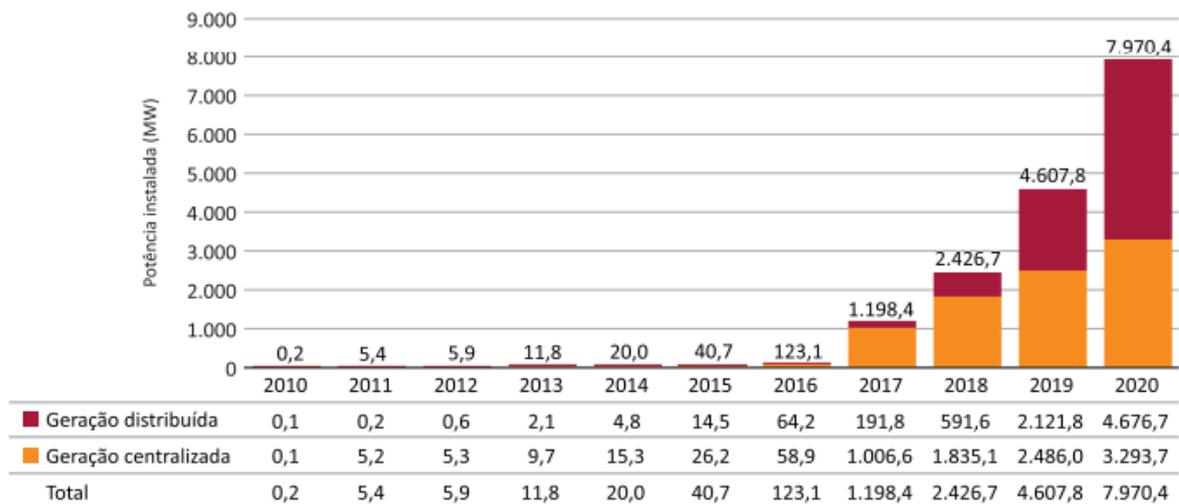
**Figura 2 – Valores diários de irradiação no Brasil no plano latitudinal inclinado
– média anual**



Fonte: Bezerra (2021).

O destaque para a possibilidade de geração de energia solar no Brasil apresenta um potencial considerável, conforme explica Bezerra (2021, p. 4), ao destacar que a geração de energia elétrica por fontes renováveis compreende cerca de “[...] 172 GW para a fonte hídrica (sendo mais de um terço na Região amazônica), 440,5 GW para a fonte eólica, 28.519 GW para a fonte solar em projetos centralizados e 164,1 GW para essa fonte em projetos residenciais”. Nos últimos anos, houve um impulso notável na geração de energia solar devido aos avanços relacionados ao marco legal da geração distribuída e pela queda no preço de equipamentos fotovoltaicos. O crescimento mais expressivo é observado a partir de 2017, conforme os dados da Aneel (2021a, 2021b), atingindo o marco de 7.977,7 MW de potência instalada até o fim de 2020. É possível observar o aumento a partir do gráfico apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Evolução da capacidade de geração de energia solar no Brasil de 2010 a 2020 (em MW)



Os dados disponibilizados no site da Aneel podem sofrer alterações até a finalização dessa pesquisa.
Fonte: Aneel (2021a, 2021b).

De acordo com a pesquisa de Fadigas (2014), o Brasil, por estar localizado próximo à linha do equador, possui um índice de radiação solar total de aproximadamente 140 GW, sendo a maior radiação localizada no nordeste brasileiro, corroborando estudos nesse sentido. Na região do semiárido, tem-se os melhores índices, com valores típicos de 200 a 250 W/m² de potência contínua, o que equivale a 1752 kWh/m² até 2190 kWh/m² por ano de radiação incidente em condições típicas

da região, inserindo a região como um dos locais no mundo que apresentam maior potencial de energia solar. Esses dados permitem ilustrar o cenário da geração e energia solar no Brasil e os componentes desse sistema. Para a geração e energia, um sistema FV precisa possuir alguns componentes, como as células, conexões mecânicas e elétricas e meios de regulação e/ou modificação da saída elétrica (REDISKE, 2023). Estes elementos serão abordados a seguir.

2.1.1 Usinas Fotovoltaicas: Funcionamento e Principais Componentes

Usinas fotovoltaicas (FV) são sistemas compostos por uma série de módulos fotovoltaicos que são interconectados, convertendo energia solar em eletricidade a partir do efeito fotovoltaico. Uma vez gerada a eletricidade pelas células fotovoltaicas, ela é conduzida aos inversores, dispositivo essencial, responsável pela conversão de corrente contínua (CC) para a corrente alternada (CA) sincronizado com a rede, forma de eletricidade utilizadas nas redes elétricas convencionais, conforme Nogueira (2023). Esses inversores estão conectados a um transformador, que eleva a tensão gerada aos níveis mais adequados para a transmissão e a distribuição dessa energia (SOUSA, 2019).

A injeção de energia elétrica diretamente no sistema de distribuição comum é a principal característica de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR), no qual a energia injetada pode ser consumida e as unidades consumidoras, conforme explica Sousa (2019, p. 2), “[...] poderão ter sua fatura de energia elétrica abatida através de um sistema de compensação de créditos energéticos da concessionária de energia responsável, que ocorre quando a geração é superior ao consumo. Com isso o prosumidor terá direito a utilização dos créditos por excedente de energia injetada na rede em até 60 meses”. As usinas são uma fonte de energia limpa, já que não emitem gases poluentes e nem geram resíduos tóxicos, mas sua instalação e manutenção requer um alto investimento para garantir a eficiência dos componentes e para que ela não seja afetada por fatores ambientais, como avarias, sujeira, falhas na coleta de energia, entre outras condições que podem impactar no processo, conforme Nogueira (2023).

Nesse contexto, diversos equipamentos desempenham papéis essenciais na captação, conversão e distribuição da energia solar. Desde os painéis solares, que captam a luz solar e a converte em eletricidade, até os inversores

e transformadores, cada componente desempenha uma função fundamental no funcionamento de uma usina fotovoltaica. Esses equipamentos trabalham em conjunto para maximizar a produção de energia solar (NOGUEIRA, 2023, p. 24).

Sendo assim, é importante estabelecer a função de cada componente e compreender seu papel.

2.1.2 Célula Fotovoltaica

O primeiro componente a ser destacado é o módulo, também chamado de painel solar, um dispositivo que converte luz solar diretamente em energia elétrica. Esses módulos são formados por células fotovoltaicas, que são fabricadas por meio do uso de camadas de materiais semicondutores, como silício cristalino e o filme fino, capazes de gerarem uma corrente elétrica quando há incidência de luz solar, gerando o efeito fotovoltaico (NOGUEIRA, 2023). A Figura 4 apresenta a composição e uma célula fotovoltaica.

Figura 4 – Composição básica de uma célula fotovoltaica



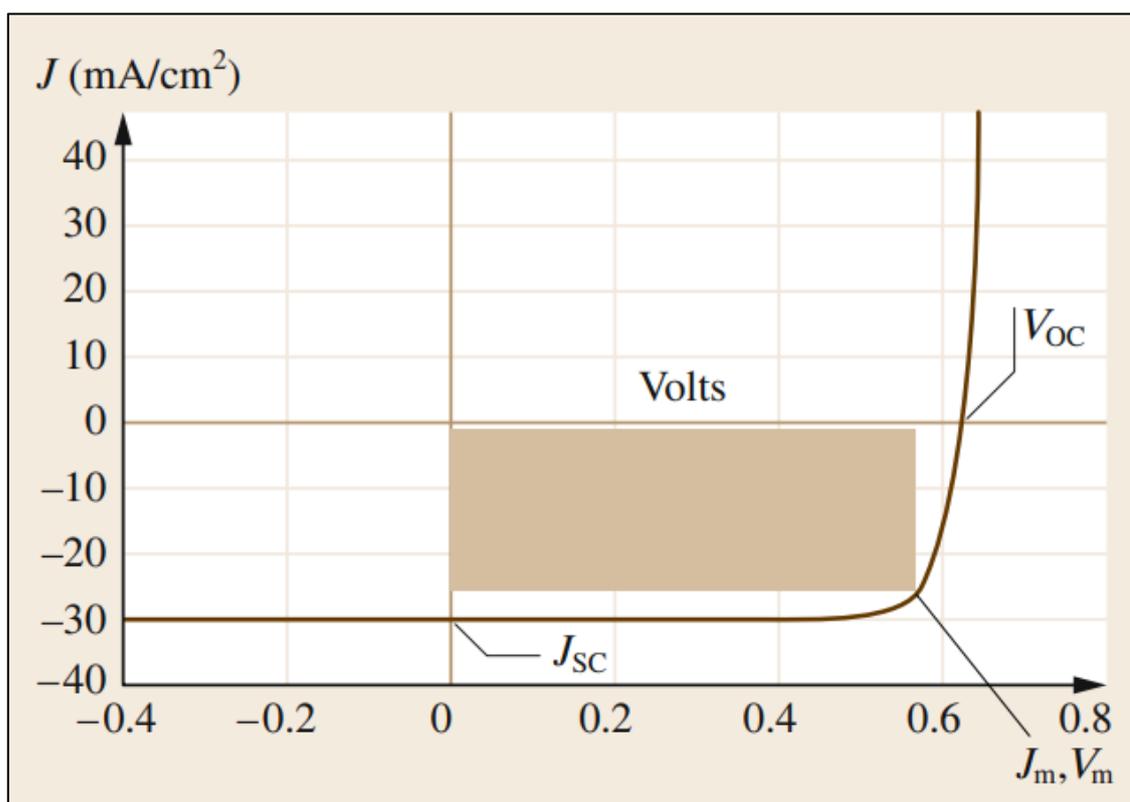
Fonte: Portal Solar (2023).

Essas células são formadas por camadas com diferentes propriedades elétricas. Por exemplo, a camada superior é dopada de material que fornece elétrons

extras, enquanto a camada inferior é composta por um material que gera deficiência de elétrons. Essa diferença se faz fundamental para o funcionamento correto do módulo, segundo Colli (2015). A autora descreve que os elétrons livres se movimentam por meio das camadas de material semicondutor a partir do direcionamento de um eletrodo metálico na célula, o que produz a corrente elétrica. Essa corrente flui para o circuito interno conectado ao módulo e pode ser empregue para outros fins (alimentar dispositivos, armazenada em baterias).

Sua eficiência, no entanto, varia de acordo com alguns fatores, como a qualidade das células, a intensidade da luz solar, a temperatura do ambiente ou mesmo a orientação dos países com relação ao sol. Além disso, a quantidade de energia que é gerada por cada módulo depende muito da sua potência nominal, expressa em *watts (W)* (NOGUEIRA, 2023). Conforme Irvine (2017), uma célula fotovoltaica é basicamente análoga a um diodo com corrente fotogerada, que pode apresentar características que indicam a absorção ideal, levando em consideração o gráfico de saturação (J) versus tensão (V). Para uma célula FV ideal, o gráfico deve apresentar as características observadas na Figura 5.

Figura 5 – Características de gráfico J-V para uma célula fotovoltaica ideal



Fonte: Irvine (2017).

A parte em destaque no gráfico indica que, à medida que a intensidade da luz aumenta, a corrente de curto-circuito torna-se cada vez mais negativa, indicando a presença de uma corrente fotogerada. Para que isso seja possível, é preciso considerar os parâmetros de banda da camada de absorção do semicondutor utilizado (IRVINE, 2017). A eficiência da célula diz muito sobre a capacidade de geração energética de uma usina ou de um sistema, explica Nogueira (2023). Em 2023 os módulos da usina analisada tiveram uma eficiência de 15,72%.

2.1.3 Inversores

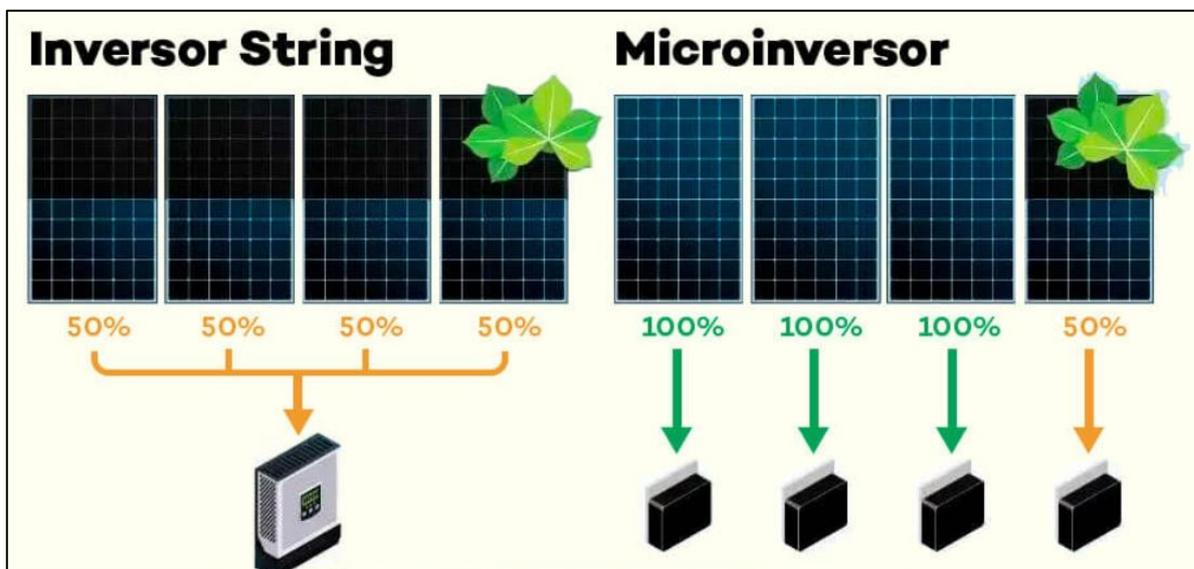
Destacam-se, também, os inversores, essenciais no funcionamento de um parque solar, já que são responsáveis pela conversão de energia gerada, de CC para CA. Podem ser utilizados dois tipos principais de inversores solares, conforme explica Nogueira (2023): inversores centrais (*string*) e inversores modulares (de módulos). O primeiro é normalmente utilizado em parques solares de grande escala, em que os painéis ficam agrupados em *strings*, convertendo a energia gerada por cada *string* de módulo em corrente alternada (CA).

A literatura dá o enfoque aos inversores centrais devido aos benefícios que eles promovem com relação à qualidade e eficiência. Esses inversores desempenham um papel de monitoramento e controle, já que são projetados para lidarem com altas potências e tensões de entrada. Seu intuito é monitorar, em tempo real, o desempenho dos painéis, operando em conformidade com o *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*, algoritmo utilizado em sistemas de energia solar FV para maximização da eficiência de conversão (ARIAS, 2022). O algoritmo faz ajustes em tempo real para que a conversão da CC em CA seja otimizada, buscando a melhor potência para funcionamento da placa solar.

Os inversores ainda podem ser observados em inversores *string* e microinversores (inversor conectado diretamente a um módulo fotovoltaico em áreas externas próximo ao painel, sem necessidade de *string box*). Sua diferença reside no fato de que o *MPPT* é aplicado de modo diferente em cada um deles. No inversor *string*, a otimização da energia é feita com todos os módulos que estão conectados ao inversor, ou seja, o módulo de menor rendimento será o maior rendimento possível nessa *string* em questão. O microinversor faz com que cada painel seja ajustado de

forma individual e atendem até 4 painéis, aumentando o rendimento final do processo, conforme pode-se visualizar na Figura 6.

Figura 6 – Diferença em porcentagem do aproveitamento energético



Fonte: NeoEletric (2022).

Pode-se destacar, ainda o MLPE (*Module Level Power Electronics*), conceito que, quando aplicado, permite que a potência máxima seja extraída de cada painel de forma individual, evitando que problemas como sombreamento, inclinação, ou até mesmo falhas na instalação possam interferir no conjunto (ARIAS, 2022; NOGUEIRA, 2023). Conforme coloca Nogueira (2023, p. 27-28),

[...] os inversores monitoram a tensão, a corrente e a temperatura dos painéis solares, ajustando constantemente a operação dos inversores para otimizar a produção de energia e garantir a máxima eficiência da usina fotovoltaica. Além disso, também fornecem 28 funções de proteção como anti-hilamento, proteção de sobrecorrente e proteções de sub e sobretensão na usina fotovoltaica.

Um inversor é composto por uma série de componentes: (a) retificador, que converte as correntes e garante fornecimento de energia estável; (b) dissipador de calor, que dissipa o calor gerado pelos componentes do inversor para evitar um superaquecimento; (c) ventiladores/sistema de resfriamento, que mantém a temperatura estável para os limites operacionais; e (d) módulo de fase, parte do circuito que realiza a sincronização da saída de energia do inversor para a corrente elétrica (ARIAS, 2022).

2.1.4 Transformadores

Tem-se, também, os transformadores de média tensão, que tem o papel essencial de elevar a tensão fornecida pelos inversores a valores adequados para a distribuição e/ou transmissão (a corrente CA convertida apresenta valores por volta de 400 a 1000 V, assim o transformador eleva a tensão a valores entre 10.000 e 40.000 V). Isso reduz as perdas ao transmitir a energia elétrica e reduz a queda de tensão, uma vez que, quanto maior a tensão, menor é a corrente necessária para que ela seja transmitida para a rede elétrica (POOR *et al.*, 2012).

2.1.5 Condutores CC e CA e Caixa de Junção

Por fim, tem-se os condutores CC e CA e as caixas de junção (*combiner boxes*). Esses elementos desempenham um papel importante no funcionamento de uma planta. As caixas de junção são dispositivos que visam agrupar e conectar os painéis solares em uma configuração adequada, isto é, elas ficam responsáveis por receberem a quantidade de CC que cada painel gera e combiná-las em um ou mais circuitos CC com maior capacidade. Isso garante mais segurança e confiabilidade, justamente porque elas também podem fornecer proteção contra surtos elétricos ou curto-circuitos, auxiliando no monitoramento do sistema como um todo (NOGUEIRA, 2023).

Já, os condutores CC e CA desempenham papéis diferentes no processo de transmissão e distribuição da eletricidade que é gerada pelas células ou por uma usina. Os condutores do tipo CC são utilizados para o transporte da corrente contínua que é produzida pelos painéis solares da caixa de junção até o inversor solar, conforme Arias (2022). A Figura 7 apresenta um modelo de inversor CC-CA

Figura 7 – Modelo de inversor CC-CA



Fonte: Fronius Primo (2019).

Em sistemas autônomos, inversores CC-CA devem fornecer, na saída, tensões elétricas alternadas com amplitude, frequência e conteúdo harmônico que sejam adequados às cargas a serem alimentadas. Nos sistemas conectados à rede elétrica, esses inversores funcionam como fontes de corrente, conforme explicam Pinho e Galdino (2014). Os inversores utilizados para conexão na rede elétrica não funcionam na ausência ou na falha do fornecimento de eletricidade da distribuidora com a rede desligada, considerando que não foram projetados para operar sem a rede elétrica. Portanto, na ausência da eletricidade da distribuidora, o inversor deve se desconectar automaticamente da rede. O desligamento ocorre para garantir a segurança dos equipamentos e das pessoas que possivelmente estejam realizando manutenção na rede elétrica (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

2.2 PRINCIPAIS FALHAS

É possível identificar uma série de falhas e contratempos decorrentes da manutenção incorreta ou insuficiente, gerando resultados negativos sobre a eficiência e o desempenho global de um sistema, seja ele de qualquer porte. A análise desses elementos indica que essas falhas podem afetar o sistema como um todo ou os equipamentos de modo isolado, tornando essencial o conhecimento sobre os principais problemas, como destaca Nogueira (2023).

Em escala global, a sujeira dos sistemas fotovoltaicos, advinda de poeira ou neve, é um dos fatores que mais influência e/ou afeta o rendimento do sistema após a irradiância. Os pesquisadores da *International Energy Agency* (IEA) estimaram que, em 2018, o acúmulo de sujeira causou uma perda anual de produção global de energia fotovoltaica de 3 a 4%, correspondendo a uma perda econômica da ordem de 3 a 5 bilhões de euros. Em 2023, estimativas apontam um aumento, entre 4 e 5%, gerando aproximadamente 4 a 7 bilhões de euros em perdas (quase R\$ 40 bilhões, na cotação atual) (JAHN, 2022).

A limpeza regular dos módulos é uma medida essencial para garantir a máxima eficiência e desempenho. Dessa forma, ao remover a sujeira e os detritos acumulados, a capacidade de absorção dos módulos fotovoltaicos é restaurada. Com uma superfície limpa, os módulos podem converter mais efetivamente a radiação solar em eletricidade, elevando o rendimento do sistema (NOGUEIRA, 2023, p. 36).

Outros problemas, conforme destacado por Costa, Hirashima e Ferreira (2020), estão associados à degradação progressiva dos materiais devido às condições climáticas extremas, como chuvas intensas, neve, ventos fortes e calor escaldante. Além disso, os autores destacam que existem dificuldades nas inspeções e que a falta de manutenção constante pode levar a demora na troca de componentes avariados, o que afeta significativamente o desempenho de um sistema. Além disso, Nogueira (2023) indica problemas de isolamento adequado dos dispositivos, a sobrecarga do sistema, os problemas de conexão, como oxidação, cabos soltos ou corroídos, sobreaquecimento, falha de componentes eletrônicos e, sobretudo, a falta de processos de manutenção assertivos e eficazes.

Conforme destaca o autor, o investimento em sistemas avançados de monitoramento e supervisão tem um papel crucial e fundamental na detecção precoce de problemas, que pode auxiliar na identificação e anomalias antes que elas sejam falhas reais. Assim, o processo de tomada de decisão pode apresentar ações imediatas e efetivas, que previnem ou mesmo mitigam problemas. Um bom sistema de manutenção permite que quaisquer sinais de problemas iminentes sejam previamente observados, o que amplia a vida útil dos equipamentos e pode ser um benefício para a organização em termos de custos e eficiência (NOGUEIRA, 2023).

2.3 MANUTENÇÃO: UMA ABORDAGEM GERAL

Manutenção, conforme descreve a Norma Brasileira 5462 (ABNT-NBR, 1994), é uma combinação de ações que se destinam a manter ou recolocar um item em um estado no qual ele possa desempenhar a função que lhe foi dada. Partindo da interpretação da norma, a manutenção pode ser realizada antes ou após a ocorrência de falha ou de queda na performance. Etimologicamente, conforme explica Sousa (2021), a palavra manutenção vem do latim *manus tentione*, que significa o “ato de segurar” e “aquela mão”. Quando são interpretadas em conjunto, podem ser observadas como o “ato ou efeito de manter”.

Segundo Slack, Chambers e Johnston (2009), a manutenção também pode ser entendida como uma ferramenta que é utilizada pelas empresas na tentativa de evitar a falha ao cuidar das suas instalações. Os autores salientam, também, que, da mesma forma que a produção busca uma menor probabilidade de falhas em seus processos, a preocupação com a manutenção deve seguir o mesmo caminho, na garantia de um sistema que seja eficaz àquilo que se propõe. Seleme (2012) afirma, ainda, que a manutenção é, de modo geral, uma função que acaba sendo realizada em circunstâncias de adversidades e estresse, buscando a restauração rápida no menor tempo possível.

A definição ainda, segundo Almeida (2014), pode ser entendida como diferentes métodos de estabelecer o bom funcionamento do ambiente produtivo. Para o autor, a manutenção envolve não apenas o maquinário, mas as ferramentas, a estrutura administrativa e até as tecnologias que orientam as atividades de cuidado e controle que são estabelecidas no processo de manutenção de um projeto, sistema ou planta produtiva. Partindo de um processo de reflexão histórica, o conceito foi sendo moldado, como indicam Kardec e Nascif (2009), de um conceito lateral para uma atividade chave realizada pelas empresas no pós-Segunda Guerra Mundial. Isto é, alterou-se o entendimento em torno do que as organizações necessitavam para responder às demandas do mercado. De modo mais detalhado, é possível observar a evolução por meio das gerações, conforme apresenta a Figura 8.

Figura 8 - Linha do Tempo na Evolução da Manutenção

EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO				
	Primeira Geração	Segunda Geração	Terceira Geração	Quarta Geração
Ano				
Aumentos das expectativas em relação à Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Conserto após a falha 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade Crescente • Maior vida útil do equipamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Melhor relação custo-benefício • Preservação do meio ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Preservação do meio ambiente • Segurança • Influir nos resultados do negócio • Gerenciar os ativos
Visão quanto à falha do equipamento	<ul style="list-style-type: none"> • Todos os equipamentos se desgastam com a idade e, por isso, falham 	<ul style="list-style-type: none"> • Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira 	<ul style="list-style-type: none"> • Existência de 6 padrões de falhas (Nowlan & Heap e Moubray) Ver Capítulo 5 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzir drasticamente falhas prematuras dos padrões A e F (Nowlan & Heap e Moubray) Ver Capítulo 5
Mudança das técnicas de Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Habilidades voltadas para o reparo 	<ul style="list-style-type: none"> • Planejamento manual da manutenção • Computadores grandes e lentos • Manutenção Preventiva (por tempo) 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoramento da condição • Manutenção Preditiva • Análise de risco • Computadores pequenos e rápidos • Softwares potentes • Grupos de trabalho multidisciplinares • Projeto voltado para a confiabilidade • Contratação por mão de obra e serviços 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da Manutenção Preditiva e Monitoramento da Condição • Minimização nas Manutenções Preventiva e Corretiva • Análise de Falhas • Técnicas de confiabilidade • Manutenibilidade • Engenharia da Manutenção • Projetos voltados para confiabilidade, manutenibilidade e Custo do Ciclo de Vida • Contratação por resultados

Fonte: Kardec e Nascif (2009).

Cada um dos períodos representou um momento importante na evolução do conceito e na sua aplicação no processo industrial. Foi a Quarta Geração a precursora do modelo de Planejamento e Controle da Manutenção (PMC), conforme Lamas

(2021), fornecendo, além do caráter técnico, bases econômicas, legais e sociais sobre o processo de manutenção. Nesse ínterim, destacam-se, também, os métodos de manutenção que permitem explorar diferentes modalidades de controle. Destaca-se, a seguir, os principais modelos de manutenção e em que momento eles atuam em relação a chance de falha do ativo, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Modelos de manutenção em relação a performance do ativo no tempo



Fonte: Modular cursos (2010).

2.3.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é realizada após a ocorrência de uma falha ou quebra no equipamento ou sistema. A intervenção ocorre somente quando a falha já ocorreu, com o objetivo de restaurar o funcionamento normal. A manutenção corretiva é reativa e pode causar interrupções indesejadas na operação. Geralmente, é aplicada quando não é possível prever a falha ou quando a falha é menos custosa do que a manutenção preventiva (DE MELO, 2007). Lamas (2021) destaca, ainda, que esse modelo tem uma menor capacidade de previsibilidade de paradas, mas acaba sendo o método mais vantajoso em termos econômicos, já que ele é um planejamento a curto prazo.

2.3.2 Manutenção Preventiva

Para essa modalidade de manutenção, as ações de inspeção, reparo e substituição de peças são realizadas em intervalos regulares e pré-determinados,

mesmo que o equipamento não tenha apresentado nenhuma falha. O objetivo principal é o de evitar a ocorrência de falhas e maximizar a disponibilidade do equipamento. A manutenção preventiva é planejada com base em análises de histórico de falhas e dados de desempenho do equipamento (ABECOM, 2021). De acordo com Lamas (2021), o uso de um modelo preventivo gera maior confiabilidade aos prazos do sistema de produção, elimina o tempo de espera do conserto e reduz o número de intervenções corretivas, isto é, as falhas.

2.3.3 Manutenção Preditiva

Na aplicação de um modelo preditivo na manutenção, utilizam-se sistemas de monitoramento e análise em tempo real, para avaliação e correção de falhas, de modo que as variáveis obtidas na observação permitam prever a ocorrência de falhas (LAMAS, 2021). A manutenção preditiva está baseada no uso de informações em tempo real sobre o desempenho e as condições do equipamento, permitindo intervenções precisas e adequadas, o que leva a uma redução dos custos geralmente ocasionados por paradas inesperadas (MOBLEY, 2002).

2.3.4 Manutenção Detectiva

A manutenção detectiva, conforme explica Lamas (2021), concentra-se na detecção precoce de sinais de falhas em seus estágios iniciais. Esse tipo de manutenção implica no uso de pequenas correções que são realizadas pelos operadores dos equipamentos. O uso da prevenção detectiva permite que as soluções sejam encontradas com maior eficiência e de um modo mais rápido, garantindo a solubilidade efetiva de problemas técnicos. Além disso, amplia consideravelmente o tempo entre as intervenções e elimina o tempo de espera do conserto.

2.3.5 Ferramentas Aplicadas à Manutenção

A aplicação da gestão de manutenção pode ser realizada por meio de algumas ferramentas, tais como o Diagrama de Causa e Efeito, Procedimentos Operacionais Padrões (POPs) e o Método Kaizen. Ela também pode utilizar métodos como o de ser centrada na confiabilidade ou na análise do modo de falha e seus efeitos (FMEA). As

ferramentas e os métodos associados ao uso da manutenção de modo regular são essenciais para a garantia da qualidade do processo de gestão (ALVES FILHO, 2023). Por exemplo, conforme destaca Lamas (2021, p. 8), o uso do Diagrama de Causa e Efeito, também conhecido como Diagrama de Ishikawa, surgiu com a finalidade de “[...] identificar e prevenir todas as causas possíveis de um problema específico, e é um exemplo de manutenção preventiva”.

O diagrama funciona de acordo com o modelo apresentado na Figura 9. De um lado, tem-se o problema/efeito e do outro, uma lista de causas que podem levar ao seu surgimento, sendo elas listadas por meio de uma hierarquia de importância. Sua utilidade reside no fato de que ele permite identificar as razões pelas quais os problemas surgem, dando enfoque às soluções corretas para cada uma das circunstâncias observadas, conforme Viana (2002).

Figura 10 - Diagrama de Ishikawa para o planejamento de custos de manutenção na eficiência de usinas fotovoltaicas



Fonte: Adaptado de Viana (2002).

Outras ferramentas, como o próprio POPs ou Método Kaizen, exigem um trabalho grupal, com enfoque em melhoria contínua. Cada um deles se enquadra, especificamente, em um modelo de manutenção que se propõe a anteceder o problema ou atuar quando o mesmo surge. De acordo com Alves Filho (2023), eles podem também ser combinados com métodos, buscando trabalhar o processo de confiabilidade produtiva ou o estudo dos métodos de falha de cada componente de um ambiente de produção. A intenção dessas ferramentas é, justamente, garantir que os efeitos gerados possam ser avaliados com o melhor custo-benefício possível.

Trata-se, nesse sentido, de um projeto que evite problemas relacionados às falhas, considerando um modelo de organização de criticidade dos componentes de

um sistema, englobando gestão de estoque e controle rigoroso dos métodos de avaliação empregues. Pode-se utilizar uma diversidade de métodos, como o FMEA, o PDCA (*Plan-Do-Check-Adjust*) e 5W2H, combinados com ferramentas que se destacam nesse ambiente, como descreve Nogueira (2023): Fluxograma, Folha de verificação, Carta de Controle, Histograma, Diagrama de Dispersão e Diagrama de Pareto.

2.3.5.1 *Modo de Falha e Seus Efeitos (FMEA)*

O método FMEA, do inglês *Failure Mode and Effect Analysis*, foi desenvolvido da década de 1950 pelo exército norte-americano cuja função era a de avaliar a eficiência das atividades com base no impacto da missão, considerando o sucesso de defesa pessoal de cada soldado. Na década de 1960, a *National Aeronautics and Space Agency* (NASA) aprimorou o modelo empregue pelo exército para aplicabilidade no setor aeronáutico. Posteriormente, a indústria automobilística também apresentou uma nova estrutura para essa ferramenta, indicando a sua flexibilidade e aplicabilidade nos mais variados setores da sociedade (LIMA JUNIOR; RODRIGUES, 2022).

Conforme explicam Ferreira *et al.* (2022), o método FMEA é utilizado para definir ações de melhorias na redução ou eliminação de potenciais falhas em um produto ou processo. Segundo Bassan (2020), o método é eficiente na detecção e falhas antes mesmo que ocorram, já que seu objetivo é ampliar a qualidade e confiabilidade dos elementos. Lobo (2010) explica que a aplicação do FMEA pode ocorrer na busca pela redução e falhas, na diminuição da probabilidade de falhas potenciais, na ampliação da confiabilidade e na redução de chances de erros. Para tanto, as ações tomadas consideram três índices:

- I. Índice de severidade, em que se refere à gravidade do efeito de modo de falha para o cliente;
- II. Índice de ocorrência, avaliando a frequência da falha;
- III. Índice de detecção, considerando a probabilidade de detecção da falha.

A proposta segue os elementos básicos dispostos na Figura 10.

Figura 11 – Estrutura básica de aplicação do FMEA



Fonte: Lima Junior e Rodrigues (2022).

A implementação do método FMEA deve ser conduzida por meio algumas etapas, explicam Ferreira *et al.* (2022), a Etapa 1 consiste na identificação das causas e no estabelecimento de notas de severidade; a Etapa 2 são estabelecidos planos de ações de eliminação ou minimização a partir de uma ordem de prioridade; e na Etapa 3 ocorre a reanálise das falhas, para identificar se os planos funcionaram ou precisam ser revistos. Ainda, de acordo com Lima Junior e Rodrigues (2022), a ideia é estabelecer respostas para os seguintes questionamentos: “como pode falhar?”, “por que falha?” e “o que acontece quando falha?”. O uso das três categorias de classificação (Ocorrência, Severidade e Detecção) permite observar o Número de Prioridade de Risco (NPR), do inglês *Risk Priority Number – RPN*. A obtenção do NPR (SAKURADA, 2001) ocorre a partir da Equação (1).

$$NPR = Ocorrência \times Severidade \times Detecção \quad (1)$$

A Etapa 4 consiste na interpretação dos dados, devendo-se priorizar ou selecionar os modos de falhas potenciais que devem ser primariamente tratados ou que representam mais risco para o funcionamento do empreendimento. A Etapa 5 seria o acompanhamento, isto é, na aplicação das ações necessárias, realiza-se o acompanhamento da implementação, desenvolvimento e revisão, verificando a necessidade de associação a outros métodos, mudança ou mesmo o abandono de procedimentos, conforme esclarecem Lima Junior e Rodrigues (2022).

O FMEA apresenta 5 subtipos mais comumente aplicados na indústria, como explica Stamatis (2003):

- I. FMEA de Sistema, que é utilizado na análise de sistemas e subsistemas em desenvolvimento inicial do projeto (elaboração do conceito, dando enfoque nas potenciais deficiências);
- II. FMEA de produto, que busca avaliar o produto antes da liberação;
- III. FMEA de processo, que analisa processos de fabricação e montagem;
- IV. FMEA de serviço, que analisa o serviço ofertado ao consumidor, objetivando identificar, tarefas desnecessárias, erros ou enganos;
- V. FMEA aplicada a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), que é uma metodologia estruturada que visa definir as melhores atividades na manutenção industrial para manter a disponibilidade e confiabilidade de qualquer processo produtivo, que estabelece padrões de atividades de manutenção, dando enfoque um conjunto de ações e a avaliação de todos os modos de falha em um modelo detalhado.

2.3.5.2 *Plan-Do-Check-Adjust (PDCA)*

O Ciclo PDCA é uma ferramenta de ampla aplicabilidade, utilizado por empresas de diferentes setores na melhoria de processos internos de gestão, manutenção e organização, a fim de redirecionar o processo decisório (SANTOS FILHO, 2021). O Ciclo se divide em quatro etapas, conforme descritas a seguir:

- I. *Plan* (Planejamento): onde são definidas as metas ideias para o processo analisado e se estabelece método de execução;
- II. *Do* (Fazer): processo de execução das ações, treinamento de equipe e registro de informações;
- III. *Check* (Verificação): etapa de comparação, em que observam os dados anteriores e os dados coletados na fase de execução para verificação de mudanças;
- IV. *Action* (Ação Corretiva): momento no qual os resultados, em caso negativo, são repensados e as ações revisadas, objetivando a padronização o processo e a melhor resposta final.

Santos Filho (2021) destaca que, no caso da gestão em geração de energia elétrica, o PDCA se torna uma ferramenta interessantíssima justamente porque a

ferramenta é de fácil emprego e compreensão, o que permite que o modelo seja estendido a todos os setores de uma empresa.

2.3.5.3 5W2H

A metodologia 5W2H é a elaboração de algumas perguntas sobre o que, por que, onde, quando, quem, como e quanto custa o desenvolvimento de um projeto, planejamento de manutenção ou investimento. Ela pode ser utilizada na elaboração de planos de ação, plano de manutenção ou projetos de investimento que exigem uma divisão por etapas, já que seu intuito é encontrar falhas ou lacunas que possam impedir o término adequado do processo (SILVA; BARRETO, 2019). O Quadro 1 apresenta a sumarização de como cada um dos elementos dessa ferramenta funcionam.

Quadro 1 – Definição de cada uma das etapas do 5H2W

Pergunta	Definição
What? – O quê?	Descrevem-se ações a serem realizadas, registrando-se a situação atual e a expectativa de cenário final.
Why – Por quê?	Indicação de possíveis causas das falhas e vantagens de investimento (justificativa).
Where – Onde?	Consideração do contexto de estratégia geral, abrangência, espaço de atuação.
When – Quando?	Prazo de aplicação, estabelecido por etapas.
Who – Quem?	Atribuição de responsabilidades (chefe de equipes ou equipes de trabalho), coordenação do plano.
How – Como?	Metodologia utilizada para emprego das ações, pensando em critérios de avaliação e qualidade.
How Much – Quanto?	Última etapa, onde se estimam os custos das soluções, utilizado para indicar a viabilidade das ações.

Fonte: Adaptado de Santos Filho (2021).

Não há muitos estudos nesse sentido que explorem a utilização do método 5H2W na disciplina de engenharia elétrica aplicada à geração de energia. No entanto, assim como o PDCA, a proposta é bastante intuitiva e pode ser aplicada com facilidade a todos os setores, o que a torna uma possibilidade interessante, como destacam Silva e Barreto (2019).

2.4 PLANEJAMENTO E CONTROLE DE MANUTENÇÃO (PCM)

O planejamento e Controle de Manutenção (PCM), conforme Kardec e Nascif (2009), é o planejamento que busca, de modo essencial, manter e melhorar a eficiência, eficácia e efetividade de um serviço. Sua aplicação pode ser desenvolvida

em diversas áreas de estudo, mas deve ter o objetivo de coordenar ações para a consecução das metas estabelecidas por uma organização. De acordo com a visão proposta por Sousa (2021),

No contexto específico do serviço de manutenção, o planejamento basicamente almeja a execução das manutenções no melhor momento para a fábrica como um todo, ou seja, uma empresa que planeja a manutenção é capaz de otimizar recursos por meio do correto preparo e acompanhamento da manutenção (SOUSA, 2021, p. 29).

Nesse sentido, a proposta do planejamento é a criação de um plano de manutenção, isto é, o estabelecimento de um projeto que visa a melhoria contínua durante um período específico (VIANA, 2002). O PCM, nesse sentido, tem o intuito de preparar, programar e analisar os resultados obtidos por meio de uma coleta de dados pré-elaborada para realizar comparações com determinados momentos de atuação a fim de identificar problemas que carecem de correção e que possam impedir que a empresa atinja seus objetivos estratégicos (SOUSA, 2021).

Um modelo de planejamento bem estruturado é essencial para garantir que as falhas sejam expostas e devidamente corrigidas. Além disso, estabelecer um PCM permite que a melhoria seja contínua e que os setores de uma organização atuem de forma mais integrada e com maior controle dos sistemas internos e suas mudanças. Isso, eventualmente, garante uma melhor dinâmica de trabalho para enfrentar possíveis problemas (LAMAS, 2021). Conforme escrevem Ramos e Schrottner,

[...] o planejamento é efetuado com uma análise dos ativos da empresa, manuais de fabricantes e documentações, relacionando, isso tudo, com a realidade do setor de manutenção e da empresa como um todo, traçando um planejamento de execução de manutenções, com cadastro de manutenções preventivas, preditivas e inspeções periódicas de ativos (RAMOS; SCHRATTNER, 2020, p. 5).

Isso indica que O PCM trabalha com algumas ferramentas principais: o tagging, a codificação de equipamentos, a definição do fluxograma de serviços e a ordem de manutenção (OM). As funções do uso dessas ferramentas indicam as responsabilidades que um modelo de PCM deve possuir (RAMOS; SCHRATTNER, 2020; LAMAS, 2021; SOUSA, 2021), sendo estas:

- a) Organizar e gerenciar planos de manutenção de equipamentos;
- b) Obter e coordenar recursos para eventuais manutenções;

- c) Controlar e programar atividades de inspeção por meio de métodos de manutenção preventiva e preditiva;
- d) Controlar indicadores de desempenho e ativos de manutenção do maquinário;
- e) Cadastrar equipamentos para elaboração e planta industrial.

Dentre esses aspectos, a aplicabilidade do PCM segue uma estrutura própria. Em um primeiro momento, as informações de planejamento e programação de manutenção (PPM) devem ser coletadas e categorizadas por meio de especialidade, materiais necessários e priorização das ordens de serviço (VIANA, 2002). Quanto às ordens de serviços de manutenção, elas podem ser: OMs preventivas, geradas pela manutenção do equipamento; OMs derivadas de solicitações de serviço de operação; OMs manuais, para tender ou não uma emergência; e OMs provenientes de inspeções de campo ou laudos preditivos (LAMAS, 2021).

A partir de uma OM, delimita-se uma atribuição de prioridade para esta, sendo 0 a mais urgente, 1 intermediária e 2 a com maior prazo de solução. Uma vez estabelecidas essas questões, passa-se para a última fase do PCM, que seria o controle da manutenção, onde se estabelece um ciclo de ações que deve ser efetuada de acordo com um calendário para realização de um processo de avaliação futura, conforme explica Viana (2002). Assim, podem ser aplicadas as ferramentas do PCM. Cada uma delas apresenta um propósito específico, destacado a seguir.

Tagueamento. Essa ferramenta fornece um código que identifica a localização e áreas operacionais, sistemas e posições dos equipamentos, servindo para mapeamento. Ele é muito empregue em empresas de médio e grande porte com o objetivo de agilizar o planejamento e a programação das atividades de manutenção, fornecendo, também, informações estratificadas, como número de quebras, disponibilidade e custos, de acordo com o destaque de Lamas (2021).

Codificação de Equipamentos. Sua principal função é individualização de cada equipamento. Se o tageamento seria o endereço, a codificação pode ser entendida como o cadastro de Pessoa Física (CPF), conforme a analogia feita por Viana (2002). Aqui, cada equipamento recebe um código único, de modo que permita que os planejadores possuam registros e históricos individuais para cada máquina sobre cada peça e o tempo de vida útil.

Fluxo de Serviços. Essa ferramenta é valiosíssima para a melhora na eficácia da manutenção e ampliação da produtividade, explica Lamas (2021), já que é ela tem

a finalidade de estabelecer algumas regras para o direcionamento do plano de manutenção (inspeção, demanda, solicitação de serviço e operação corretiva). É a partir dele que são gerados os OMs, assim como é ele que identifica o tipo de OM e a necessidade de serviço.

Ordem de Manutenção. Por fim, esse é o documento que estabelece as instruções de trabalho a serem executadas pela manutenção. Ele autoriza os serviços e identifica o método pelo qual eles devem ser realizados (manual, automático ou por solicitação de serviço). Aqui, a OM apresenta cinco fases que vão da abertura ao encerramento: (i) não iniciada; (ii) programada; (iii) iniciada; (iv) suspensa e (v) encerrada. A OM tem uma estrutura específica, devendo apresentar um “[...] cabeçalho, com o número da OM, TAG, equipamento, centro de custo, tipo de manutenção, descrição das tarefas e histórico” (SOUSA, 2021, p. 32).

2.4.1 Planos de Manutenção

Quando se fala em planos de manutenção, refere-se a um conjunto de informações organizadas que possam estabelecer uma rotina básica de trabalho aos responsáveis por essa manutenção. Esse plano deve conceber uma rotina que faça uso de métodos de inspeção (*checklist*, lubrificação, monitoramento, troca de itens, limpeza, intervenção preventiva, entre outros), mas que também considere ferramentas que possam auxiliar no treinamento e na fixação de um modelo de práticas autônomas inclusive (VIANA, 2002).

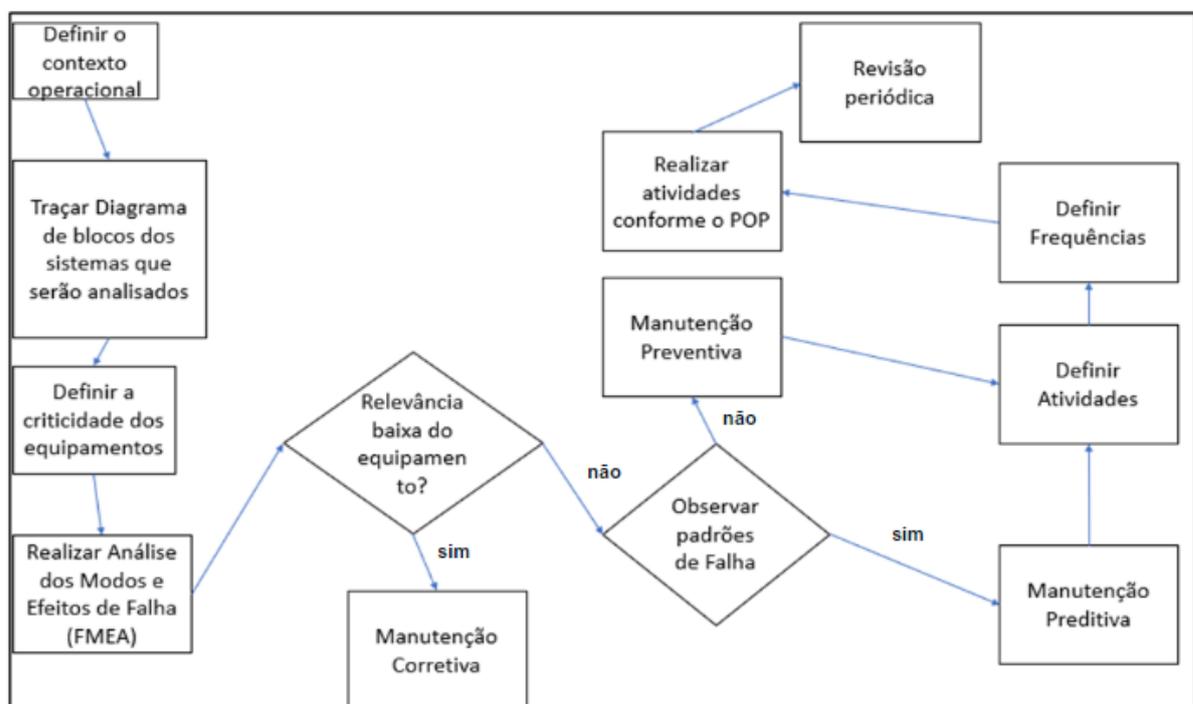
A falha na implementação do uso de um PCM leva a uma série de problemas estruturais e, de certa forma, culturais, que interferem na qualidade do trabalho e nos resultados esperados pelo empreendimento. O que se obtém desse processo, conforme explica Lamas (2021), seria:

- a) alto índice de manutenção corretiva;
- b) ausência de indicadores de manutenção;
- c) alto índice de retrabalho das atividades de manutenção;
- d) ausência de metas;
- e) manutenção preventiva e preditiva inexistente;
- f) alto custo de manutenção;
- g) equipe de manutenção sobrecarregada;

- h) falta frequente de peças de reposição e materiais para execução das manutenções;
- i) alto índice de horas extras na manutenção;
- j) desconhecimento dos índices de disponibilidade e confiabilidade de ativos.

De um modo geral, como destaca Viana (2002), a estruturação e um modelo assertivo de avaliação, garante um funcionamento mais eficiente dos equipamentos. Inspeções periódicas e bem orientadas também trazem soluções facilitadas para problemas que, sem um menor rigor metodológico de análise, podem impactar significativa e negativamente no resultado final esperado pela organização. Conforme ilustra a Figura 11, existem algumas possibilidades de planejamento que podem ser implementadas em empresas do ramo de geração de energia FV.

Figura 12 – Modelo de diagrama de planejamento de manutenção



Fonte: Adaptado de Lamas (2021).

Embora os modelos de PCM possam ser replicados para diferentes organizações nos mais variados setores, sua implementação é uma ferramenta crítica para a melhoria dos mais variados processos. Nesse sentido, é interessante pontuar que a manutenção, e mais profundamente, um PCM, pode ser benéfica no sentido de

reduzir custos relacionados aos cuidados com o funcionamento dos equipamentos, garantir segurança na operação, devido à prevenção que o modelo fornece com relação aos equipamentos, e estabelecer um sistema mais eficiente de controle.

2.4.2 Manutenção Aplicada a Sistemas Fotovoltaicos

Devido à crescente complexidade dos equipamentos e da necessidade de profissionais preparados para lidarem com os problemas em sistemas mecânicos, térmicos e elétricos, a associação entre planos de manutenção e redes de energia vem crescendo na literatura. Embora observem-se lacunas nos debates em torno de planejamento e programa de controle, a importância da manutenção está diretamente ligada ao investimento realizado e a dependência, disponibilidade e eficiência das organizações. No setor de energia, o emprego da gestão da manutenção é ainda mais essencial na garantia da qualidade do serviço e dos baixos custos operacionais a fim de garantir não apenas a performance energética, mas preços competitivos no mercado (COELHO, 2010; MELO, 2020; VIEIRA; CRISÓSTOMO, 2023).

Como destaca Nogueira (2023), a perspectiva atual do PCM é muito mais abrangente e orientada para o futuro, o que significa que dá um enfoque maior na otimização dos processos e da performance, buscando sempre a eficiência dos equipamentos e da equipe responsável. Essa abordagem vai além de uma resolução ou conserto de falhas, mas intenta descobrir a raiz desses problemas para que seja possível mitigar os efeitos causados pelas falhas.

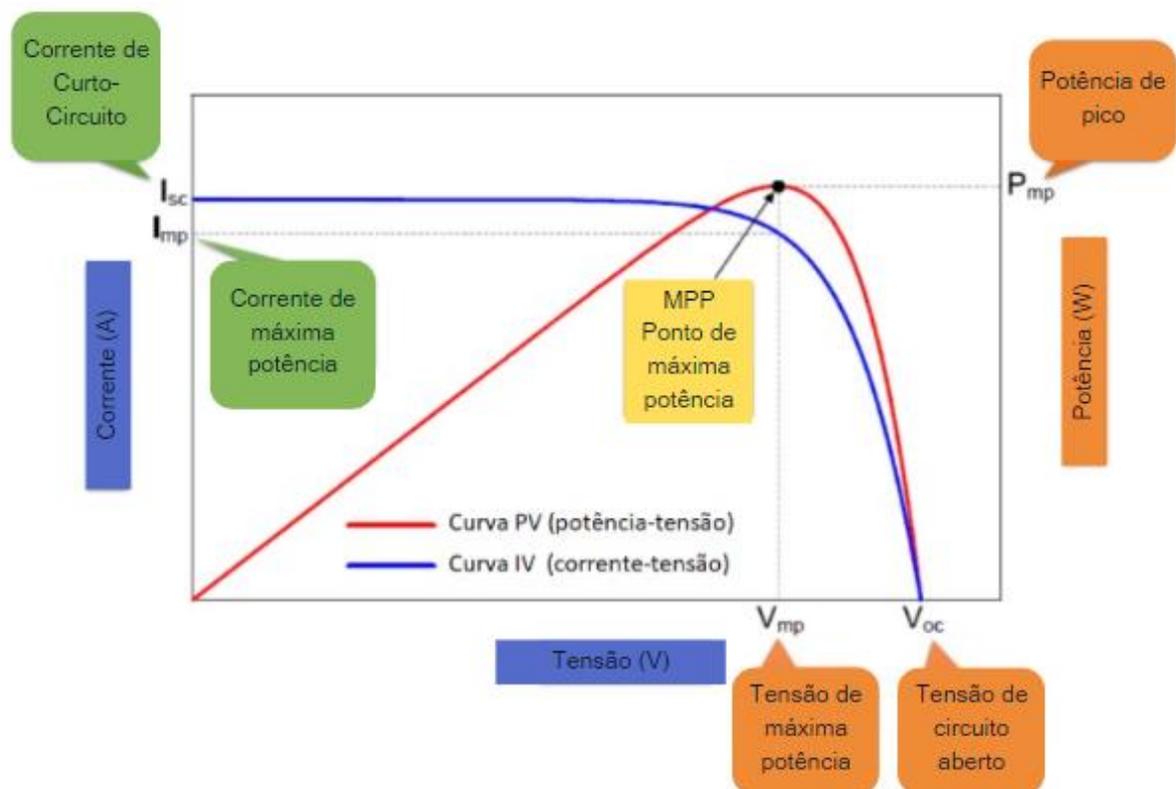
Como bem descreve o autor, “o objetivo é prevenir ocorrências futuras e evitar interrupções indesejadas nos processos produtivos” (NOGUEIRA, 2023, p. 52). A aplicabilidade dos processos de PCM em usinas fotovoltaicas são atividades de gestão que buscam garantir a operacionalidade, a integridade e a vida útil, envolvendo operações em tempo real que buscam realizar manutenção corretivas e preventivas que possam interferir na perda de produtividade (COSTA; HIRASHIMA; FERREIRA, 2021).

A NBR 5462 (ABNT-NBR, 1994) expressa que a manutenibilidade (também chamada de mantabilidade) é a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas. No âmbito industrial, a manutenibilidade é a facilidade com a qual se pode realizar a manutenção de um componente, sistema, máquina ou equipamento. Conforme a norma, essa

manutenibilidade pode ser melhorada por meio da combinação de 6 diferentes fatores, sendo eles: Procedimento, Desenvolvimento, informação, antecipação, treinamento e repetição.

Para isso, algumas técnicas podem ser empregues na inspeção dos módulos FV, que vão desde a inspeção visual até modelos mais sofisticados, como abordagens com eletroluminescência e fotoluminescência, espectroscopia, inspeção termográfica infravermelha, medições de parâmetros como a da curva J-V, I-V (que relaciona a tensão com a corrente de saída de um módulo ou conjunto de módulos), curva P-V (cuja função relaciona a potência e a tensão de saída), entre outras possibilidades (VILLALVA, 2019; COSTA; HIRASHIMA; FERREIRA, 2021). A Figura 12 ilustra o que essas medições representam.

Figura 13 – Detalhamento das curvas IV e PV



Fonte: Villalva (2019).

No caso do gráfico da Figura 12, a I_{sc} (corrente de curto-circuito) representa a corrente elétrica máxima do módulo, enquanto a V_{co} é a tensão máxima. A I_{mp} (corrente máxima de potência) representa a corrente que o módulo é capaz de fornecer quando operando em sua potência máxima, assim como a V_{mp} representa

a máxima tensão nesse mesmo estado. O pico de potência (P_{mp}) é o que indica, portanto, o pico de potência do módulo. Pode-se observar ainda o MPP (ponto máximo de potência), que indica a potência máxima do módulo em operação. Ele é encontrado no joelho da curva IV e no pico da curva PV. Esse tipo de medição pode ser realizado por meio do uso de um multímetro operando no modo amperímetro, explica Villalva (2019) e auxilia na compreensão da potência e da viabilidade de utilização de um determinado módulo.

Cada técnica empregue na elaboração de um planejamento de manutenção precisa considerar uma série de elementos, o que inclui os aspectos locais da usina, a influência do clima e seus impactos na geração fotovoltaica, além da poluição atmosférica e propensão à deposição e sujeidade, conforme indicam Costa, Hirashima e Ferreira (2021). Compreender esses fenômenos, como coloca Nogueira (2023), permite o aprimoramento contínuo dos processos de manutenção, aplicando metodologias e técnicas avançadas e inovadoras que possam potencializar os processos. Na esteira dessa análise, o autor destaca alguns indicadores que podem ser associados a um plano de PCM:

- a) Tempo Médio Entre Falhas (MTBF), que mede o tempo médio em que uma máquina ou equipamento opera até que apresente uma falha;
- b) Tempo Médio Para Reparo (MTTR), que se refere ao tempo necessário para reparar a falha apresentada ou para realização de uma manutenção corretiva (o que permite avaliar, inclusive, a eficiência da própria equipe de manutenção);
- c) Taxa de Falha, em que avalia o número de falhas que ocorrem dentro de um período determinado, expressa em unidade de tempo (falhas/hora), auxiliando na identificação de equipamentos com problema;
- d) Disponibilidade, que é um indicador-chave que mede a capacidade operacional necessária de um equipamento, permitindo avaliar a gestão de manutenção a partir da avaliação do tempo de inatividade.

Esses indicadores podem ser somados aos planos de PCM ou planejamento integrados, permitindo uma análise generalizada do sistema e identificando espaços para melhorias futuras.

3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Esse capítulo apresenta as etapas e técnicas empregadas na elaboração dessa monografia. Marconi e Lakatos (2003) caracterizam a metodologia como um conjunto de atividades sistemáticas e racionais que permitem que o pesquisador alcance os objetivos propostos pela pesquisa, usando-se de conhecimento válidos e verdadeiros, e detectando erros a partir do caminho metodológico escolhido. Desse modo, o método constitui o cerne da pesquisa e indica o rigor científico aplicado ao estudo. Delinear-se-á, portanto, o tipo de pesquisa, os procedimentos de coleta de dados, o método de análise e as limitações do estudo.

3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Do mesmo modo que o interesse de uma empresa é transformar algo por meio de materiais, equipamentos, processos, entre outros, o pesquisador também visa a transformação de um determinado elemento a partir da construção o conhecimento, análise e verificação de dados, explicam Miguel *et al.* (2012). Diante disso, a escolha da abordagem precede o método de pesquisa, já que a coerência na escolha é o que define como a pesquisa foi conduzida.

Diante disso, esse estudo tem como abordagem uma análise qualitativa, já que engloba os aspectos subjetivos do processo de PCM da empresa em análise. Como a pesquisa se insere em um contexto mais descritivo a analítico, justamente para garantir o pleno entendimento do fenômeno em análise, as variáveis coletadas para o estudo se dão por meio da pesquisa documental e da revisão de literatura (MARCONI; LAKATOS, 2005). Conforme explica Miguel *et al.*,

A construção da realidade objetiva da pesquisa ocorre pela perspectiva do pesquisador, fundamentada na revisão bibliográfica e pela realidade subjetiva dos indivíduos capturada de múltiplas fontes de evidência no ambiente natural da pesquisa. Isso não acontece na pesquisa quantitativa (MIGUEL *et al.*, 2012, p. 54).

Quanto à sua natureza, essa pesquisa pode ser caracterizada como pesquisa aplicada, segundo Kruger (2023), uma vez que ela busca abranger estudos com o intuito de resolver um problema no espaço local, regional ou territorial no qual os pesquisadores vivem. Isto é, faz uso da aplicação teórica para a resolução de um

problema prático. O modelo é adequado ao objetivo desse estudo, já que visa avaliar o PCM de uma empresa e aprimorá-lo a partir dos resultados obtidos.

Quanto aos objetivos, essa pesquisa se classifica como descritiva. A pesquisa descritiva tem por objetivo descrever os fatos e/ou fenômenos de uma determinada realidade, identificando, de modo preciso, aquilo que foi observado. O investigador realiza um exame crítico dessa realidade, aplicando técnicas de coleta de dados que podem ser objetivas e/ou quantificáveis (YIN, 2001). Tendo como base essa conceituação, a pesquisa descritiva se adequa ao estudo porque visa relatar, de forma mais precisa, as características, os eventos e as metodologias empregadas, estabelecendo quais variáveis podem interferir nos processos de PCM já empregues.

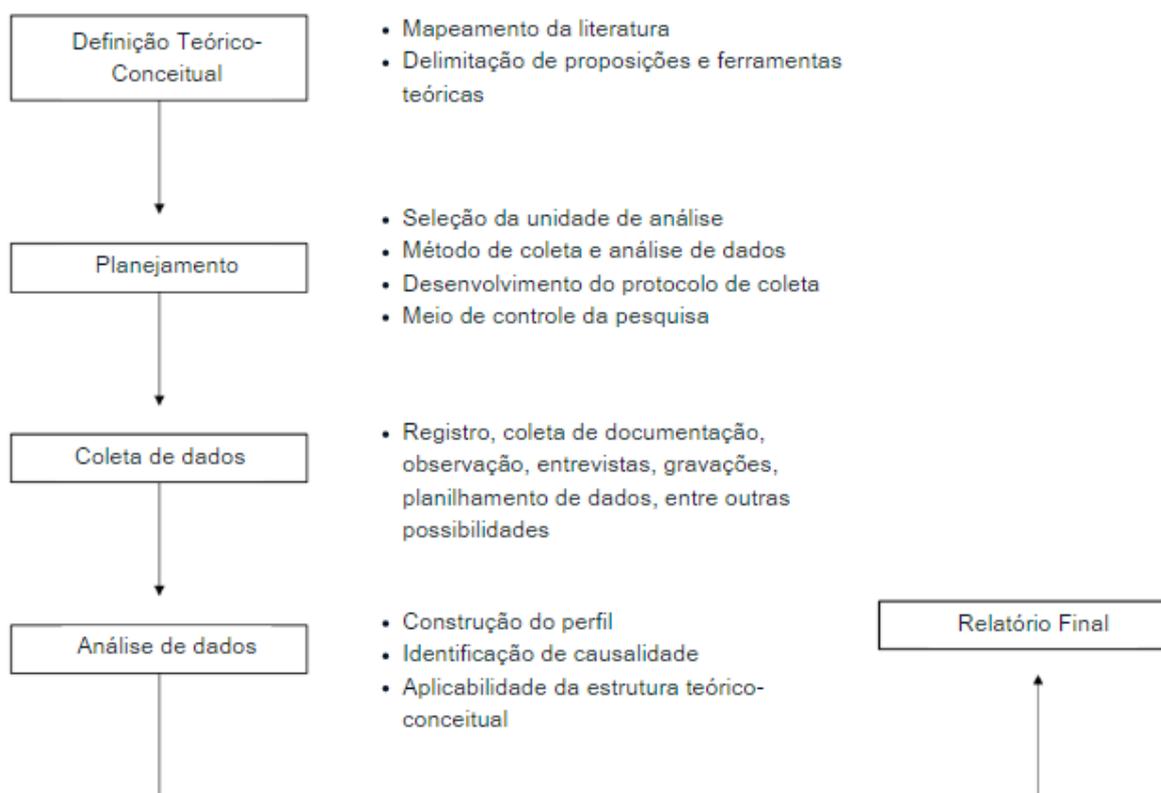
Quanto aos procedimentos metodológicos aplicados no estudo, optou-se pelo uso do estudo de caso. Conforme explicam Gerhardt e Silveira (2009), o estudo de caso se propõe a investigar de maneira aprofundada um fenômeno e/ou problema dentro do contexto no qual ele se insere, fazendo uso de uma série de fontes e evidências: documentos, entrevistas, arquivos, observação, entre outros. As autoras ressaltam também que este é um procedimento típico da pesquisa qualitativa e muito associada às pesquisas descritivas, podendo fazer uso de dados quantitativos estatísticos em determinados casos, justamente porque seu principal intuito é o enfoque em um indivíduo, em uma instituição ou em um evento determinado.

Expostas essas considerações, as seções seguintes apresentam os pormenores da coleta de dados, da análise e dos procedimentos que servem para o mapeamento das atividades realizadas na empresa sob análise para elaboração do PCM.

3.2 MÉTODO DE PESQUISA

Tendo os pressupostos básicos que delineiam a pesquisa, faz-se necessário estabelecer a metodologia para a elaboração do presente estudo, conforme ilustra a Figura 13. De acordo com Miguel *et al.* (2012), o estudo se organiza em cinco passos, que consistem em uma estruturação específica em cada um desses passos.

Figura 14 – Metodologia para o PCM de uma usina fotovoltaica



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A parte de construção teórico conceitual corresponde ao descrito no Capítulo 2. O planejamento consiste no processo de seleção da unidade de análise, estrutura de coleta e análise de dados e a forma como esses dados são trabalhados. No próximo capítulo, a metodologia aqui descrita é aplicada em uma usina FV, tendo como base o modelo de Planejamento e Controle de Manutenção (PCM) elaborado pela empresa.

A coleta dos dados, como evidenciado por Marconi e Lakatos (2003), pode ser obtida por meio de três métodos: pesquisa documental, bibliográfica e por contato direto. O uso de fontes primárias nesse estudo se destaca, tendo em vista a conexão do autor com a empresa estudada. O suporte bibliográfico serve como ferramenta para conduzir a discussão e avaliação do projeto aqui proposto. A análise fará uso de métodos de planejamento de manutenção, em que se obtêm dados de saída, gráficos e tabelas de como a usina performou, possibilitando a avaliação o modelo de PCM atualmente utilizado. Estabelecer o caminho a ser seguido para coleta e análise de dados, como explica Gil (2002), permite explorar com mais profundidade a temática e aproximar-se mais das respostas para os objetivos que o pesquisador possui.

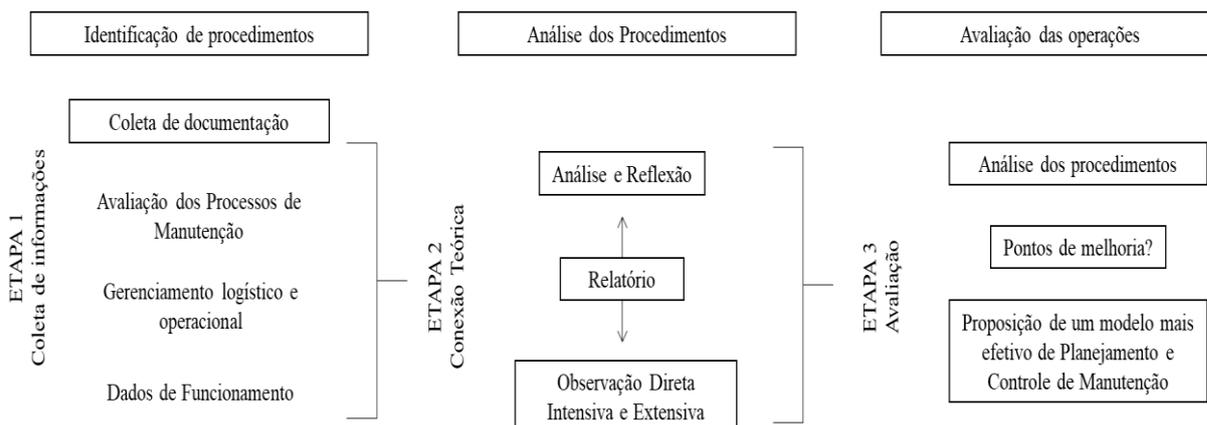
3.3 UNIVERSO DA PESQUISA

O universo da pesquisa se concentrou em uma planta solar localizada na região centro-oeste do Brasil, porque a usina em questão foi a mais avaliada na época, pois teria instalada a lavagem robotizada, porém na data desta pesquisa isso não ocorreu. A empresa responsável pela planta solar conta com outras usinas distribuídas pelo Brasil, que fornecem energia para empresas localizadas no Sul, Sudeste e Nordeste. O intuito é a avaliação dos procedimentos de controle e manutenção empregues pela empresa.

3.4 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

A coleta e análise de dados ocorreu ao longo do período de junho de 2023 a setembro de 2023, realizada por meio de observação direta, coleta de dados locais e análise dos procedimentos do fluxo de gestão da manutenção. Ferramentas de *software* como Excel e Power BI, bem como o site do fornecedor dos inversores da usina, foram empregues para coleta dos dados da performance da usina 24 horas por dia, sete dias por semana. O método de coleta de dados consiste em 3 etapas: 1 – coletar as informações; 2 – estabelecer conexão com o material teórico utilizado para suporte e 3 – avaliar os procedimentos empregues pela empresa, identificando a necessidade de melhorias ou não. As etapas são descritas logo a seguir e podem ser mais bem visualizadas na Figura 14.

Figura 15 – Etapas de desenvolvimento do estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Etapa 1 contempla o processo de coleta de dados para caracterização da planta e dos procedimentos de Controle e Manutenção atualmente empregues pela empresa. A Etapa 2 ocorre por meio da observação, análise de relatórios, reflexão dos dados documentais e da observação direta intensiva e extensiva, ou seja, a observação direta intensiva se dá pelo uso da observação e/ou entrevistas, e a observação direta extensiva se utiliza de observação e/ou emprego de questionário, conforme explicam Moraes e Fonseca (2017).

As duas etapas ajudam a coletar o maior número de informações possíveis e, utilizadas em conjunto, garantem que os dados coletados possam ser comparados e analisados a fim de identificar possíveis falhas em um processo de gestão. Podem ser aplicadas de forma informal, por meio da conversa com responsáveis e posterior elaboração de relatório analítico.

A Etapa 3 consiste na avaliação dos processos empregues pela empresa. Os dados coletados são analisados, visando compreender se o planejamento e controle de manutenção da empresa pode ser aprimorado para apresentar uma estrutura mais assertiva.

Os dados coletados são sistematizados em planilhas no *Microsoft Excel*, categorizados nos processos de PCM observados na literatura e comparados com os utilizados pela usina em estudo. Os resultados são a base para a classificação dos processos de gerenciamento e, na avaliação de falhas, elabora-se uma proposta de um modelo mais efetivo de PCM, considerando algumas ferramentas que podem

auxiliar na identificação de elementos importantes para a sobrevivência dos equipamentos.

3.5 LIMITAÇÕES DO MÉTODO

A pesquisa apresenta algumas limitações quanto à coleta de dados, considerando que é uma empresa com atuação recente no mercado e com dados ainda em construção. Os relatórios disponíveis também são limitados, tendo em vista que apresentam informações críticas para o estabelecimento. No que tange ao método, a análise e comparação pode ser limitada pela falta de dados, especialmente pelo pouco contato direto com os funcionários que atuam na planta solar.

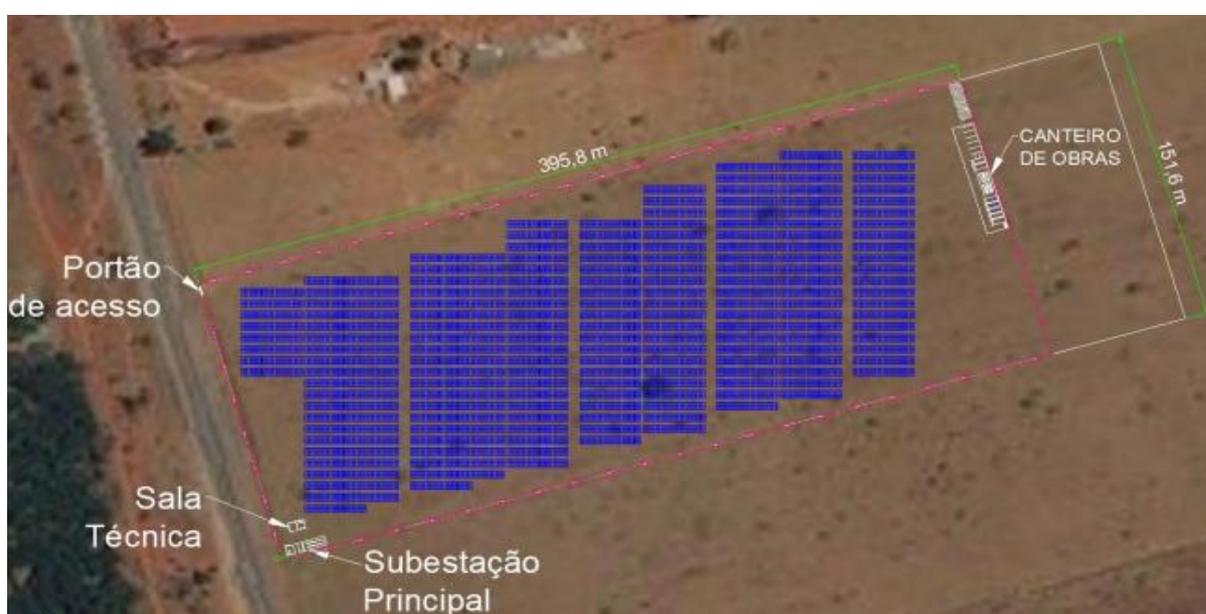
4 ESTUDO DE CASO

Esse capítulo apresenta a caracterização da empresa estudada, bem como o modelo de Planejamento e Controle de Manutenção (PCM) elaborado pela empresa ao longo do ano de 2023. São abordados os procedimentos de manutenção em um âmbito descritivo, buscando identificar os principais elementos que regem a atuação do sistema de PCM utilizado na usina. A análise busca averiguar o PCM aplicado pelo empreendimento e se ele englobou e evitou os problemas observados no setor de manutenção da usina.

4.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

A empresa analisada possui plantas solares em operação em 8 estados brasileiros, sendo 4 usinas atuando na faixa de potência de 5 a 10 MWp, 9 usinas atuando na faixa de 3 a 5 MWp, 8 usinas atuando na faixa de 1 a 3 MWp e 12 usinas que operam na faixa de potência de 0 a 1 MWp. A planta analisada nesse estudo está localizada na região centro-oeste do Brasil. A planta de localização da usina pode ser observada na Figura 15.

Figura 16 – Planta de localização da usina sob análise



Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Os principais dados que caracterizam a usina FV em análise podem ser observados na Figura 16, que apresenta o tipo de estrutura, o número de módulos por potência unitária (note que foram utilizados módulos de duas potências, 325 Wp e 330 Wp, que, no entanto, não utilizam a mesma *string*, conforme explica Souza (2019), tendo em vista que deve se considerar a diferença de vida útil e de desempenho de cada módulo ao longo de sua utilização).

Figura 17 – Caracterização da usina FV analisada

Potência nominal de módulos instalados	3.904 kWp
Potência nominal de Inversores instalados	3.125 kW
Tipo de estrutura	Fixa
N° de módulos / Pot. unitária	3.240 / 325 Wp 8.640 / 330 Wp
Número de Inversores / Potência unitária	25 / 125 kW
Orientação dos módulos	0° Norte
Inclinação	14°
Distância entre fileiras	6,00 m
Área total do terreno	70.784 m ²

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

A usina FV apresenta uma potência pico total de 3.904 kWp DC e 3.125 kW de potência AC. A tecnologia empregue nos módulos utilizados pela empresa é o silício policristalino. O dimensionamento do sistema FV completo empregue no empreendimento, pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Dimensionamento do sistema FV utilizado na usina

TAG do Inversor	Potência do Módulo	Quantidade de módulos por string	Quantidade de strings	Quantidade de módulos	Potência total DC (kWp)	Potência AC (kW)
1.1	325	30	16	480	156	125
1.2	325	30	15	450	146,25	125
1.3	325	30	15	450	146,25	125
1.4	325	30	16	480	156	125
1.5	325	30	16	480	156	125
1.6	325	30	15	450	146,25	125
1.7	325	30	15	450	146,25	125
1.8	330	30	16	480	158,4	125
1.9	330	30	16	480	158,4	125
1.10	330	30	16	480	158,4	125
1.11	330	30	16	480	158,4	125
1.12	330	30	16	480	158,4	125
1.13	330	30	16	480	158,4	125
2.1	330	30	16	480	158,4	125
2.2	330	30	16	480	158,4	125
2.3	330	30	16	480	158,4	125
2.4	330	30	16	480	158,4	125
2.5	330	30	16	480	158,4	125
2.6	330	30	16	480	158,4	125
2.7	330	30	16	480	158,4	125
2.8	330	30	16	480	158,4	125
2.9	330	30	16	480	158,4	125
2.10	330	30	16	480	158,4	125
2.11	330	30	16	480	158,4	125
2.12	330	30	16	480	158,4	125
Total					3904,2	3125

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

A usina é completamente administrada pela empresa, incluindo, entre outros processos, a construção, o planejamento, a elaboração dos planos de obra, marketing e organização, a captação e cliente e a execução final os relatórios de geração de energia. Isso implica que o projeto de PCM também é desenvolvido pelo próprio empreendimento. Com relação aos equipamentos utilizados, o Quadro 2 apresenta características técnicas do módulo FV de 325 Wp.

Quadro 2 – Dimensionamento do sistema FV 325 Wp utilizado na usina

Módulos FV		Outras Características	
Fabricante	Canadian	Temperatura de Operação	-40°C ~ +85 °C
Modelo	CS3U – 325P	Class. Máx. Fusível em série	15 A
Tecnologia	Silício policristalino	Tolerância de Potência	0 ~ + 5 W
Características Elétricas		Características Mecânicas	
Potência Pico Nominal	325 Wp	Altura	1960 mm
Tensão em Circuito Aberto (Voc)	45,5 V	Largura	992 mm
Corrente em Curto Circuito (Isc)	9,34 A	Profundidade	40 mm
Tensão em máxima Potência (Vmpp)	37,0 V	Peso	22,4 kg
Corrente em máxima Potência (Impp)	8,78 A	Tampa dianteira	Vidro temperado de 3,2 mm
Coeficiente de temperatura		Material da Estrutura	Alumínio Anodizado
Potência Pico	-0,41% / °C	Cabo	4 mm ²
Tensão em Circuito Aberto (Voc)	-0,31% / °C	Tipo de célula	Policristalino
Corrente em Curto Circuito (Isc)	0,053% / °C	Organização das células	72 (6 x 12)

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

O Quadro 3 apresenta as características técnicas de um módulo FV 330 wp.

Quadro 3 – Dimensionamento do sistema FV 330 Wp utilizado na usina

Módulo FV		Outras Características	
Fabricante	Canadian	Temperatura de Operação	-40°C ~ +85 °C
Modelo	CS3U – 325P	Class. Máx. Fusível em série	15 A
Tecnologia	Silício policristalino	Tolerância de Potência	0 ~ + 5 W
Características Elétricas		Características Mecânicas	
Potência Pico Nominal	330 Wp	Altura	1960 mm
Tensão em Circuito Aberto (Voc)	45,6 V	Largura	992 mm
Corrente em Curto Circuito (Isc)	9,45 A	Profundidade	40 mm
Tensão em máxima Potência (Vmpp)	37,2 V	Peso	22,4 kg
Corrente em máxima Potência (Impp)	8,88 A	Tampa dianteira	Vidro temperado de 3,2 mm
Coeficiente de Temperatura		Material da Estrutura	Alumínio Anodizado
Potência Pico	-0,41% / °C	Cabo	4 mm ²
Tensão em Circuito Aberto (Voc)	-0,31% / °C	Tipo de célula	Policristalino
Corrente em Curto Circuito (Isc)	0,053% / °C	Organização das células	72 (6 x 12)

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

O projeto também trabalha com inversores modelo SG125HV e a *combiner box* modelo PVS-16M-HV. Os inversores empregues no projeto possuem sistemas de proteção necessários para conexão à rede, como anti-ilhamento, sobretensão de fase, proteção de sub e sobrefrequências, proteção de sobrecorrente, proteção contra curto-circuito AC, monitoramento de resistência de isolamento à terra, monitoramento da tensão de rede e da frequência de rede, entre outras características essenciais.

Ele se ajusta automaticamente aos valores de tensão e frequência nominais da rede de distribuição após a correta parametrização. Essas características podem ser observadas na Figura 17.

Figura 18 – Detalhamento do funcionamento dos inversores

Tensão no ponto de conexão	Comportamento do Inversor
$V < 80\%$	Desconexão em até 0,4 segundos
$80\% < V_{nominal} < 110\%$	Funcionamento Normal
$V_{nominal} > 110\%$	Desconexão em 0,2 segundos

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Faz-se uso, ainda de dois transformadores de proteção, sendo o primeiro Transformador de Potencial 13,8 kV de tensão máxima, com frequência nominal de 60 Hz e frequência industrial de 95 Hz. O segundo é um Transformador de Corrente com tensão máxima de 15 kV, frequência nominal de 60 Hz e frequência industrial de 34/95 Hz. O transformador de potência apresenta uma potência de 2000 kVA e tensão primária de 600 V. A usina conta com conjuntos de para-raios instalados ao lado da entrada da subestação, disjuntores MT do tipo tripolar a vácuo, de uso interno no comando frontal com dispositivo de abertura mecânica e eletricamente livre, assim como chaves seccionadoras tripolar, de uso interno, comando simultâneo, acionamento manual através de alavanca de manobra, corrente nominal de 200 A, classe de tensão 15 kV e tensão suportável de impulso de 95 kV.

O modelo utilizado pela empresa segue às recomendações impostas pelas normativas brasileiras:

- I. NBR 16690:2019 - Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos – requisitos de Projeto;
- II. NBR 16274:2014 – Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho;
- III. NBR 16149:2013 – Sistemas Fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição;
- IV. NBR 5410:2004 – Instalações elétricas de baixa tensão;

- V. NBR 5419:2015 – Proteção contra descargas atmosféricas;
- VI. NBR 14.039 – Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV;
- VII. NBR 15749:2009 Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento;
- VIII. NBR 15751:2013 Sistemas de aterramento de subestações – Requisitos;
- IX. NBR 16612 – Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados com cobertura, para tensão de até 1,8 kV c.c;
- X. NBR 7287 – Cabos de potência com isolação sólida extrudada de polietileno reticulado (XLPE) para tensões de isolamento de 1 kV a 35 kV.

Foram essas características que orientaram o modelo de PCM empregue na empresa.

4.2 ANÁLISE SITUACIONAL DO PCM DA USINA FOTOVOLTAICA

A empresa analisada conta com um responsável pelo planejamento, execução e monitoramento das atividades necessárias para a continuidade das atividades em relação ao setor de manutenção. O modelo de manutenção empregue na planta solar sob análise, faz uso de 4 níveis de manutenção, estruturados por período e considerando as necessidades observadas, conforme ilustra a Figura 18. Em cada nível, são realizadas diferentes atividades, somadas a novas ações a cada ampliação de período.

Figura 19 – Detalhamento do funcionamento do plano de manutenção por níveis

Nível 1 - Mensal	Nível 2 - Trimestral	Nível 3 - Semestral	Nível 4 - Anual
Termografia Inversores (qtd)	Termografia Inversores (qtd)	Termografia Inversores (qtd)	Termografia Inversores (qtd)
Termografia Combiner (qtd)	Termografia Combiner (qtd)	Termografia Combiner (qtd)	Termografia Combiner (qtd)
Termografia TR (qtd)	Termografia TR (qtd)	Termografia TR (qtd)	Termografia TR (qtd)
Termografia Eletrocentro (qtd)	Termografia Eletrocentro (qtd)	Termografia Eletrocentro (qtd)	Termografia Eletrocentro (qtd)
	<div style="border: 1px dashed black; padding: 2px;"> Medição (MWp/dia) Lavagem Módulos (qtd) </div>	<div style="border: 1px dashed black; padding: 2px;"> Termografia Módulos (qtd) Vegetação (ha)- Poda Reaperto (MWp/dia) </div>	<div style="border: 1px dashed black; padding: 2px;"> Curva IxV (MWp/dia) </div>

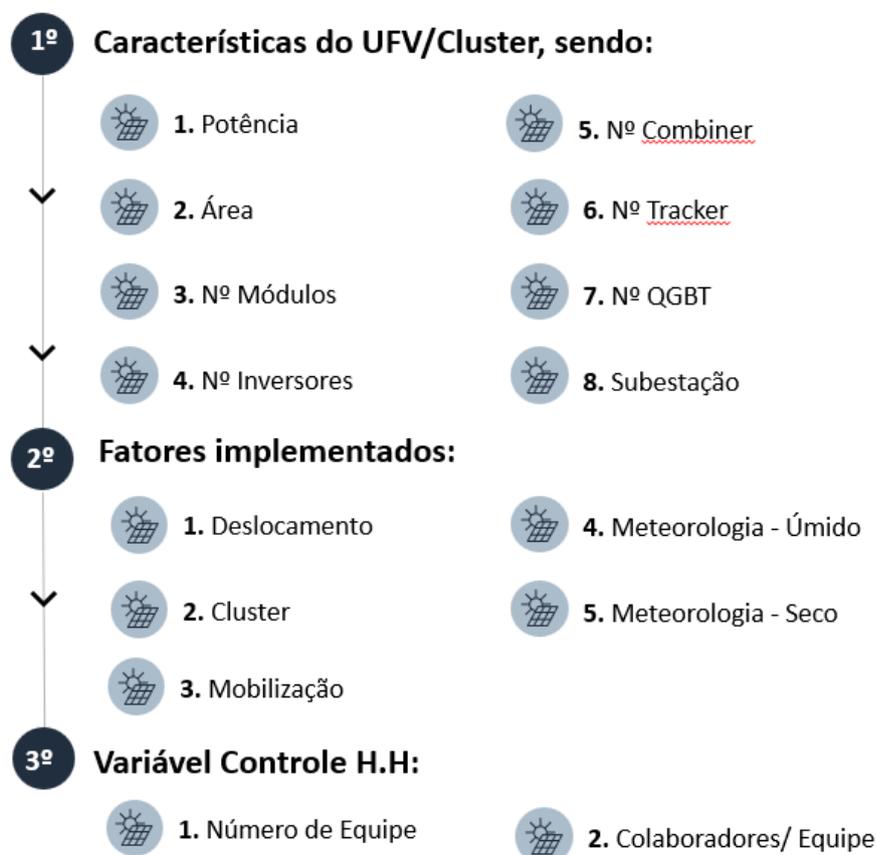
Fonte: Dados da pesquisa (2023).

No Nível 1, são realizadas as termografias de todos os ambientes, buscando identificar a existência de pontos quentes por baixo isolamento, por exemplo, que possam exigir algum nível de manutenção, procedimento esse que é realizado mensalmente. No Nível 2, procedimento de manutenção que ocorre trimestralmente, trabalha-se com a termografia e medição somadas à lavagem dos módulos, isto é, a limpeza dos painéis para garantir o menor nível e sujidade. O Nível 3 envolve todas as atividades anteriores, somada à roçagem e ao reaperto. Isso significa que toda a grama localizada na usina é cortada, removendo-se qualquer material que possa interferir no funcionamento do sistema. Nesse nível, a limpeza dos painéis ocorre após a roçagem do terreno. A atividade é realizada semestralmente, de acordo com o plano de manutenção empregado na planta solar. No Nível 4, que apresenta atividades realizadas anualmente pelo setor de manutenção, segue-se realizando todas as atividades dos níveis anteriores, somando-se a este a análise da Curva *IV* e *PV* para indicar se há efeito de sombreamento na usina ou *mismatch*, isto é, o descompasso entre os módulos conectados em uma *string* ou em paralelo devido a fatores intrínsecos ou extrínsecos do sistema FV (ARAÚJO, 2020).

Alguns autores, como Araújo (2020), sugerem que o *mismatch* pode apresentar duas variações: o de fabricação, que envolve a diferença de potência entre módulos FV de um mesmo modelo ou lote, que podem levar a valores eventuais entre 5 e 7%; e de operação, que é a intensificação do *mismatch* de fabricação por causa de fatores

ambientais, como a exposição do módulo à poeira, vento, chuva, calor excessivo, entre outros elementos. A análise da Curva *IV* e *PV* permite identificar esses problemas e estabelecer um plano de ações. Consideraram-se fatores de impacto na análise da manutenção: o cluster, o deslocamento, a mobilização e a dimensão. O modelo metodológico de coleta de dados observados pelo projeto de manutenção empregue atualmente na empresa funciona em 3 estágios: o primeiro considera as características da planta, o segundo considera os fatores implementados na avaliação das manutenções de acordo com o calendário (Níveis 1, 2, 3 e 4), e o terceiro considera a variável de controle, como mostra a Figura 19.

Figura 20 – Variáveis observadas no estabelecimento do modelo inicial de manutenção



Fonte: Dados da pesquisa (2023).

A partir desses dados é possível obter o cálculo dos dias em cada manutenção (Nível) foi elaborado (Equação 2) e, assim, o fator de trabalho de equipe (Equação 3).

$$\frac{Nível}{Dias} = Característica UFV + Fatores + Variável H.H \quad (2)$$

$$Fator de Trabalho = \sum_{i=1}^4 Nível_i + Manutenção Extras \quad (3)$$

Os dados obtidos da usina em avaliação são, portanto, os dados da Figura 20.

Figura 21 – Caracterização da usina fotovoltaica na região Centro-Oeste

Características da UFV/Cluster

Usina	Potência [MWp]	Área[ha]	Nº Módulos	Nº Inversores	Nº Combiner	Nº Tracker	QGBT	Subestação	Irrigação
	3,90	7,0784	3240/325 Wp 8640/330 Wp 11880	25	25	0	1	1	NÃO

Fatores implementados:

Fator Deslocamento		
Ralo (km)	Fator	Dias
0 - 50	0,02	5
50 - 100	0,03	7,5
100 - 200	0,05	12,5

Fator Cluster		
Nº UFVs	Fator	Dias
1	0,01	2,5
2	0,015	3,75
3	0,02	5
4	0,025	6,25
5	0,03	7,5
6	0,035	8,75
7	0,04	10
8	0,045	11,25

Fator Mobilização		
Níveis	Fator	Dias
Nível 1	0	0
Nível 2	0,008	2
Nível 3	0,012	3
Nível 4	0,012	3

Fator Meteorologia		
Clima	Fator	Dias
Úmido	0,06	15
Seco	0,02	5

Variável Controle H.H:

Número Equipe	Colaboradores/Equipe
Equipe 1	2

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

A aplicação do modelo matemático, somado à inclusão dos fatores, sendo eles, fator deslocamento, que é o tempo percorrido pelos colaboradores até chegar na usina; fator cluster, usado quando tem-se mais de uma usina na região; fator mobilização, sendo o fator de tempo despendido pelos colaboradores para preparar o material para o nível de manutenção previsto, como, por exemplo, equipamentos de lavagem, roçagem e medidores; e, por último, o fator meteorológico que foi dividido em seco e úmido, pois sabe-se que em estações chuvosas o trabalho ao ar livre é prejudicado, havendo um maior tempo para as manutenções. O início das atividades é calculado para ser sempre no início da semana, visando reduzir o tempo do fator deslocamento e do fator mobilização que aumenta devido aos feriados e finais de semana e, ainda por este motivo, no calendário os dias totais consideram essas situações. A estrutura, portanto, resulta nos dados das Figuras 21 e 22.

Figura 22 – Aplicação do modelo para avaliação do período

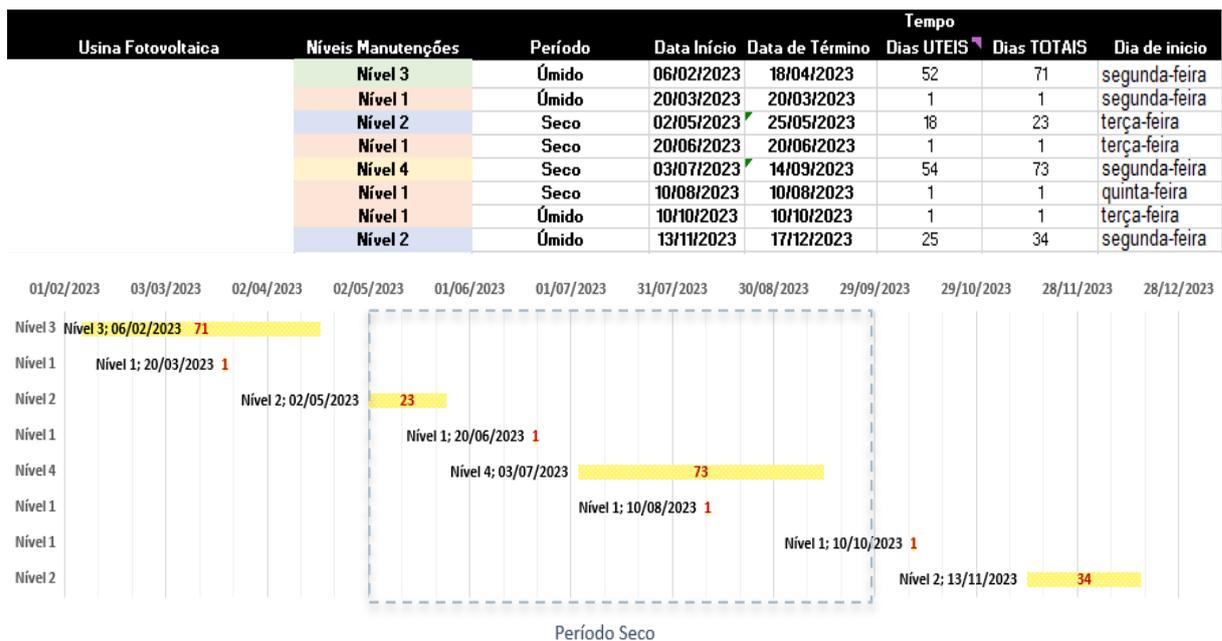
Níveis	Aplicação Modelo (Dias) Seco	Aplicação Modelo (Dias) Úmido	Acrescentar os Fatores - Seco	Acrescentar os Fatores - Úmido
Nível 1	1			
Nível 2	13,24	15,64	$13,24+(5/4)+(2,5/4)+(5/2)=18$	$15,64+(5/4)+(2,5/4)+(15/2)=25$
Nível 3		42,34		$42,34+(5/4)+(2,5/4)+(15/2)=52$
Nível 4	49,32		$49,32+(5/4)+(2,5/4)+(5/2)=54$	

$\text{Modelo Nível} + (\text{Fator Desl./Níveis}) + (\text{Fator Cluster/ Níveis}) + \text{Met. Sec./Períodos} = \text{Dias Úteis}$

 $\text{Modelo Nível} + (\text{Fator Desl./Níveis}) + (\text{Fator Cluster/ Níveis}) + \text{Met. Úm./Períodos} = \text{Dias Úteis}$

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Figura 23 – Aplicação do modelo no calendário de manutenção



Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Além desses procedimentos, trabalha-se com a realização e vistorias diárias, que possam gerenciar os problemas *in loco* e realizar a manutenção corretiva em caso de eventual falha. Nesse processo, estabeleceu-se, ainda em estágio de desenvolvimento inicial, a realização do planilhamento das falhas apresentadas pelos inversores utilizados. O modelo é empregue em todas as plantas solares gerenciadas, isso inclui a usina sob análise. Atualmente, o planilhamento destaca o número de inversores que apresentaram falhas, o tempo que cada inversor leva para ser consertado, o tempo de parada, o tempo do retorno do inversor, buscando compreender detalhadamente esse processo. A análise ocorre *in loco* e, em caso de impossibilidade da detecção da falha, realiza-se a análise remota através do fornecedor. O projeto teve início com os inversores devido à criticidade desse material para o funcionamento da planta solar.

Essas informações permitem caracterizar o modelo de manutenção utilizado pela empresa, informando como elas ocorrem ao longo do ano, em qual período apresentam maior incidência e como se pode identificar os efeitos de diferentes tipos de fatores sobre o processo de manutenção. Esses dados garantem que a usina atue de acordo com o modelo de planejamento utilizado ao longo do ano de 2023. O atual plano de manutenção da empresa atua com um modelo preditivo de controle, o que significa que a predeterminação dos períodos para cada nível se deve a uma prévia avaliação os problemas observados na planta solar. O modelo preventivo aplicado pela empresa leva em consideração o tempo de durabilidade de cada material, orientado de acordo com o modo preditivo, de modo que todos os procedimentos possam ser realizados em conjunto. Em alguns casos, observa-se o uso de manutenção corretiva, com ordens de serviço emitidas pelos próprios funcionários a partir de observação local. Não foi possível observar o emprego de nenhum outro método de controle

4.3 PROPOSIÇÃO DE MODELO DE PCM

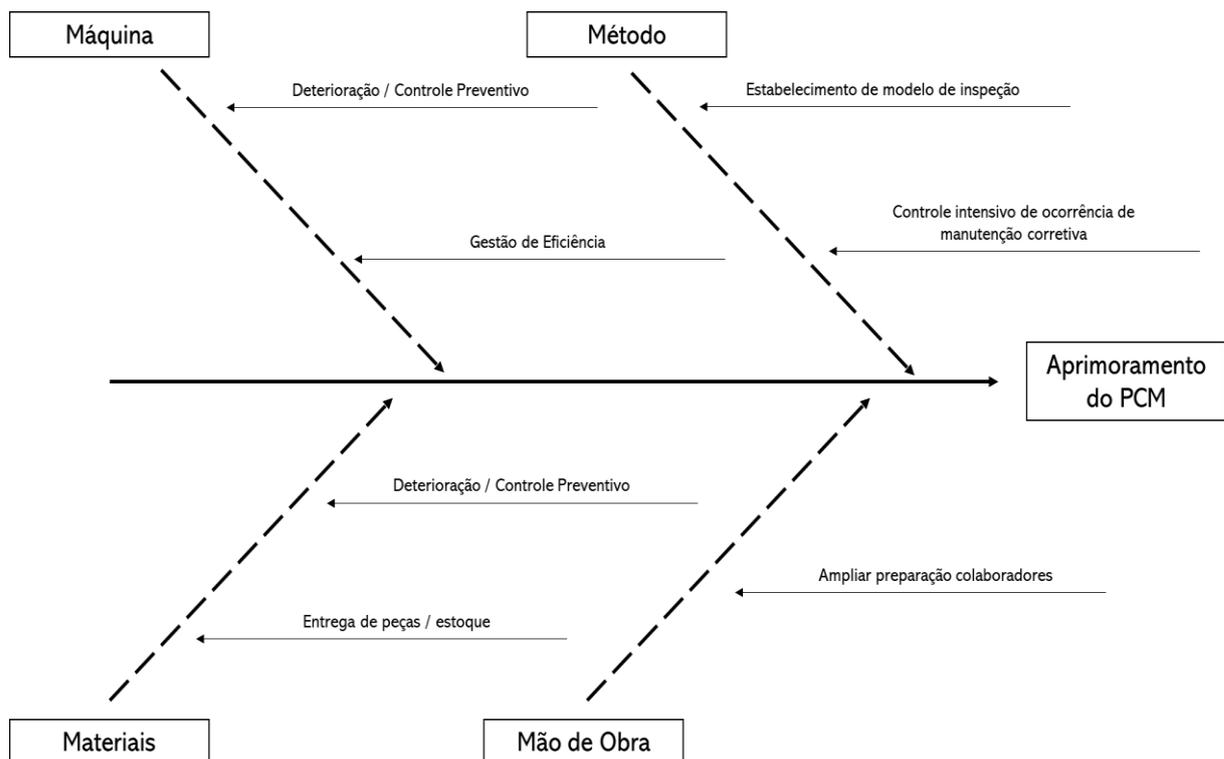
A primeira etapa de elaboração do modelo de PCM é o uso da ferramenta FMEA. O uso do FMEA permite identificar potenciais falhas no processo e, portanto, garante que seja possível responder mais efetivamente aos problemas que podem surgir durante o processo de controle e manutenção. Os modelos de FMEA costumam abranger, de forma geral, modos de falha potenciais que podem surgir com o tempo e o desgaste dos materiais (FERREIRA *et al.*, 2022). Para que essas melhorias pudessem ser implementadas, realizaram-se observações ao longo do ano de 2023, identificando o funcionamento, o tamanho da equipe, os níveis de manutenção, seu período de realização e as lacunas identificadas nesses processos.

Embora o modelo atualmente empregado na usina funcione, é possível aprimorar esse processo a partir da implementação e ferramentas de gestão e controle que solicitem informações mais precisas e permitam a geração e relatórios mais detalhados. Como a empresa possui plantas solares em diferentes regiões, com características físicas e meteorológicas que precisam ser consideradas na elaboração de um PCM, esse modelo pode ser utilizado como base no futuro para a avaliação e, se necessário, o aprimoramento de outros processos de manutenção.

Para essa análise, propôs-se uma avaliação de métodos de implementação de PCM disponíveis na literatura. A seleção dos dados resultou em algumas técnicas e ferramentas que permitem a identificação de problemas: o PDCA que, embora seja uma metodologia de gerenciamento, pode ser adaptado para qualquer percurso que exija melhorias; o FMEA como uma metodologia de análise de falhas, técnica sistemática e que apresenta um processo inicial de implementação mais complexo, mas que garante um modelo permanente de revisão; 5W2H como ferramenta de composição do plano de ação, pelos questionamentos certos e facilidade de identificação de demanda; e o Diagrama de Ishikawa, também conhecido como causa e efeito, que serviu de base para a elaboração do 5W2H e PDCA.

Para a elaboração desse PCM, não foram utilizados *softwares* sofisticados para implementação e melhorias, tendo em vista que essa etapa foi apenas de avaliação e elaboração. A meta, nesse sentido, era o desenvolvimento de um modelo de PCM de baixo custo, que pudesse ser facilmente replicado e que atendesse às demandas observadas durante o período de coleta de dados. Nesse sentido, a base da identificação dos problemas pode ser observada na Figura 23.

Figura 24 – Diagrama de Ishikawa aplicado ao projeto de PCM



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Observaram-se alguns elementos, subdivididos em quatro categorias (Método, Mão de Obra, Máquina e Materiais), que podem ser aprimorados com um PCM ajustado aos interesses da usina FV. Embora a equipe conte com 2 colaboradores, a possibilidade de ampliação da preparação não é necessariamente um problema, mas é um apontamento frequentemente realizado por trabalhos que envolvem a análise do PCM (COSTA; HIRASHIMA; FERREIRA, 2020). Isso significa identificar as dificuldades ou lacunas de conhecimento que possam ser apresentadas por esses colaboradores e proporcionar as ferramentas necessárias para construção do aporte teórico-prático. Com relação ao método, identifica-se que a empresa já possui um controle concreto dos processos de manutenção, mas a sugestão é que esse modelo seja aprofundado para a elaboração de Relatórios do Time de Campo para geração de um sistema de *smart operation*, isto é, um *software* de tratamento descentralizado de dados que permite controle em ambientes em que se torna difícil o emprego de equipes muito grandes de manutenção (FLUENCE CORP., 2023).

Os elementos Materiais e Máquina se sobrepõem, nesse sentido, porque existe uma relação bastante intensa de dependência. Embora não se tenha um ambiente de produção como os observados em indústrias de manufatura, o gerenciamento dos materiais precisa atender a um modelo de eficiência que possa garantir a presença de peças importantes com a maior agilidade possível na usina FV. A empresa trabalha com um gerenciamento do tempo de troca dos materiais, mas a implementação de um sistema de avaliação da criticidade dos componentes dos módulos e, em alguma medida, um estoque que permita o rápido acesso a peças importantes na manutenção corretiva, foram condições que puderam ser observadas ao longo da coleta dos dados.

Tendo em mãos esses elementos, foi possível elaborar o gerenciamento dos recursos e das ações que orientaram o a análise do ambiente interno da usina. Sabendo que existia a necessidade de remodelar algumas atividades e repensar certas ações desenvolvidas no processo de manutenção empregue na empresa, o PDCA considerou o planejamento a partir da avaliação do histórico do empreendimento. Entende-se que a usina está localizada em um ambiente com clima seco e úmido a depender da estação do ano na qual se encontra, conforme indicam os valores dispostos na Figura 24, que serviu como base para a divisão dos períodos (seco e úmido) da Figura 22. Note que a umidade é relativamente alta a cada início e final de ano, condição que interfere nos processos de manutenção porque causam impacto na durabilidade do material utilizado, como explicam Lamas (2021) e Alves

Filho (2023), ao destacarem o impacto da poeira, da água, do vento e da vegetação nas plantas solares.

Figura 25 – Clima proeminente na região de atividade da usina fotovoltaica

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Temperatura média (°C)	21,8	21,8	21,6	21,4	20,8	20,1	20	21,6	23,6	23,7	21,8	21,7
Temperatura mínima (°C)	18,4	18,3	18,1	17,5	16,2	15,1	14,7	16,1	18,3	19	18,4	18,4
Temperatura máxima (°C)	26,1	26,2	26	26,1	25,9	25,4	25,5	27,4	28,3	28,9	28,2	28
Chuva (mm)	227	205	217	101	28	5	2	7	39	127	237	280
Umidade(%)	77%	76%	78%	72%	62%	55%	48%	41%	42%	55%	75%	77%
Dias chuvosos (d)	16	15	16	10	3	1	0	1	4	11	17	17
Horas de sol (h)	8,8	8,8	8,1	8,8	9,0	9,4	9,7	10,3	10,4	9,9	8,7	8,8

Data: 1991 - 2021 Temperatura mínima (°C), Temperatura máxima (°C), Chuva (mm), Umidade, Dias chuvosos. Data: 1999 - 2019: Horas de sol

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

A consideração desses elementos ajudou a indicar onde estavam localizadas as falhas no processo de manutenção (operações e calendário utilizado), de modo a estabelecer um modelo de controle mais estruturado. O atual modelo de manutenção empregue, nesse sentido, veio como um modelo inicial e tímido do PCM. Sua análise resultou em alguns elementos de avaliação que possibilitaram novas ações relacionadas à garantia da qualidade das atividades e da equipe de manutenção. Assim, obteve-se o PDCA apresentado pela Figura 25.

Figura 26 – PDCA aplicado ao processo de manutenção empregado na usina



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A partir dessas observações, foi possível elaborar o formulário FMEA para identificar os modos de falha potenciais presentes na usina, verificando seus efeitos, causas e ações recomendadas, que auxiliaram na elaboração do 5W2H e do ciclo PDCA para melhoramento do processo de manutenção. A ideia central reside na proposta de manutenção periódica controlada e registrada, na implementação, a longo prazo, de um sistema de monitoramento e na aquisição de equipamentos que podem auxiliar nas inspeções e manutenções, facilitando a reposição de peças ou eventuais concertos que podem surgir fora do período de manutenção, como propuseram os trabalhos de Sousa (2021), Ferreira *et al.* (2022) e Alves Filho (2023). O modelo de FMEA para esse estudo pode ser observado no Quadro 4.

Quadro 4 – Modos de falha e seus efeitos

Item	Função	Modo de Falha	Efeito	Causa	Ações Recomendadas	Responsáveis
Módulo	Conversão da radiação solar em energia elétrica	Sujeira e/ou Sombreamento	Diminuir geração de energia	Acúmulo de Poeira Dejetos de Animais Vegetação	Inspeção visual periódica Manutenção Preventiva com cronograma Manutenção Preditiva	Equipe técnica
		Ruptura do Vidro	Perda de produto Risco de Choque elétrico e Incêndio	Sobreaquecimento Manuseio Inadequado Ação meteorológica		
		Corrosão Moldura	Danificação do Painel Exposição à Infiltração e Agentes Externos	Umidade e/ou Poeira		
		Ruptura nas Células	Diminuição dos Níveis de Geração Pontos Quentes	Manuseio Inadequado Ação meteorológica	Inspeção visual periódica	
		Pontos Quentes nas Células	Diminuição dos Níveis de Geração	Célula defeituosa Sombreamento Diodos defeituosos	Inspeção Termográfica Inspeção Periódica	
		Bolhas ou Rupturas na Camada Inferior	Diminuição dos Níveis de Geração Exposição à infiltração	Sobreaquecimento Umidade Ação Animal	Monitoramento de características elétricas do painel Manutenção Preditiva Manutenção Preventiva com cronograma	
Condutores/ Conexões	Conduzir corrente elétrica entre os elementos da usina	Condutor sobrecarregado	Sobreaquecimento Risco de Incêndio	Subdimensionamento Falha no sistema elétrico	Monitoramento de características elétricas do painel	Equipe técnica
		Defeito de isolamento	Curto-Circuito Corrente de fuga Sobreaquecimento Risco de choque elétrico e de incêndio	Flexão nos condutores Exposição à água, umidade e poeira Material de baixa qualidade	Monitoramento de características elétricas do painel Manutenção Preventiva com cronograma	
Inversor	Converter a corrente CC oriunda dos painéis para corrente CA	Sobreaquecimento do inversor	Danos ao equipamento Diminuição dos Níveis de Geração Risco de Incêndio	Falha nos dissipadores de calor Acúmulo de poeira	Inspeção visual periódica Manutenção Preventiva com cronograma Manutenção Preditiva Monitoramento de características elétricas do painel	Equipe técnica

(continuação)

Item	Função	Modo de Falha	Efeito	Causa	Ações Recomendadas	Responsáveis
Inversor	Converter a corrente CC oriunda dos painéis para corrente CA	Corrosão/Ruptura do invólucro	Exposição à infiltração e/ou condições meteorológicas Diminuição dos Níveis de Geração Curto-Circuito Perda de Equipamento	Sobreaquecimento Exposição à água, umidade e poeira Ação Animal	Inspeção visual periódica Manutenção Preventiva com cronograma Manutenção Preditiva Monitoramento de características elétricas do painel	Equipe Técnica
		Sobrecarga do Inversor	Sobreaquecimento Dano no Equipamento Diminuição dos Níveis de Geração	Falha elétrica	Monitoramento de características elétricas do painel	
Central de Distribuição	Núcleo de transmissão e proteção de energia da usina	Corrosão ou ruptura no invólucro	Exposição dos terminais elétricos às ações meteorológicas Perda de Geração Perda de Equipamento Curto-Circuito	Queda de Tensão Falha dos Painéis	Monitoramento de características elétricas do painel Inspeção visual periódica	
Box String	Garante proteção elétrica ao circuito CC da usina	Corrosão ou ruptura do invólucro	Exposição dos terminais elétricos às ações meteorológicas Diminuição dos Níveis de Geração Fuga de corrente Curto-Circuito Risco de Incêndio	Sobreaquecimento Exposição à água, umidade e poeira Ação Animal	Inspeção visual periódica Manutenção Preventiva com cronograma Manutenção Preditiva Monitoramento de características elétricas do painel	
Estrutura Metálica	Proteção mecânica, de fixação e de sustentação dos painéis	Corrosão	Danificação e/ou perda dos painéis	Exposição à água, umidade e poeira Ação Animal	Inspeção visual periódica Manutenção Preventiva com cronograma	
		Ruptura e/ou Torções	Danificação e/ou perda dos painéis	Sobreaquecimento Material de baixa qualidade	Inspeção visual periódica Manutenção Preventiva com cronograma	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A planilha de FMEA indica, essencialmente, as principais falhas que podem ser observadas em uma usina FV. Conforme destaca Alves Filho (2023), a sujidade é uma das maiores causadoras de perdas em módulos FV, indicando que as perdas, no Brasil, já chegaram até 10%. Isso leva a sobreaquecimento, falhas nos dispositivos e pontos de perda de calor que interferem no desempenho dos painéis. Além disso, elementos como a vegetação, dejetos animais ou falhas decorrentes de eventos meteorológicos precisam ser também considerados nesse processo. Logo, as ações recomendadas não refletem falhas nas atividades desempenhadas pelo projeto de manutenção atualmente utilizado pela empresa, mas indicam pontos de melhoria a partir das falhas mais recorrentes em usinas fotovoltaicas. O modelo de FMEA proposto pode ser aprimorado a partir do estabelecimento de Números de Prioridade de Risco (NPR) (SAKURADA, 2001).

A partir do cálculo, a classificação das falhas deve ser realizada pelo índice NPR, sendo cada parâmetro (Ocorrência, Severidade, Detecção) atribuído um valor de 1 a 10. Se o índice NPR estiver abaixo de 50, ele apresenta Risco Baixo e Facilidade de Detecção. Se o índice estiver entre 50 e 100, apresenta Risco Moderado e com Detecção Moderada. Valor acima de 100 apresentam Risco Alto e Dificuldade de Detecção. A recomendação e manutenção para índices NPR maiores que 100 é um mínimo de 3 por ano, indicando que manutenção trimestral é a abordagem mais indicada em todos os casos. Embora o não uso do NPR não interfira, inicialmente, na aplicação o FMEA, a longo prazo, o indicador é importante para que os responsáveis pela implementação de novas ações possam delimitar níveis de atuação para cada falha e indicar o que exige maior atenção da equipe.

Atualmente, observa-se que a empresa já faz a avaliação do Índice de Ocorrência e do Índice de Detecção especificamente para os inversores. O processo de implementação da análise de cada um desses elementos tem sido realizado de modo progressivo. A elaboração do FMEA sem esses valores não é impossível, mas pode indicar uma fragilidade na análise, como destacam Lima Junior e Rodrigues (2022). Justamente por isso que o FMEA não é a única ferramenta empregue nessa análise. Assim, considerando essa estrutura e os dados obtidos ao longo desse processo, as resoluções obtidas por meio da ferramenta 5W2H são apresentadas a partir do Quadro 5, em que se destacam como as ações devem ser implementadas e os detalhes dessa interferência para ajuste do plano PCM.

Quadro 5 – Definição de cada uma das etapas do 5H2W

Item	O quê?	Quem?	Onde?	Quando?	Por quê?	Como?	Quanto Custa?
Quebra, degradação, desgaste ou troca de peça	PCM Preventiva com Cronograma	Técnico Manutenção	Usina	Trimestralmente	Redução de paradas	Alteração do plano atual empregue, realizando ações a cada três meses como medida de prevenção. Agendamento da manutenção para dia específico, realizando sempre no mesmo dia.	Cerca de R\$ 20.000,00, podendo apresentar variação a depender do que precisa ser feito (pacote com SAMET ou VIPSEG).
	Registro de Falhas	Assistente Manutenção	Usina ou Empresa	Imediato	Controle e geração e indicadores	Formulário digital e manual, para ser preenchido e arquivado.	O valor é variável em caso de utilização e <i>software</i> .
	Estoque Inversores	Administrador	Usina	Até 3 meses	Verificação da criticidade.	Estabeleceu-se que 2 inversores por usina em estoque sobressalentes seriam suficientes para suprir a demanda (inversor leva 90 dias para retorno do conserto).	Aproximadamente R\$ 3.000,00, a depender de alguns fatores.
	Limpeza	Equipe Manutenção	Usina	A cada 3 meses (mínimo)	Redução de problemas decorrentes da sujeira.	Estabelecimento de cronograma de limpeza trimestral (lavagem e retirada da vegetação) em que os módulos devem ser limpos, a vegetação deve ser removida e deve-se verificar a estrutura metálica.	Cerca de R\$ 20.000,00, podendo apresentar variação a depender do que precisa ser feito (pacote com SAMET ou VIPSEG).
Preparação Colaboradores	Treinamento de manutenção	Administrador	Empresa/Usina	Entre 1 e 2 meses	Capacitação de funcionário para análise e avaliação	Preparação da equipe de trabalho a partir da contratação ou disposição de profissional para instruir as atividades de manutenção	Custo da hora do profissional (pode constar deslocamento dos funcionários ou não).

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A implementação dessas ações garantiria que o controle sobre os efeitos adversos do tempo e do uso pudessem ser mais bem controlados. É claro que devem ser considerados, também, elementos como a criticidade de alguns equipamentos, condição essa que deverá ser reavaliada ao fim do segundo ano, após a implementação do novo modelo de PCM. O projeto foi pensado de acordo com a abordagem já observada na usina, visando melhorar os aspectos centrais das atividades desenvolvidas, considerando os elementos teóricos que interferem na eficiência da planta fotovoltaica.

O método de cálculo utilizado apresenta benefícios no gerenciamento do plano de manutenção. Observa-se que as melhorias estão mais associadas a mudança do próprio cronograma. Verifica-se, também, que as manutenções apresentam maior tendência em dois períodos do ano no projeto inicial, o que indica que o tempo entre manutenções mais específicas precisa ser reduzido. De acordo com a literatura consultada e seguindo o plano estabelecido pelo Quadro 3, a cada 3 meses é o tempo ideal para verificação e limpeza dos módulos. Além disso, inspeções visuais semanais podem ser estabelecidas visando máxima eficiência do modelo e buscando reduzir eventuais manutenções corretivas a curto e médio prazo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A manutenção já foi vista apenas como uma ferramenta de reparo, antes da compreensão do impacto e importância de sua otimização para as organizações. A temática, embora frequentemente trabalhada na literatura, não se esgota, considerando a constante transformação do mercado. Neste contexto, o estudo buscou analisar o modelo de Planejamento e Controle de Manutenção de uma usina fotovoltaica na região centro-oeste. Avaliou-se o modelo atualmente em uso, identificar falhas e lacunas, fazer os apontamentos necessários e propor um novo modelo de PCM, que englobasse aspectos que estavam apresentando bons resultados com a metodologia em uso e com ações mais avançadas.

Primordialmente, estabeleceu-se uma base teórica sólida para que o desenvolvimento do modelo pudesse reivindicar aquilo que autores da área vêm explorando mais recentemente. Essa construção é importante justamente pelo fato de permitir ampliar o conhecimento teórico e compreender como a teoria se alia a prática no dia a dia. Especialmente no âmbito do PCM, muitos trabalhos têm abordado a questão da eficiência e da ampliação da produtividade englobando novas tecnologias e modelos integrados. No entanto, o modelo aqui apresentado buscou fazer uso de elementos de baixo custo com o intuito de demonstrar que projetos assertivos podem ser realizados com o emprego reduzido de recursos.

A partir da construção teórica, verificou-se que o PCM tem, como elementos centrais, produtividade, eficiência e melhoria de processos através de ferramentas específicas. Justamente por isso que o uso do FMEA, PDCA e 5W2H a partir das informações obtidas pelo Diagrama de Ishikawa foram utilizados nesse estudo. Cada ferramenta forneceu uma visão estrutural específica daquele aspecto que precisava ser aprimorado. O uso destas ferramentas permitiu que se complementassem à medida que lacunas iam sendo observadas, o que auxiliou a elaboração de um plano de PCM estrategicamente orientado para as principais necessidades da usina fotovoltaica que estava sendo analisada.

Essa base, portanto, permitiu identificar que a usina possui uma estratégia de manutenção corretiva, preventiva e, esporadicamente, preditiva em desenvolvimento. O plano de manutenção utilizado na planta solar analisada foi aplicado recentemente e o ponto que mais se destacou nessa análise foi o intervalo entre manutenções. O uso de níveis de manutenção é extremamente interessante, mas precisa levar em

consideração que a literatura destaca que os efeitos meteorológicos sobre as plantas solares são os elementos que mais interferem na eficiência e na durabilidade. Diante disso, o modelo empregue pela empresa possui alguns elementos passíveis de melhoras, que foram destaque para elaboração do novo modelo de PCM.

Assim, a proposição de sugestões e melhorias considerou do Diagrama de Ishikawa para identificar as falhas e do PDCA para avaliar o planejamento de manutenção eu já vinha sendo utilizado pela planta solar. Os principais apontamentos demonstraram que a melhor preparação de pessoal, algumas alterações na garantia de estoque para troca de peças e um cronograma com um tempo menor entre as limpezas foram os principais pontos. Isso porque a sujidade é um dos fatores que mais interfere na eficiência dos módulos e, assim como os efeitos meteorológicos geram impacto sobre os materiais, tendo em vista que eles ficam expostos. Justamente por isso que o plano considerou as principais falhas de cada componente e as motivações, isto é, os elementos que poderiam gerar essas falhas.

Outro ponto importante, porém, fora do escopo desta monografia, é a ocorrência de furtos. As usinas fotovoltaicas, em geral, estão localizadas em regiões mais afastadas dos centros comerciais e propícias a furtos de cabos, por exemplo, o que gera uma perda por lucro cessante extremamente alta, pois a usina para de gerar energia até que seja efetuada a compra do material subtraído e o custo com segurança 24 horas também é significativo.

O PCM, nesse sentido, é um investimento. Entende-se que a manutenção gera, naturalmente, um custo elevado para as empresas. O gerenciamento das atividades que garantem o funcionamento dos principais componentes das plantas solares é imprescindível para que se tenha uma visão mais estratégica de quais medidas interferem mais proeminentemente na vida útil dos materiais. É por isso que a proposição do cálculo do índice NPR para que seja possível identificar os pontos de maior atenção podem interferir diretamente na criticidade dos materiais. A avaliação da criticidade, embora ainda seja subjetiva nesse planejamento, é de interesse do pesquisador. Entendo a relação do pesquisador com a empresa, a melhoria na avaliação dos principais fatores de falha deve, obrigatoriamente, perpassar o impacto de cada componente da planta solar na geração de energia.

Os próximos passos, após a implementação o novo modelo PCM e reavaliação dos resultados, será a análise da criticidade dos componentes. Ferramentas como a Curva ABC podem auxiliar no desenvolvimento dessa análise. Os resultados obtidos

a partir das mudanças atualmente sugeridas serão revisitados por meio da mesma metodologia empregue nessa avaliação ao final de 2024. Cada procedimento precisa ser reavaliado dentro de um determinado período para que seja possível indicar para a gerência quais os planos podem ser mantidos e quais precisam ser readaptados. As informações aqui reunidas fornecerão uma boa base para discussões futuras.

Isso permite estabelecer uma relação com sugestões de trabalhos futuros nessa área. Um dos pontos pouco abordado nesse estudo está na análise quantitativa da eficiência energética da planta e análise estatística da taxa de falha dos equipamentos e do modo de falha, por falta de uma quantidade representativa de dados (o período histórico de dados era de somente um ano), o que pode gerar uma conclusão não real dos indicadores estatísticos.

Assim, alguns resultados foram calculados durante este período, sendo eles, taxa de falha dos inversores 5,4% e um rendimento de energia da usina de 96,76% gerado no ano de 2023 em comparação com o estimado para este período. Embora seja uma temática pertinente, não há dados suficientes para uma análise aprofundada. Justamente por isso, análises futuras nessa área podem se concentrar em fatores relativos à produção de energia, eficiência de conversão, pontos de perda e os efeitos meteorológicos sobre esse processo, além de uma análise investigativa de outras empresas de geração fotovoltaica, visando um quadro comparativo em relação aos métodos de planejamento centrado na manutenção.

Isso permitiria explorar com maior profundidade a qualidade dos próprios materiais empregues na produção dos módulos. Comparativos entre diferentes materiais também são sugestões pertinentes para avaliações futuras que busquem identificar eficiência, qualidade e melhoras técnicas nas plantas solares. Outras possibilidades residem no campo econômico, na geração de energia em termos de análise tarifária, assim como no campo de gestão, investigando o gerenciamento energético buscando a máxima eficiência.

Finalizando, compreende-se as limitações do estudo no que tange à disponibilidade de dados e na impossibilidade de implementação e avaliação do novo PCM. Contudo, o projeto é significativo pois permite identificar os principais problemas observados nos setores de manutenção, como falta de peças de reposição, necessidade de profissionais mais qualificados nas usinas fotovoltaicas, melhor monitoramento, entre outros, e explorar diferentes possibilidades para geração de

soluções eficientes. O estudo alcançou os objetivos aos quais se propôs, respondendo ao problema de pesquisa e corroborando com a hipótese suscitada pelo trabalho.

REFERÊNCIAS

ABECOM. **Entenda o que é manutenção preventiva e quando deve ser realizada**, jul. 2021. Disponível em: <https://www.abecom.com.br/o-que-e-manutencao-preventiva/>. Acesso em: 06 dez. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - Aneel. **Base de dados SISGD**. 2021b. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/>. Acesso em: 07 dez. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - Aneel. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA**. 2021a. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzd kNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5Yz AxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 07 dez. 2023.

ALMEIDA, Paulo S. de. **Manutenção Mecânica Industrial: conceitos básicos e tecnologia aplicada**. São Paulo: Editora Érica, 2014. *E-book*. Disponível em: https://books.google.fr/books?hl=pt-BR&lr=&id=sLZiDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=conceito+de+manuten%C3%A7%C3%A3o&ots=0Yoh4-MuSv&sig=KJuAkIFVZOgRMiOa65KJqk_k8qY&redir_esc=y#v=onepage&q=conceito%20de%20manuten%C3%A7%C3%A3o&f=false. Acesso em: 19 dez. 2023.

ALVES FILHO, Múcio D. **Gestão da Energia e da Manutenção da Usina Solar Fotovoltaica do IFPE – Campus Garanhuns: avaliação tarifárias e proposta FMEA**. 2023, 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Em Engenharia Elétrica) – Coordenação da Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Garanhuns, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1005/GEST%C3%83O%20DA%20ENERGIA%20E%20DA%20MANUTEN%C3%87%C3%83O%20DA%20USINA%20SOALR%20FOTOVOLTAICA%20DO%20IFPE%20CAMPUS%20GARANHUNS%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20Tarif%C3%A1ria%20e%20Proposta%20FMEA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 06 dez. 2023.

ARAÚJO, Ericka. O problema do *mismatch* nas instalações fotovoltaicas. **Canal Solar**, jun. 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/mismatch-nas-instalacoes-fotovoltaicas/>. Acesso em: 15 dez. 2023.

ARAÚJO, Mônica T. C. **Utilização de sistema fotovoltaico para bombeamento de água na irrigação de feijão-caupi no município de Montes Claros (MG)**. 2022, 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2022. Disponível em: <https://www.ica.ufmg.br/tcc/2021/TCC-M%C3%B4nicaTamiresCardosoAra%C3%BAjo.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2023.

ARIAS, Vitor C. **Comparação entre a aplicação de inversores centrais e strings em uma usina solar fotovoltaica: análise técnica e financeira**. 2022, 129 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia,

Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2022. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/27456/Trabalho%20de%20Conclus%3%a3o%20de%20Curso%20-%20Vitor%20Coutinho%20Arias.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 07 dez. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR - ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**, n. 61, nov. 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 06 dez. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5462 – Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. Disponível em: <https://fr.slideshare.net/eavargas2512/nbr-5462-2>. Acesso em: 06 dez. 2023.

BASSAN, Edilberto. **Ferramentas avançadas da qualidade: Aplicações e estudos**. Curitiba: Caley Treinamentos, 2020. *E-book*.

BEZERRA, Francisco D. Energia Solar. **Caderno Setorial ETENE**, v. 6, n. 174, p. 1-15, jul. 2021. Disponível em: https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/834/1/2021_CDS_174.pdf. Acesso em: 07 dez. 2023.

COELHO, Marcelo S. Sistemas Supervisórios. **Apostila de Aula**. Disciplina de Sistemas Supervisórios Modernos. 42p. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus Cubatão, jul. 2010. Disponível em: https://professorcesarcosta.com.br/upload/imagens_upload/Apostila_%20Sistema%20Supervis%C3%B3rio.pdf. Acesso em: 07 dez. 2023.

COLLI, Alessandra. Failure mode and effect analysis for photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 804-809, 2015. Available on: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115005262>. Accessed: Dec 7, 2023.

COSTA, André L. C.; HIRASHIMA, Simone Q. da S.; FERREIRA, Reginaldo V. Usinas fotovoltaicas do Instituto Federal De Minas Gerais – IFMG: Análise De Geração E Dos Principais Desafios Relacionados À Operação E Manutenção Dos Sistemas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 8., 2020, Fortaleza. **Anais eletrônicos [...]** Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2020.

COSTA, André L. C.; HIRASHIMA, Simone Q. da S.; FERREIRA, Reginaldo V. Operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede: inspeção termográfica e limpeza de módulos FV. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 4, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/nYrQWs3y5BHwMLcWT5DvJdd/#>. Acesso em: 07 dez. 2023.

DE MELO, G. A. **Gestão da Manutenção**. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2007.

FADIGAS, Eliane A. F. A. Energia solar fotovoltaica: fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica. **Apostila de aula**. Disciplina de Produção de Energia. 71p. Universidade de São Paulo, 2014. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf. Acesso em: 07 dez. 2023.

FERREIRA, Thaís *et al.* Elaboração de um planejamento de manutenção aos moldes da Manutenção Produtiva Total (TPM): um estudo de caso. **Produto & Produção**, v. 23, n. 2, p. 1-22, 2022. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ProdutoProducao/article/view/119500>. Acesso em: 06 dez. 2023.

FLUENCE CORP. **Smart Operations**. 2023. Disponível em: <https://www.fluencecorp.com/pt/smart-operations/>. Acesso em: 16 dez. 2023.

FRONIUS PRIMO. **Inverter for grid-connected photovoltaic systems** – Installation Instruction. Madrid, 13 mar. 2019. Available on: <https://media.adeo.com/marketplace/LMES/82923905/2570682.pdf>. Accessed: Dec 7, 2023.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. *E-book*. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derad005.pdf>. Acesso em: 08 dez. 2023.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

GREGÓRIO, Gabriela F. P.; SILVEIRA, Aline M. **Manutenção industrial**. Porto Alegre: Sagah Educação S.A, 2018. *E-book*.

INFOMET. Empresas gastam 3,6% do PIB em manutenção de equipamentos. **O Estado de São Paulo**, ago. 2020. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/noticias-ler.php?cod=4579>. Acesso em: 06 dez. 2023.

IRVINE, Stuart. Solar Cell and Photovoltaics. In: KASAP, Safa; CAPPER, Peter. (Eds). **Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials**. 2. ed. Heidelberg: Springer International Publishing, 2017. *E-book*.

JAHN, Ulrike. (Ed.). Soiling Losses – Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants. Report IEA-PVPS T13-21/2022. Germany: IEA, 2022. *E-book*. Disponível em: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/01/IEA-PVPS-T13-21-2022-REPORT-Soiling-Losses-PV-Plants.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2023.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: Função Estratégica**. 3. ed. rev. e aum. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2009.

KRUGER, Juliano M. **Metodologia da pesquisa em Administração em linguagem descomplicada**. Curitiba: Editora Bagai, 2023.

LAMAS, Lorenzo M. **Estudo das contribuições da implantação do Planejamento e Controle Da Manutenção (PCM)**: estudo teórico de múltiplos casos. 2021, 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/3332/6/MONOGRAFIA_EstudoContribui%C3%A7%C3%B5esImplanta%C3%A7%C3%A3o.pdf. Acesso em: 06 dez. 2023.

LIMA JUNIOR, Antônio L.; RODRIGUES, Orlânia A. **FMEA Aplicado a Manutenção: revisão sistemática e análise crítica**. 2022, 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Automotiva) – Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, 2022.

LOBO, Renato N. **Gestão da Qualidade**. São Paulo: Editora Érica, 2010. *E-book*. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=S8y8DwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 08 dez. 2023.

MARCONI, Marina A.; LAKATOS, Eva M. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2005. *E-book*. Disponível em: https://docente.ifrn.edu.br/olivianeta/disciplinas/copy_of_historia-i/historia-ii/china-e-india. Acesso em: 08 dez. 2023.

MELO, Anderson R. **Desenvolvimento de um sistema supervisório aplicado em uma usina de geração de energia solar fotovoltaica**. 2020, 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2020. Disponível em: <https://ppgee.ufersa.edu.br/wp-content/uploads/sites/61/2021/02/Disserta%C3%A7%C3%A3o-Anderson-Rodrigues.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2023.

MIGUEL, Paulo A. C. *et al.* **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. *E-book*.

MOBLEY, R. Keith. **An Introduction to Predictive Maintenance**. United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2002. *E-book*.

MORAES, A. M. de; FONSECA, J. J. S. da. **Metodologia da Pesquisa Científica**. Sobral: [s.n.], 2017. *E-book*. Disponível em: https://md.uninta.edu.br/geral/pos-graduacao/disciplinas-comuns/metodologia_da_pesquisa_cient%C3%ADfica/mobile/index.html#p=4. Acesso em: 15 dez. 2023.

MORAES, Fabrício; MORAES, Albermerc; BARBOSA, Fabio. Technical-economic analysis of the first mini-generation photovoltaic system of Piauí, Brazil. **IEEE Latin America Transactions**, v. 17, n. 10, p. 1706-1714, 2019. Available on: https://www.researchgate.net/publication/339115086_Technical-economic_analysis_of_the_first_mini-generation_photovoltaic_system_of_Piaui_Brazil. Accessed: Dec 6. 2023.

NEOELETRIC. **Conheça diferentes opções de inversor solar para painel fotovoltaico**, out. 2022. Disponível em: <https://www.neoelectric.com.br/post/inversor-solar>. Acesso em: 07 dez. 2023.

NOGUEIRA, Pedro A. S. **Análise da tendência de falhas dos principais equipamentos de uma usina fotovoltaica a partir do histórico de operação**. 2023, 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2023. Disponível em: https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/29467/An%C3%A1lise%20de%20T%C3%AAndencia%20de%20Falhas%20de%20uma%20UFV_TCC_Pedro%20Aleida.pdf?sequence=1. Acesso em: 06 dez. 2023.

PINHO, João T.; GALDINO, Marco A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 2014.

POOR, Peter *et al.* Facility management as innovative tool for effective management of supporting company activities. **MM Science Journal**, p. 340-355, 2012. Available on: https://www.researchgate.net/profile/Barbora-Bryksi-Stunova/publication/277935974_THE_MORPHOLOGY_CHANGE_OF_IRON_DIBORIDE_IN_THE_Fe-B_ALLOY_DURING_DEFORMATION/links/5647a3a708ae451880ac4d9d/THE-MORPHOLOGY-CHANGE-OF-IRON-DIBORIDE-IN-THE-Fe-B-ALLOY-DURING-DEFORMATION.pdf. Accessed: Dec 7, 2023.

PORTAL SOLAR. **Passo a Passo da Fabricação do Painel Solar**, 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>. Acesso em: 07 dez. 2023.

RAMOS, Manoel J.; SCHRATTNER, Ricardo. Implantação de sistema de planejamento e controle da manutenção em uma indústria de ingredientes alimentícios. **Revista Técnico-Científica do Crea-PR**, Marechal Cândido Rondon, v. 23, p. 1-18, mar. 2020. Disponível em: <https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/357/434>. Acesso em: 06 dez. 2023.

REDISKE, Graciele. **Modelo de Avaliação do Desempenho de Operação e Manutenção de Usinas Fotovoltaicas de minigeração Distribuída**. 2023, 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia da Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/29379/TES_PPGE2023_REDISKE_GRACIELE.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 07 dez. 2023.

SAKURADA, Eduardo y. **As técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no Desenvolvimento e na Avaliação de Produtos**. 2001. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2001. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/80128>. Acesso em: 18 dez. 2023.

SANTOS FILHO, Paulo S. **Uma Visão geral da Eficiência Energética na indústria e contribuições das metodologias: Ciclo PDCA, 5W2H e WCM**. 2021, 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2021. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/3139/1/MONOGRAFIA_Vis%C3%A3oGeralEfici%C3%Aancia.pdf. Acesso em: 08 dez. 2023.

SARVER, Travis; AL-QARAGHULI, Ali; KAZMERSKI, Lawrence L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 698-733, 2013. Available on: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211300021X>. Accessed: Dec 6, 2023.

SAUIAIA, Rodrigo L. **Energia solar fotovoltaica: panorama, oportunidades e desafios**. Audiência Pública, Comissão de Minas e Energia – CME, Câmara dos Deputados. Brasília, 13 ago. 2019. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cme/apresentacoes-em-eventos/2019/13-08-2019-distribuicao-de-energia-solar-fotovoltaica/2019.08.13%20ABSOLAR%20-%20Energia%20Solar%20Fotovoltaica%20-%20Dr.%20Rodrigo%20Lopes%20Sauaia.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2023.

SELEME, Robson; SELEME, Roberto B. **Manutenção industrial: mantendo a fábrica em funcionamento**. 2. ed. rev. atual. e ampli. Curitiba: Ibpex, 2012. *E-book*.

SILVA, Norma L. O. da; BARRETO, Leandro de O. **Conheça as Principais Ferramentas de Gestão**. Salvador: SEBRAE/BA, 2019. *E-book*. Disponível em: https://www.sebraeatende.com.br/system/files/conheca_as_principais_ferramentas_de_gestao.pdf. Acesso em: 08 dez. 2023.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da Produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009. *E-book*. Disponível em: <http://folgueral.com.br/producao/arquivos/adminstracao%20da%20producao/capitulo%201-administracao%20da%20producao.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2023.

SOUSA, Emanuella M. R. de. **Análise da operação e manutenção da usina solar fotovoltaica Mossoró II da Ufersa**. 2019, 9 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/c57e52d5-a3d9-4932-85bc-8671720c8529>. Acesso em: 06 dez. 2023.

SOUSA, Thiago C. de. **Planejamento e Controle da Manutenção**: estudo de caso em uma usina fotovoltaica. 2021, 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2021. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/29628/1/2021_ThiagoCarrijoDeSouza_tcc.pdf. Acesso em: 06 dez. 2023.

SOUZA, João P. Módulos Fotovoltaicos - Perdas por Mismatch em Sistemas Fotovoltaicos. **Ecori Energia Solar**, jan. 2019. Disponível em: <https://www.ecorienergiasolar.com.br/artigo/modulos-fotovoltaicos---perdas-por-mismatch-em-sistemas-fotovoltaicos#:~:text=Os%20m%C3%B3dulos%20n%C3%A3o%20funcionam%20no,acarreta%20em%20mismatch%20por%20envelhecimento..> Acesso em: 11 dez. 2023.

VIANA, Herbert R. G. **Planejamento e Controle da Manutenção**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002. *E-book*. Disponível em: <https://www.drbrm.org/av1/Livro%20PMI%20-%20Herbert%20Viana.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2023.

VIEIRA, Rafael M.; CRISÓSTOMO, Daniel C. de C. Maintenance and inspection applied to photovoltaic solar plant, a case study at UFERSA-Caraúbas. **Concilium**, v. 23, n. 3, p. 908-925, 2023.

VILLALVA, Marcelo G. Entendendo as curvas IV e PV dos módulos fotovoltaicos. **Canal Solar**, mar. 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/entendendo-as-curvas-iv-e-pv-dos-modulos-fotovoltaicos/>. Acesso em: 07 dez. 2023.

VILLALVA, Marcelo G.; GAZOLI, Jonas R. **Energia solar fotovoltaica**: conceitos e aplicações. São Paulo: Érica, 2012.

YIN, Robert K. **Estudo de caso**: planejamento e métodos. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.