

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ALINE MATIAS ALEXANDRE

**ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS EM AMBIENTES
INDUSTRIAIS - ESTUDO DE CASO**

UBERLÂNDIA
2025

ALINE MATIAS ALEXANDRE

**ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS EM AMBIENTES
INDUSTRIAIS - ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Carlos Eduardo Tavares.

UBERLÂNDIA

2025

ALINE MATIAS ALEXANDRE

**ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS EM AMBIENTES
INDUSTRIAIS - ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Carlos Eduardo Tavares

Prof. Thales Lima Oliveira

Prof. Augusto W. Fleury Veloso da Silveira

AGRADECIMENTOS

Concluir mais essa etapa da minha caminhada acadêmica é uma imensa alegria. Agradeço, em primeiro lugar a Deus, por ser meu alicerce nos momentos mais difíceis, por nunca me deixar desistir mesmo quando fraquejei.

Cursar Engenharia na Universidade Federal de Uberlândia sempre foi um grande sonho, sonho esse que dividi com muitos familiares e amigos, mas principalmente com a minha mãe, minha maior incentivadora em todos os aspectos da minha vida. Ao meu pai e à minha irmã, que mesmo sem vivenciarem de perto os desafios de um curso superior, sempre estiveram ao meu lado com apoio e carinho, meu sincero agradecimento.

Ao meu esposo, obrigada por acreditar em mim, por estudar comigo tantas vezes e por estar presente em cada conquista. Aos meus familiares, especialmente meus avós, obrigada por cada gesto de carinho, que tantas vezes veio em forma de acolhimento, cuidado e comida feita com amor.

Sou grata também aos amigos de longa data e aos que ganhei ao longo da graduação, vocês tornaram essa fase muito mais leve, divertida e inesquecível.

Aos professores, que dentro e fora da sala de aula me ensinaram muito mais do que conteúdos técnicos, levarei seus ensinamentos para a vida. Hoje, posso dizer com certeza que sou uma profissional melhor graças a vocês.

Seria impossível citar o nome de todas as pessoas que contribuíram, de alguma forma, para a minha formação, mas saibam que sou imensamente grata. A cada um de vocês, o meu mais sincero muito obrigada!

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar a confiabilidade dos sistemas elétricos em um ambiente industrial, identificando as principais falhas, suas causas e impactos na produção. A pesquisa foi realizada em uma fábrica de grande porte localizada em Uberlândia, Minas Gerais, utilizando dados reais de operação e manutenção. Foram aplicadas metodologias como a Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA), a Análise de Árvores de Falha (FTA) e o cálculo do Tempo Médio Entre Falhas (MTBF) para mapear vulnerabilidades do sistema elétrico e propor melhorias nas estratégias de manutenção. Os resultados indicaram que as falhas mais recorrentes estão associadas a variações de tensão de curta duração (VTCD), frequentemente causadas por fatores externos, como descargas atmosféricas e curtos-circuitos. A predominância da manutenção corretiva resultou em custos operacionais elevados e maior tempo de inatividade dos equipamentos. Como soluções, propõe-se a implementação de sistemas de monitoramento contínuo, a revisão dos intervalos de manutenção preventiva e o fortalecimento das práticas de manutenção preditiva. A adoção dessas estratégias tem o potencial de aumentar a confiabilidade do sistema elétrico, reduzir custos operacionais e minimizar impactos na produção.

Palavras-chave: Confiabilidade elétrica; Manutenção preditiva; Tempo Médio Entre Falhas (MTBF); Variação de tensão de curta duração (VTCD)

ABSTRACT

This study aims to analyze the reliability of electrical systems in an industrial environment by identifying the main failures, their causes, and their impacts on production. The research was conducted in a large-scale factory located in Uberlândia, Minas Gerais, using real operational and maintenance data. Methodologies such as Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), Fault Tree Analysis (FTA), and the calculation of Mean Time Between Failures (MTBF) were applied to map vulnerabilities in the electrical system and propose improvements to maintenance strategies. The results indicated that the most frequent failures are associated with short-duration voltage variations (VTCD), often caused by external factors such as lightning strikes and short circuits. The predominance of corrective maintenance has led to high operational costs and increased equipment downtime. As solutions, the implementation of continuous monitoring systems, a review of preventive maintenance intervals, and the strengthening of predictive maintenance practices are proposed. The adoption of these strategies has the potential to enhance electrical system reliability, reduce operational costs, and minimize production impacts.

Keywords: Electrical reliability; Predictive maintenance; Mean Time Between Failures (MTBF); Short-duration voltage variation (VTCD).

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de Falhas e Suas Causas e Consequências.....	19
Tabela 2 - Tipos de manutenção na indústria e suas características.....	22
Tabela 3 - Cálculo do MTBF utilizando dados de Janeiro/2025.....	33
Tabela 4 - Ações de manutenção realizadas pela distribuidora de energia.....	35
Tabela 5 - Registro de Falhas e Impacto na Produção.....	36
Tabela 6 - Resumo das Propostas de Melhorias.....	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de estratificação das regiões de sensibilidade associadas a VTCD.....	32
Figura 2 – Passo a passo para religamento da energia.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS

FMEA - Análise de modos de falha e efeitos

FTA - Análise de árvore de falha

MTBF - Tempo médio entre falhas

RAS - Religamentos automáticos

RCM - Manutenção Centrada em Confiabilidade

TPM - Manutenção Produtiva Total

VTCD - Variações de tensão de curta duração

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 PROBLEMATIZAÇÃO	11
1.2 JUSTIFICATIVA	12
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1 Objetivo Geral	13
1.3.2 Objetivos Específicos	13
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 CONCEITO DE CONFIABILIDADE E SUA IMPORTÂNCIA	15
2.2 FALHAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS	17
2.3 MANUTENÇÃO PREDITIVA, PREVENTIVA E CORRETIVA	19
2.4 MODELOS DE ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	24
3. METODOLOGIA	27
3.1 DEFINIÇÃO DO AMBIENTE DE ESTUDO	27
3.2 COLETA DE DADOS.....	27
3.3 ANÁLISE DA CONFIABILIDADE	28
3.4 AVALIAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO	29
3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E PROPOSTA DE MELHORIAS	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1 Análise da Confiabilidade dos Sistemas Elétricos	31
4.2 Avaliação das Estratégias de Manutenção.....	34
4.3 Propostas de Melhorias	38
4.3.1 Monitoramento Contínuo da Qualidade da Energia	38
4.3.2 Revisão dos Intervalos de Manutenção Preventiva	38
4.3.3 Fortalecimento da Manutenção Preditiva.....	39
4.3.4 Redução da Dependência da Manutenção Corretiva.....	39
4.3.5 Otimização do Processo de Religamento Automático.....	42
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1. INTRODUÇÃO

A confiabilidade de sistemas elétricos em ambientes industriais é um dos principais fatores que assegura a continuidade e eficiência das operações produtivas, pois são responsáveis por fornecer a energia necessária para a operação de máquinas, equipamentos e processos de produção, sendo fundamentais para a competitividade e a segurança das indústrias (RAPOSO, 2004). No entanto, a falha desses sistemas pode resultar em interrupções consideráveis, impactando diretamente a produtividade, a qualidade dos produtos e até mesmo a segurança dos trabalhadores (SANTOS et al., 2021). A confiabilidade, nesse contexto, refere-se à capacidade do sistema elétrico de operar sem falhas durante um determinado período, sob condições especificadas de operação (CAVALCANTI et al., 2021).

Em ambientes industriais, as falhas elétricas podem ocorrer por diversos fatores, como sobrecarga de circuitos, falhas em componentes, defeitos de manutenção ou erros operacionais. De acordo com Falck et al. (2018), a confiabilidade de sistemas elétricos em ambientes industriais deve ser considerada desde o projeto até a manutenção e operação, com ênfase na análise de falhas, para que se possam desenvolver estratégias de prevenção que minimizem as consequências dessas falhas. Uma análise de confiabilidade eficaz envolve tanto o entendimento das possíveis falhas quanto a implementação de ações corretivas, com o intuito de melhorar a performance do sistema (PASCHOAL et al., 2009).

Além disso, em ambientes industriais, a complexidade e a diversidade de sistemas elétricos tornam a análise de confiabilidade uma tarefa desafiadora. Sistemas de distribuição de energia, motores elétricos, sistemas de controle e automação, e redes de comunicação que suportam as operações industriais devem ser monitorados constantemente para garantir sua eficácia. Neste sentido, a implementação de sistemas de monitoramento inteligente e técnicas de manutenção preditiva têm ganhado destaque como métodos para melhorar a confiabilidade e reduzir os custos associados às falhas (MOLEDA et al., 2023).

A relevância da análise de confiabilidade é ainda mais acentuada quando se considera o impacto financeiro das falhas. De acordo com Li, Barker e Sansavini (2017), as paradas não planejadas podem resultar em perdas financeiras expressivas, muitas vezes devido à paralisação de linhas de produção, danos a equipamentos e materiais, e até mesmo em consequências legais em casos de falhas que afetam a segurança, assim, a redução do tempo de inatividade e a otimização da operação do sistema elétrico são objetivos centrais da gestão da confiabilidade nesses ambientes.

Neste cenário, o presente estudo de caso tem como objetivo realizar uma análise detalhada da confiabilidade dos sistemas elétricos em um ambiente industrial específico, com foco na identificação dos principais fatores que influenciam sua performance. A partir dessa análise, foi possível compreender as causas subjacentes das falhas recorrentes, bem como a repercussão dessas falhas nos processos produtivos, segurança e custos operacionais. Para atingir esses objetivos, foram utilizados dados reais provenientes da operação do sistema e a aplicação de modelos de confiabilidade que permitem uma avaliação precisa da eficiência das estratégias de manutenção atualmente em vigor, sendo que para o estudo, utilizou-se os dados disponibilizados pela companhia de energia da cidade.

Além disso, a pesquisa buscará identificar pontos relevantes na gestão de manutenção e propor melhorias substanciais, tanto em termos de processos quanto de tecnologias, com o intuito de aumentar a robustez e a eficiência dos sistemas elétricos, garantindo uma operação mais segura e econômica. O estudo visa, portanto, não apenas a redução de custos, mas também a minimização de riscos e a maximização da confiabilidade dos sistemas, contribuindo para a continuidade e excelência da operação industrial.

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

Em ambientes industriais, os sistemas elétricos desempenham um papel fundamental para a operação contínua e eficiente das atividades produtivas, sendo responsáveis pela distribuição e fornecimento de energia elétrica para uma ampla gama de equipamentos e processos. A interrupção ou falha desses sistemas pode acarretar sérios desdobramentos, tanto no aspecto operacional quanto financeiro, afetando a produtividade, os custos de manutenção e a segurança no ambiente de trabalho (SILVA, 2008). Segundo Li, Barker e Sansavini (2017), a falha no fornecimento de energia elétrica pode resultar em paradas não programadas, o que gera perdas financeiras expressivas e pode levar a danos materiais e à redução da qualidade dos produtos.

A complexidade crescente dos sistemas elétricos industriais, associada a condições operacionais dinâmicas, torna a análise de confiabilidade uma tarefa repleta de desafios. Para que um sistema elétrico opere de forma eficiente e segura, é essencial que sejam implementadas práticas adequadas de monitoramento e manutenção, que permitam identificar falhas iminentes e pontos estratégicos de falha antes que se tornem problemáticos (RAMALHO et al., 2014). A dificuldade de realizar essa análise reside não apenas na variedade de componentes envolvidos,

mas também na interação entre fatores internos e externos, como variações na carga de operação, condições ambientais e a qualidade da energia elétrica fornecida (GILL, 2016).

Desta forma, surge a problemática central deste estudo, que busca compreender de que maneira as falhas nos sistemas elétricos impactam diretamente a produtividade e a eficiência industrial. A pergunta que orienta esta pesquisa é: como os métodos de análise de confiabilidade podem ser aplicados de forma eficaz para mitigar os impactos das falhas elétricas, assegurando a continuidade das operações, a redução de custos operacionais e a preservação da segurança dos trabalhadores? A análise da confiabilidade envolve não apenas a identificação das causas das falhas, mas também a implementação de estratégias para prevenção e minimização de riscos. A aplicação desses métodos permite a otimização do desempenho do sistema, contribuindo para a redução de interrupções nas atividades produtivas e garantindo um ambiente de trabalho seguro e eficiente (FALCK et al., 2018).

1.2 JUSTIFICATIVA

A realização de um estudo aprofundado sobre a confiabilidade de sistemas elétricos em ambientes industriais é justificada pela crescente complexidade das operações industriais e pelos elevados custos associados a falhas no fornecimento de energia. Em indústrias de grande porte, a falha de sistemas elétricos pode resultar não apenas em paralisações imprevistas, mas também em danos permanentes a equipamentos, produtos defeituosos e até em acidentes com consequências severas para a segurança dos trabalhadores (RAMALHO et al., 2014). A ocorrência dessas falhas afeta diretamente a competitividade das empresas, tornando a busca por soluções para melhorar a confiabilidade elétrica um fator estratégico essencial.

A ausência de um planejamento eficiente de manutenção preventiva e preditiva é uma das principais causas das falhas inesperadas em sistemas elétricos industriais (NEPOMUCENO, 1989). Quando essas falhas ocorrem, o custo associado ao tempo de inatividade e à reparação de danos pode ser substancial, além de impactar a reputação da empresa perante seus clientes. Segundo Oliveira; Paiva e Almeida (2010), a aplicação de técnicas de confiabilidade, como análise de modos de falha e efeitos (FMEA) e a análise de árvores de falha (FTA), tem mostrado grande eficácia na previsão e mitigação de falhas, permitindo a implementação de soluções proativas que minimizam as consequências das falhas e garantem maior eficiência operacional.

Ademais, a condução de um estudo de caso baseado em dados reais extraídos de um ambiente industrial específico torna-se ainda mais relevante, pois possibilita a identificação das

fallas mais recorrentes e a análise detalhada das suas causas e consequências. Esse tipo de estudo é essencial para o desenvolvimento de um modelo de gestão de confiabilidade adaptado às necessidades da indústria em questão, o que resulta na otimização dos recursos, redução dos custos operacionais e aumento da eficiência global do sistema elétrico (FERREIRA; NOBREGA, 2017).

Portanto, este estudo se justifica não apenas pela necessidade de aprimorar a manutenção e operação de sistemas elétricos industriais, mas também pela relevância de criar modelos sustentáveis e eficientes que promovam a continuidade da produção, a redução de custos e a segurança no ambiente de trabalho. Ao aplicar métodos de análise de confiabilidade em um estudo de caso real, é possível não só melhorar a gestão dos sistemas elétricos, mas também contribuir com novos conhecimentos para o campo da engenharia elétrica industrial, com vistas a práticas mais eficazes de gestão da confiabilidade e manutenção.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é analisar a confiabilidade dos sistemas elétricos em um ambiente industrial específico, avaliando os principais fatores que influenciam a ocorrência de falhas e propondo soluções para melhorar a eficiência e a continuidade das operações.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Identificar as principais falhas nos sistemas elétricos em um ambiente industrial.
2. Analisar as causas e consequências dessas falhas no processo produtivo.
3. Avaliar os métodos atuais de manutenção preventiva e corretiva utilizados na empresa.
4. Propor melhorias para otimizar a confiabilidade dos sistemas elétricos, reduzindo falhas e custos operacionais.
5. Desenvolver um modelo de confiabilidade aplicável a sistemas elétricos industriais, com base nas conclusões do estudo de caso.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho está organizada de forma a proporcionar uma análise detalhada e sequencial do tema abordado. O Capítulo 2 trata da revisão da literatura, que tem

como objetivo fornecer uma base teórica que sustente as análises e discussões subsequentes, além de contextualizar o estudo dentro do campo da engenharia elétrica. No Capítulo 3, será detalhada a metodologia utilizada neste estudo de caso, sendo apresentado a abordagem adotada para coleta e análise de dados, incluindo as técnicas e ferramentas utilizadas para avaliar a confiabilidade dos sistemas elétricos no ambiente industrial em questão.

O Capítulo 4 se destina à apresentação dos resultados e à discussão dos dados coletados. Neste capítulo, serão analisados os principais achados do estudo, incluindo as falhas mais recorrentes, suas causas e os impactos no funcionamento dos sistemas elétricos e no processo produtivo. Por fim, no Capítulo 5, será feita a conclusão do trabalho, que sintetiza os principais resultados obtidos e apresentará as proposições para melhorias na confiabilidade dos sistemas elétricos analisados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCEITO DE CONFIABILIDADE E SUA IMPORTÂNCIA

A confiabilidade de um sistema é definida como a capacidade do sistema de executar a função desejada sob condições operacionais especificadas e durante um período determinado, sem falhas (FRANKEL, 2012). A confiabilidade é determinante para garantir a continuidade do fornecimento de energia, a segurança dos trabalhadores e a integridade dos equipamentos.

O objetivo é minimizar falhas inesperadas que possam afetar a produtividade e a segurança, o que é especialmente relevante em ambientes industriais, onde a interrupção de serviços pode gerar perdas substanciais (RAPOSO, 2004). Além disso, em um contexto industrial cada vez mais complexo e dinâmico, a confiabilidade é fundamental para evitar que falhas no fornecimento de energia afetem a competitividade da empresa, uma vez que interrupções podem comprometer a entrega de produtos e a confiança dos clientes (CASSULA et al., 2003).

A confiabilidade é um fator essencial para o sucesso de operações industriais, influenciando diretamente três pilares essenciais: produtividade, segurança e custos operacionais. Em um cenário industrial, onde a eficiência e a continuidade das operações são fundamentais, a confiabilidade dos sistemas, especialmente o sistema elétrico, assume um papel central. A produtividade em ambientes industriais está diretamente relacionada à capacidade de manter as máquinas e equipamentos em operação contínua, pois sistemas elétricos confiáveis são essenciais para evitar interrupções não planejadas, que podem resultar em paradas de produção e perdas significativas (DHILLON, 2002). Segundo Blanchard, Verma e Peterson (1995), a implementação de práticas de manutenção preditiva, como o monitoramento contínuo de equipamentos, permite identificar potenciais falhas antes que elas ocorram, possibilitando intervenções planejadas durante períodos de menor atividade. Essa abordagem não apenas reduz os tempos de inatividade, mas também aumenta a eficiência operacional, garantindo que a produção ocorra de forma ininterrupta e dentro dos padrões de qualidade desejados.

Além disso, a confiabilidade dos sistemas elétricos está intimamente ligada à capacidade de atender às demandas de produção. Para Reason e Hobbs (2017), quando os sistemas operam de forma estável e previsível, as máquinas podem funcionar em sua capacidade máxima, sem o risco de sobrecargas ou falhas que possam comprometer o desempenho. Isso é particularmente importante em indústrias com processos contínuos, como

a siderurgia, a petroquímica e a fabricação de bens de consumo, onde qualquer interrupção pode resultar em perdas financeiras relevantes (SMITH; MOBLEY, 2011).

A segurança é outro aspecto influenciado pela confiabilidade dos sistemas industriais, pois os sistemas elétricos pouco confiáveis podem levar a falhas catastróficas, como curtos-circuitos, incêndios ou explosões, colocando em risco a vida dos trabalhadores e a integridade das instalações (VERRI, 2014). A implementação de práticas de manutenção preventiva e preditiva é essencial para garantir a segurança dos trabalhadores e das instalações. Para Prass e Nunes (2019), a detecção precoce de desgastes em componentes elétricos, como cabos e disjuntores, permite a substituição desses itens antes que ocorram falhas críticas. Além disso, a utilização de tecnologias avançadas, como sensores de monitoramento e sistemas de análise de dados em tempo real, pode fornecer alertas antecipados sobre condições anormais, permitindo a tomada de decisões proativas para evitar acidentes (KARDEC, NASCIF, 2009).

A confiabilidade também tem um impacto nos custos operacionais de uma indústria, pois reduzem a necessidade de reparos emergenciais, que são geralmente mais caros e disruptivos do que manutenções planejadas. Segundo De Souza et al. (2022), a manutenção corretiva, realizada após a ocorrência de falhas, tende a ser mais custosa devido à necessidade de paradas não programadas, substituição de peças danificadas e possíveis danos colaterais a outros componentes do sistema.

Por outro lado, a adoção de estratégias de manutenção preventiva e preditiva, baseadas em indicadores de confiabilidade, permite otimizar os custos de manutenção. Ao antecipar falhas e programar intervenções durante períodos de menor atividade, as empresas podem reduzir os custos associados a paradas de produção e minimizar o impacto financeiro das manutenções. Além disso, a confiabilidade dos sistemas elétricos contribui para a redução do consumo de energia, uma vez que equipamentos operando em condições ideais tendem a ser mais eficientes energeticamente (DE SOUZA et al., 2022).

Em resumo, a confiabilidade é um fator determinante para o sucesso de operações industriais, impactando diretamente a produtividade, a segurança e os custos operacionais. A implementação de práticas de manutenção preditiva e preventiva, aliada ao uso de tecnologias avançadas de monitoramento, é essencial para maximizar a confiabilidade dos sistemas e, consequentemente, o desempenho global das indústrias. Como destacado por Fogliatto e Ribeiro (2018), a confiabilidade não deve ser vista apenas como um requisito técnico, mas como uma estratégia competitiva que pode diferenciar as empresas em um mercado cada vez mais exigente.

2.2 FALHAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Os sistemas elétricos industriais na operação das plantas e processos produtivos garantem a distribuição de energia para diversos tipos de máquinas e equipamentos. No entanto, falhas nesses sistemas podem ter impactos devastadores na produção, segurança dos trabalhadores e custos operacionais. A identificação das falhas mais comuns, suas causas e as consequências delas para as operações industriais são essenciais para desenvolver estratégias eficazes de manutenção e aumentar a confiabilidade do sistema.

Um curto-círcito é um tipo de falha em que a corrente elétrica segue por um caminho não planejado, resultando em uma sobrecarga de corrente em um ponto do sistema, que geralmente ocorre quando há um contato inesperado entre condutores de potencial diferente, como fios de fases diferentes ou fase e terra (DA SILVA LESSE, 2019). No contexto industrial, os curtos-circuitos podem ser causados por defeitos no isolamento dos cabos, falhas em transformadores ou em disjuntores mal calibrados e as consequências podem danificar componentes de alto custo, como transformadores, geradores e motores, além de interromper a produção e em casos mais extremos, pode gerar incêndios ou até explosões, caso o sistema de proteção (como disjuntores e fusíveis) não funcione adequadamente (KASIKCI, 2018).

A sobrecarga elétrica ocorre quando a corrente elétrica ultrapassa a capacidade de condução do sistema ou de seus componentes (SILVA, 2023). A causa mais comum de sobrecarga é a excessiva demanda de energia em determinado momento, como quando múltiplas máquinas são ligadas simultaneamente, o que pode ser exacerbado pela falha nos dispositivos de proteção, como fusíveis e disjuntores, que não interrompem a corrente no momento adequado. A sobrecarga gera um aumento na temperatura dos componentes, o que pode provocar a degradação do isolamento, danos aos equipamentos e redução da vida útil dos mesmos e em ambientes industriais, isso pode resultar em paradas não programadas da produção e aumento dos custos de manutenção (GRÜTZMACHER, 2003).

Os transformadores são essenciais para ajustar a tensão elétrica nas instalações industriais e sua falha traz grandes consequências, já que ele pode afetar toda a distribuição de energia para a planta (MENDES, 1995). As principais causas de falha incluem o envelhecimento do equipamento, falta de manutenção preventiva, sobrecarga elétrica e problemas no sistema de resfriamento, caso o transformador não seja adequadamente refrigerado, ele pode superaquecer e falhar (BECHARA, 2010). As consequências de uma falha em um transformador são a interrupção imediata do fornecimento de energia para as máquinas,

o que resulta em parada da produção e altos custos de reparo ou substituição. Além disso, a substituição de um transformador danificado pode exigir semanas de espera e custos elevados.

Os dispositivos de proteção, como disjuntores e fusíveis, são projetados para interromper a corrente elétrica em caso de falha, evitando danos maiores ao sistema, porém, quando esses dispositivos falham ou não são adequadamente calibrados, o sistema elétrico pode não ser protegido contra curtos-circuitos e sobrecargas (SILVA, FLORIAN, 2022). Falhas nesses dispositivos podem ser causadas por defeitos de fabricação, desgaste devido ao uso prolongado ou instalações inadequadas, e a consequência imediata é a falha na proteção do sistema elétrico, o que pode levar a danos aos equipamentos e até incêndios em situações mais graves (BENTO, 2021).

As falhas na distribuição de energia envolvem problemas em toda a rede elétrica interna ou até mesmo na rede externa que fornece energia à planta, e pode ocorrer devido a danos nos cabos de distribuição, erros de conexão ou falhas em equipamentos de controle e automação (BENTO, 2021). Muitas vezes, essas falhas podem ser causadas por fatores externos, como condições climáticas adversas ou danos a estruturas de linhas de transmissão. Em um ambiente industrial, as falhas de distribuição de energia podem resultar em paradas imprevistas nos processos produtivos, com perda de materiais, tempo e produtividade e podem comprometer sistemas de controle que dependem de energia contínua para manter a operação (BECHARA, 2010), e estas estão indicadas na Tabela 1.

Tabela 1: Tipos de Falhas e Suas Causas e Consequências.

Tipo de Falha	Causas Comuns	Consequências
Curto-Círcuito	Danos a isolamentos, falhas em disjuntores, contato metálico	Queima de equipamentos, risco de incêndio, interrupção da produção
Sobrecarga Elétrica	Demanda excessiva de energia, falhas nos disjuntores	Danos a equipamentos, aumento de custos operacionais, risco de incêndio
Falha em Transformadores	Falta de manutenção, envelhecimento, sobrecarga	Interrupção do fornecimento de energia, custos elevados com substituição
Falha em Dispositivos de Proteção	Defeitos de fabricação, desgaste, instalação inadequada	Danos maiores aos sistemas, falha na proteção, aumento de danos e custos operacionais
Falha na Distribuição de Energia	Problemas externos na rede, falhas internas de distribuição	Perda de produção, danos a equipamentos, custos elevados para reparo de sistemas

Fonte: Elaboração própria (2025).

2.3 MANUTENÇÃO PREDITIVA, PREVENTIVA E CORRETIVA

A manutenção industrial é um fator essencial para a garantia da eficiência operacional, da segurança no ambiente de trabalho e da longevidade dos equipamentos e instalações produtivas. Sua correta aplicação permite minimizar falhas inesperadas, reduzir custos operacionais e aumentar a confiabilidade dos processos industriais. No contexto industrial, a manutenção pode ser classificada em diferentes categorias, de acordo com sua estratégia e objetivo.

A manutenção corretiva caracteriza-se pela intervenção realizada após a ocorrência de uma falha no equipamento ou sistema, e pode ser definida como a atividade que existe para corrigir falhas decorrentes dos desgastes ou deterioração de máquinas ou equipamentos (VIANA, 2002). Segundo Otani e Machado (2008), pode ser dividida em duas modalidades: planejada e não planejada, sendo a planejada aquela que ocorre quando há um acompanhamento do desgaste dos componentes, permitindo que a falha seja prevista e solucionada antes que cause impactos na produção. Por outro lado, a manutenção corretiva não planejada ocorre de forma emergencial, sem qualquer previsão, podendo resultar em

paralisações inesperadas e prejuízos operacionais (OLIVEIRA, 2019). Embora essa abordagem seja inevitável em alguns casos, sua aplicação excessiva pode ser prejudicial, pois está associada a altos custos de reparo e perda de produtividade, e por essa razão, muitas indústrias buscam reduzir sua dependência da manutenção corretiva, adotando estratégias mais preventivas e preditivas.

A manutenção preventiva consiste na realização de intervenções periódicas e sistemáticas nos equipamentos, com o objetivo de evitar falhas e prolongar sua vida útil (PRASS, NUNES, 2019). Segundo Machado et al. (2023), essas ações podem incluir inspeções, ajustes, lubrificação e substituições programadas de componentes sujeitos ao desgaste e a periodicidade da manutenção preventiva pode ser determinada com base no tempo de operação, na quilometragem percorrida ou em ciclos específicos de funcionamento dos equipamentos. A principal vantagem dessa abordagem é a redução do risco de falhas inesperadas, garantindo maior previsibilidade no planejamento industrial. No entanto, sua implementação exige um controle rigoroso dos ativos e um planejamento eficiente, pois a substituição prematura de peças pode gerar custos desnecessários (KARDEC, NASCIF, 2009).

A manutenção preditiva utiliza técnicas avançadas de monitoramento e análise de dados e parâmetros a fim de prever falhas e problemas operacionais antes que estes ocorram. Para Marques e Brito (2019), esta abordagem baseia-se na coleta contínua de informações sobre o estado dos equipamentos, permitindo a identificação de padrões que indicam desgaste ou degradação. Esse tipo de manutenção permite otimizar os recursos, reduzindo custos com intervenções desnecessárias e evitando paradas não programadas. No entanto, sua implementação requer investimentos em tecnologia e capacitação de profissionais, tornando-se mais adequada para empresas que operam em ambientes de alta criticidade (KARDEC, NASCIF, 2009).

A manutenção detectiva tem como objetivo identificar falhas ocultas em sistemas e equipamentos, especialmente naqueles relacionados à segurança e ao controle de processos, sendo essa abordagem essencial para garantir que dispositivos de proteção, como sensores, alarmes e sistemas de emergência, estejam em perfeito funcionamento (SILVA, 2023). A aplicação da manutenção detectiva é particularmente relevante em setores como a indústria química, aeroespacial e de energia, onde falhas em dispositivos de segurança podem resultar em acidentes graves e seu uso contribui para a confiabilidade das operações e a mitigação de riscos (DE ALMEIDA JUNIOR, PARRA, 2018).

A manutenção autônoma faz parte do conceito de *Total Productive Maintenance* (TPM) e envolve a participação direta dos operadores na conservação e inspeção dos equipamentos,

sendo que essa abordagem visa descentralizar parte das atividades de manutenção, capacitando os colaboradores para realizar pequenas intervenções, como limpeza, lubrificação e ajustes básicos (POMORSKI, 2004). O principal objetivo do TPM é reduzir desperdícios e garantir a máxima disponibilidade dos ativos industriais. Para isso, envolve a participação de todos os setores da organização, promovendo um ambiente de melhoria contínua e aumentando a competitividade da empresa no mercado. Além de contribuir para a redução do tempo de inatividade dos equipamentos, a manutenção autônoma promove maior conscientização dos funcionários sobre a importância da conservação dos ativos industriais (VENKATESH, 2007).

A escolha do tipo de manutenção a ser adotado em uma indústria deve levar em consideração fatores como criticidade dos equipamentos, custo de implementação e impacto na produtividade. A combinação de diferentes estratégias pode ser a solução ideal para garantir a eficiência operacional, minimizar falhas e reduzir custos de manutenção. Além disso, a adoção de tecnologias emergentes, como a manutenção preditiva baseada em inteligência artificial, representa uma tendência crescente na indústria moderna, permitindo a otimização dos processos e a melhoria contínua da gestão de ativos. A Tabela 2 ilustra as principais diferenças entre os tipos de manutenção na indústria.

Tabela 2 - Tipos de manutenção na indústria e suas características.

Tipo de Manutenção	Descrição	Quando é aplicada	Principais Benefícios	Principais Desvantagens
Corretiva	Realizada após a falha do equipamento. Pode ser planejada ou emergencial.	Quando o equipamento apresenta falha e precisa de reparo imediato.	Custo inicial menor (se comparado a manutenções preventivas e preditivas). Aplicável a equipamentos de baixa criticidade.	Pode gerar paradas inesperadas e impacto na produção. Alto custo de reparos emergenciais. Redução da vida útil dos equipamentos.
Preventiva	Intervenção programada para evitar falhas, com inspeções periódicas.	Em equipamentos críticos para evitar falhas inesperadas.	Redução do risco de falhas inesperadas. Maior previsibilidade na produção. Prolonga a vida útil dos equipamentos.	Pode gerar custos desnecessários com substituição prematura de peças. Exige um planejamento rigoroso.
Preditiva	Monitoramento contínuo do desempenho dos equipamentos para prever falhas.	Quando há necessidade de reduzir custos com manutenção e evitar falhas não programadas.	Redução significativa de paradas inesperadas. Maior eficiência na gestão dos ativos. Optimização dos custos com manutenção.	Exige investimentos em sensores, software e tecnologia. Necessidade de profissionais qualificados para análise dos dados.

Tipo de Manutenção	Descrição	Quando é Aplicada	Principais Benefícios	Principais Desvantagens
Detectiva	Identificação de falhas ocultas em sistemas de segurança e controle.	Aplicada em dispositivos de segurança para garantir seu funcionamento adequado.	Redução do risco de acidentes. Aumento da confiabilidade dos sistemas de segurança. Prevenção de falhas críticas.	Exige inspeções regulares e monitoramento rigoroso. Pode ser dispendiosa dependendo da complexidade do sistema.
TPM (Manutenção Produtiva Total)	Estratégia integrada que envolve toda a equipe na manutenção e melhoria contínua.	Aplicada em indústrias que buscam excelência operacional e alta disponibilidade dos ativos.	Redução de falhas e desperdícios. Envolvimento de todos os setores na manutenção. Melhoria contínua dos processos produtivos.	Exige mudanças culturais na organização. Implementação gradual e de longo prazo. Necessidade de treinamento e engajamento da equipe.

Fonte: Elaboração própria (2025).

2.4 MODELOS DE ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

A análise de confiabilidade é um processo fundamental para assegurar a continuidade operacional e otimizar a eficiência de sistemas elétricos, especialmente em ambientes industriais. Diversos modelos e metodologias são empregados para avaliar a confiabilidade, prever falhas e implementar estratégias de mitigação. Esses modelos podem ser classificados em abordagens qualitativas e quantitativas, cada uma com suas particularidades e aplicações específicas.

Um dos modelos mais comuns e com maior adesão na indústria é a manutenção preventiva, que desempenha um papel fundamental na garantia da confiabilidade e segurança dos sistemas elétricos, sendo uma estratégia essencial para a mitigação de falhas e a otimização do desempenho operacional. De acordo com Lins et al. (2019), a principal vantagem da manutenção preventiva é a redução de falhas imprevistas, as quais, se não tratadas, podem resultar em custos elevados, interrupções na produção e riscos à segurança dos operadores. Esse modelo é amplamente utilizado em equipamentos críticos, como transformadores, geradores e sistemas de distribuição de energia, nos quais intervenções regulares são essenciais para prevenir falhas catastróficas e garantir a continuidade dos processos industriais.

Além disso, a manutenção preventiva é particularmente eficaz em componentes sujeitos a desgaste previsível ou com vida útil determinada, como motores elétricos e sistemas de transmissão. A evolução tecnológica tem permitido o aprimoramento dessa abordagem por meio da implementação de monitoramento remoto, utilizando sensores de vibração, temperatura e corrente elétrica. Na visão de Taylor e Jones (2020), essa prática possibilita a obtenção de dados em tempo real sobre as condições operacionais dos equipamentos, permitindo que intervenções sejam planejadas de maneira precisa antes que falhas críticas se manifestem. Dessa forma, a manutenção preventiva não apenas reduz custos com reparos emergenciais, mas também aumenta a eficiência e a vida útil dos ativos industriais.

A Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA – *Failure Modes and Effects Analysis*) é uma metodologia estruturada e qualitativa amplamente utilizada para identificar e avaliar possíveis modos de falha em um sistema, analisando seus efeitos no desempenho e investigando suas possíveis causas. Essa abordagem é especialmente aplicada em ambientes industriais, onde a complexidade dos sistemas exige uma avaliação minuciosa para determinar quais falhas podem gerar as consequências mais severas, assim, o FMEA permite a

implementação de ações corretivas de forma eficiente, reduzindo riscos operacionais e melhorando a confiabilidade dos processos (CHEN et al., 2023).

Segundo Borges et al. (2021), a aplicação do FMEA é essencial para a melhoria contínua, pois possibilita a priorização dos modos de falha com base em três fatores: a severidade dos efeitos, a probabilidade de ocorrência e a capacidade de detecção. A abordagem sistemática não apenas auxilia na prevenção de falhas, mas também contribui para a otimização da manutenção industrial, a redução de custos operacionais e o aumento da segurança dos sistemas produtivos.

A Análise de Árvores de Falha (*Fault Tree Analysis – FTA*) é uma técnica quantitativa e gráfica amplamente utilizada para modelar e investigar as causas de falhas em sistemas complexos. Segundo Simões Filho (2006), esse método parte da identificação de um evento de falha específico, denominado evento topo, e estrutura, de forma hierárquica, os fatores que podem contribuir para sua ocorrência. Cada ramificação da árvore representa um evento ou condição que, direta ou indiretamente, pode levar à falha do sistema. Na visão de Lins et al. (2019), a FTA é uma das ferramentas mais eficazes para compreender a interdependência entre eventos e componentes, proporcionando uma visão clara das relações causais e auxiliando na tomada de decisões estratégicas para a mitigação de falhas.

A aplicação da Análise de Árvores de Falha possibilita que engenheiros e técnicos de manutenção identifiquem as causas primárias das falhas no sistema, permitindo a implementação de ações corretivas e preventivas de forma mais eficiente. No setor elétrico, por exemplo, a FTA pode ser empregada na modelagem de falhas potenciais que possam resultar em interrupções no fornecimento de energia, como falhas em disjuntores, sobrecargas em transformadores ou defeitos em cabos de transmissão (PATIL et al., 2018).

Além das abordagens qualitativas, os modelos quantitativos desempenham um papel crucial na análise de confiabilidade de sistemas elétricos, utilizando métodos matemáticos para calcular a probabilidade de falhas e otimizar estratégias de manutenção.

Um dos modelos quantitativos mais utilizados é o Modelo de Séries e Paralelos, que calcula a confiabilidade de sistemas compostos por componentes interligados em série ou paralelo, sendo que quando ocorrer a falha de qualquer componente resulta na falha do sistema como um todo, uma vez que todos os elementos são interdependentes (LOBO, 2021). Por outro lado, no modelo paralelo, o sistema continua funcionando mesmo que um componente falhe, desde que pelo menos um dos componentes restantes permaneça operacional. Segundo Borges et al. (2021), essa característica torna o modelo paralelo mais robusto e confiável para sistemas críticos, como os de distribuição de energia.

Além do Modelo de Séries e Paralelos, distribuições estatísticas como a distribuição de Weibull e a distribuição exponencial são amplamente empregadas para modelar o tempo até a falha de componentes e sistemas (BARROS, 2013). A distribuição de Weibull é particularmente útil para analisar a vida útil de equipamentos como transformadores e geradores, fornecendo insights sobre a taxa de falhas ao longo do tempo. Meeker e Escobar (1998) discute sobre a flexibilidade da distribuição de Weibull permite sua aplicação em diversos cenários, desde sistemas com taxas de falha crescentes até aqueles com taxas constantes ou decrescentes.

Já a distribuição exponencial é frequentemente aplicada em sistemas onde a taxa de falhas é constante ao longo do tempo, sendo ideal para modelar componentes com baixo risco de falhas catastróficas. De acordo com Rausand e Hoyland (2004), essa distribuição é amplamente utilizada em sistemas simples e confiáveis, como circuitos eletrônicos básicos, onde a probabilidade de falha não aumenta notavelmente com o tempo.

Esses modelos quantitativos não apenas ajudam a antecipar a necessidade de manutenção, mas também permitem calcular o custo-benefício de estratégias de manutenção preventiva em comparação com a manutenção corretiva. A implementação de abordagens baseadas em modelos quantitativos tem se mostrado eficaz para maximizar a eficiência operacional e reduzir custos em sistemas elétricos industriais, conforme destacado por Ebeling (2010).

3. METODOLOGIA

A metodologia proposta para este trabalho está estruturada em etapas sequenciais e inter-relacionadas, com o objetivo de analisar a confiabilidade dos sistemas elétricos em um ambiente industrial e propor melhorias nas estratégias de manutenção.

3.1 DEFINIÇÃO DO AMBIENTE DE ESTUDO

A primeira etapa da pesquisa consistiu na seleção e caracterização do ambiente industrial que foi objeto de estudo. Para isso, optou-se por uma fábrica localizada na cidade de Uberlândia, Minas Gerais, que se destaca por sua relevância no setor industrial da região. A instalação foi identificada como uma unidade de produção de grande porte, com operações contínuas e dependência crítica de sistemas elétricos para o funcionamento de seus processos produtivos. Durante essa etapa, foram descritas as particularidades operacionais e estruturais da fábrica, com foco na infraestrutura elétrica que sustenta suas atividades.

Em seguida, foram identificados e analisados os sistemas elétricos envolvidos, incluindo redes de distribuição interna, transformadores, geradores de backup, painéis de controle e outros equipamentos considerados essenciais para a operação da fábrica. A criticidade desses sistemas foi avaliada com base em fatores como a dependência operacional, o impacto de possíveis falhas e a complexidade da interconexão entre os componentes. Por exemplo, verificou-se que a falha de um transformador principal poderia paralisar toda a produção, enquanto a indisponibilidade de um gerador de backup aumentaria o risco de interrupções prolongadas em caso de queda de energia externa.

Segundo Lins et al. (2019), a definição clara do ambiente industrial e dos sistemas elétricos envolvidos é essencial para orientar as etapas subsequentes da pesquisa, como a coleta de dados e a aplicação de modelos de análise de confiabilidade. A escolha da fábrica em Uberlândia permitiu um estudo aprofundado de um ambiente real, com desafios e características representativas do setor industrial brasileiro.

3.2 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada de forma abrangente, utilizando informações históricas e operacionais do sistema elétrico da fábrica localizada em Uberlândia, Minas Gerais. Essa etapa teve como objetivo reunir dados que permitissem uma análise detalhada da confiabilidade

do sistema e dos impactos das falhas, além de fornecer subsídios para a proposição de melhorias nas estratégias de manutenção. Para isso, foram coletados diversos tipos de dados, organizados em categorias específicas, conforme descrito a seguir.

Em primeiro lugar, foram obtidos os históricos de falhas e manutenções anteriores, que incluíram registros detalhados de falhas ocorridas nos últimos anos, as ações de manutenção realizadas para corrigi-las e o tempo médio entre falhas (MTBF - *Mean Time Between Failures*) dos principais componentes do sistema. Esses dados foram essenciais para identificar padrões de falhas, componentes mais suscetíveis a problemas e a eficácia das intervenções de manutenção já realizadas.

Em segundo lugar, foram coletados os parâmetros operacionais do sistema, que abrangeram informações sobre tensões, correntes, frequências, potências e outros indicadores de desempenho elétrico. Esses parâmetros foram obtidos por meio de registros de sistemas de monitoramento, relatórios operacionais e medições realizadas in loco. A análise desses dados permitiu avaliar o comportamento do sistema em condições normais de operação e identificar possíveis anomalias que poderiam indicar riscos de falhas. Além disso, foram compilados os registros de custos operacionais e perdas de produção associadas a falhas, que incluíram informações sobre os custos diretos e indiretos decorrentes de paradas não planejadas, reparos emergenciais e perdas de produtividade.

Por fim, foram analisados os relatórios desenvolvidos pela companhia de energia elétrica da cidade, que cuida do abastecimento e manutenção na fábrica, sendo estes sobre inspeção, manutenção e testes realizados nos sistemas elétricos, que continham informações sobre as condições dos equipamentos, os resultados de testes de desempenho e as recomendações técnicas para intervenções futuras.

A coleta desses dados foi realizada por meio de consultas a sistemas de gestão de manutenção, entrevistas com técnicos e engenheiros responsáveis pela operação da fábrica, e análise de documentos técnicos e operacionais. A organização e a sistematização dessas informações permitiram a criação de uma base de dados robusta, que serviu como insumo para as etapas subsequentes da pesquisa, como a análise de confiabilidade e a avaliação das estratégias de manutenção.

3.3 ANÁLISE DA CONFIABILIDADE

A análise de confiabilidade dos sistemas foi conduzida com base em dados reais provenientes da indústria em estudo, utilizando modelos matemáticos e ferramentas analíticas

para avaliar o desempenho e a probabilidade de falhas nos componentes sensíveis. O objetivo é identificar vulnerabilidades, mitigar riscos e otimizar a manutenção dos equipamentos elétricos, garantindo maior eficiência operacional.

- Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA): Esse método foi empregado para identificar e classificar os possíveis modos de falha nos componentes do sistema elétrico, avaliando suas causas, efeitos e impacto na operação industrial. Com base nesses resultados, foram definidas medidas corretivas e preventivas para minimizar riscos e aumentar a confiabilidade do sistema.
- Análise de Árvores de Falha (FTA): A FTA foi utilizada para modelar e compreender as causas raiz das falhas mais críticas, permitindo a visualização das interações entre diferentes componentes do sistema. Essa abordagem auxiliou na priorização das falhas que apresentam maior impacto na operação, facilitando a tomada de decisões estratégicas para a gestão da manutenção.
- Análise do Tempo Médio Entre Falhas (MTBF – Mean Time Between Failures): O cálculo do MTBF foi realizado com base nos registros históricos de falhas dos equipamentos, permitindo estimar a confiabilidade dos componentes ao longo do tempo. Essa métrica auxiliou a prever o comportamento dos ativos e definir intervalos adequados para a realização de manutenções preventivas, contribuindo para a redução de paradas não programadas e custos operacionais.

3.4 AVALIAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO

A avaliação das estratégias de manutenção adotadas pela empresa foi conduzida com o objetivo de identificar a eficácia das práticas implementadas, analisar seus impactos operacionais e propor melhorias para a otimização dos processos. Para isso, foi realizada uma comparação entre os diferentes modelos de manutenção, incluindo as abordagens preventiva, preditiva e corretiva, considerando dados reais obtidos da indústria em estudo.

Neste estudo, foram avaliadas as ações preventivas e preditivas na redução da frequência e gravidade das falhas, considerando métricas como a taxa de falhas evitadas, a melhoria na disponibilidade dos equipamentos e a relação entre os custos de manutenção e os benefícios obtidos com a diminuição de paradas inesperadas. Além disso, examinou-se o impacto da manutenção corretiva na operação industrial, com ênfase nos custos associados às falhas não planejadas, incluindo despesas com reparos emergenciais, perda de produtividade e tempo de inatividade do sistema. A relação entre a dependência de manutenção corretiva e a

necessidade de aprimoramento das estratégias preditivas e preventivas foi um ponto central da análise. Por fim, foram estudados aspectos como a frequência de falhas ao longo do tempo, a viabilidade de modernização dos equipamentos e a relação custo-benefício entre a manutenção contínua e a substituição programada de componentes. A análise dessas estratégias permitiu a identificação de oportunidades para otimizar os processos de manutenção, reduzir custos operacionais e aumentar a confiabilidade e a eficiência dos sistemas industriais.

3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E PROPOSTA DE MELHORIAS

A análise dos resultados foi realizada com base nos dados coletados da indústria em estudo, permitindo a avaliação da eficiência das estratégias de manutenção adotadas e a identificação de possíveis falhas nos processos. Foram comparados os impactos das abordagens corretiva, preventiva e preditiva, considerando fatores como a frequência de falhas, o tempo médio entre falhas (MTBF), os custos operacionais e a disponibilidade dos equipamentos. A partir dessa análise, foi possível verificar a eficácia das práticas implementadas e identificar oportunidades para otimização.

Com base nos resultados obtidos, foram elaboradas propostas de melhorias voltadas para o aprimoramento da gestão da manutenção. Essas sugestões incluíram a implementação de novas tecnologias de monitoramento, a revisão dos intervalos de manutenção preventiva, o fortalecimento das práticas preditivas e a definição de critérios mais rigorosos para a substituição de componentes. Além disso, foram recomendadas estratégias para minimizar a dependência da manutenção corretiva, visando a redução de custos e o aumento da confiabilidade dos sistemas. As propostas elaboradas buscaram não apenas mitigar as falhas identificadas, mas também estabelecer um modelo de manutenção mais eficiente e sustentável a longo prazo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados da análise dos dados coletados sobre as paradas na produção e sua relação com os sistemas elétricos da indústria estudada. O objetivo desta etapa é compreender a frequência e a severidade das falhas, avaliar seu impacto na eficiência operacional e propor soluções para mitigar suas consequências. A discussão dos resultados foi embasada em métricas quantitativas e qualitativas, correlacionando os eventos de falha com a produtividade e identificando padrões relevantes para a gestão da manutenção industrial.

4.1 Análise da Confiabilidade dos Sistemas Elétricos

A análise de confiabilidade dos sistemas elétricos da fábrica foi conduzida com base em dados reais coletados ao longo de meses de operação, utilizando ferramentas robustas como Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA), Análise de Árvores de Falha (FTA) e Tempo Médio Entre Falhas (MTBF). Essas metodologias permitiram identificar as principais vulnerabilidades do sistema elétrico, avaliar o impacto das falhas na produção e propor ações corretivas e preventivas para mitigar riscos e aumentar a eficiência operacional (MATOS; MILAN, 2009).

A aplicação do FMEA revelou que os principais modos de falha estão diretamente relacionados a variações de tensão de curta duração (VTCD), que são causadas por eventos externos como descargas atmosféricas, abalroamentos e religamentos automáticos (RAS). Esses eventos, embora de curta duração, têm um impacto na operação dos equipamentos críticos da fábrica, como transformadores, geradores de backup e painéis de controle. Em 21/11/2024, um evento de VTCD gerado por um RAS no equipamento religador R118285 resultou em uma interrupção momentânea na produção, causando uma queda de 90.411 unidades naquele dia.

O FMEA também destacou que os equipamentos mais sensíveis a essas variações são os transformadores principais, cuja falha pode paralisar toda a produção, e os geradores de backup, que, quando indisponíveis, aumentam o risco de interrupções prolongadas em caso de queda de energia externa. A análise identificou que a principal causa dessas falhas é a exposição da rede elétrica a fatores externos, como condições climáticas adversas e interferências físicas (por exemplo, contato de pássaros em para-raios). Além disso, a distância de 5,3 km entre a fábrica e a subestação Uberlândia 7 contribui para a maior suscetibilidade a flutuações na rede.

Com base nesses resultados, a fim de mitigar esses impactos, foi recomendada a instalação de dispositivos de proteção mais robustos, como disjuntores, e a implementação de sistemas de monitoramento contínuo, utilizando sensores.

A FTA foi utilizada para modelar e compreender as causas raiz das falhas mais críticas, permitindo uma visão detalhada das interações entre os diferentes componentes do sistema elétrico. A análise indicou que a distância da subestação aumenta a susceptibilidade do sistema a VTCD, especialmente em dia com condições climáticas adversas, como tempestades e ventos fortes. Além disso, como mostra a Figura 1, um VTCD vinculado a região de sensibilidade F, com um fator de ponderação de 0,36, é a mais crítica para a fábrica. Eventos nessa região, impactam de forma expressiva nos equipamentos.

Figura 1 – Mapa de estratificação das regiões de sensibilidade associadas a VTCD.

Amplitude (pu)	Duração									
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg]	(1 seg - 3 seg]	(3 seg - 1 min]	(1 min - 3 min)			
> 1,15 (1,10 - 1,15]	REGIÃO H				REGIÃO I					
(0,85 - 0,90] (0,80 - 0,85]	REGIÃO A				REGIÃO G					
(0,70 - 0,80] (0,60 - 0,70] (0,50 - 0,60] (0,40 - 0,50]	REGIÃO B	REGIÃO D		REGIÃO F						
(0,30 - 0,40] (0,20 - 0,30] (0,10 - 0,20]	REGIÃO C	REGIÃO E								
< 0,10										

Fonte: Cemig (2025).

Em 03/01/2025, um curto-circuito causado por um contato de pássaro em um para-raios na subestação gerou uma interrupção prolongada, resultando em uma queda de 142.978 unidades produzidas.

Ao aplicar a FTA, destacou-se a importância de priorizar a manutenção dos equipamentos mais críticos, como transformadores e geradores de backup. Segundo Moubray (1997), a Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) é uma abordagem eficaz para priorizar a manutenção de equipamentos críticos, focando naqueles que têm maior impacto na operação e nos custos da empresa. Além de implementar medidas para reduzir a dependência da rede externa, como a instalação de sistemas de armazenamento de energia ou a modernização dos equipamentos existentes, visto que a adoção de fontes de energia alternativas, como energia solar e eólica, pode complementar o fornecimento de energia da

rede externa, reduzindo custos e aumentando a autonomia energética (ABUALIGAH et al., 2022). Kabir et al. (2018) destacam que a energia solar é uma opção viável e sustentável para sistemas industriais.

O cálculo do MTBF para os equipamentos críticos é realizado conforme Equação 1:

$$MTBF = \frac{\text{Tempo Total de Operação}}{\text{Número de Falhas do Período}}$$

Neste estudo, foi analisado o cenário do mês de janeiro de 2025, com 28 dias de trabalho e 3 dias de interrupção, com dados evidenciados na Tabela 3.

Tabela 3 - Cálculo do MTBF utilizando dados de Janeiro/2025.

Indicador	Cálculo	Valor obtido
Tempo Total de Operação	28 dias x 8 horas	224 horas
MTBF	224/3	74,6 hora/falha
Taxa de Falhas (λ)	1/74,6	0,0134 falhas/hora
Disponibilidade (A)	(224/221) × 100	98,66%

Fonte: Elaboração própria com dados coletados na empresa (2025).

Os resultados obtidos para o mês de janeiro de 2025 demonstraram uma frequência de falhas significativamente acima dos níveis considerados aceitáveis para operação segura e eficiente. Durante este período, foram registradas três interrupções no sistema elétrico, resultando em paradas não programadas da produção. O cálculo do Tempo Médio Entre Falhas (MTBF) revelou um valor de apenas 74,67 horas, indicando que o sistema apresentava falhas em média a cada três dias úteis de operação (considerando jornada diária de 8 horas).

Em 21 de novembro de 2024, a produção foi interrompida devido a um Religamento Automático Satisfatório (RAS) no equipamento religador R118285, resultando em uma queda significativa na produção. Esse evento, assim como os ocorridos em janeiro de 2025, evidenciou que a estratégia de manutenção preventiva adotada atualmente é insuficiente para garantir a confiabilidade necessária ao sistema elétrico, especialmente durante períodos de maior incidência de chuvas, quando a rede elétrica fica particularmente vulnerável a descargas atmosféricas e variações de tensão de curta duração (VTCD).

A análise dos dados mostrou um padrão sazonal bem definido, com aumento na ocorrência de falhas nos meses chuvosos de ambos os anos analisados. O MTBF calculado de 74,67 horas para janeiro de 2025 representa um indicador crítico, demonstrando que o sistema

opera no limite de sua confiabilidade. Quando comparado com os valores registrados em 2024, fica evidente a progressão do problema, exigindo medidas corretivas imediatas. Considerando que cada falha resultou em aproximadamente uma hora de inatividade, a disponibilidade do sistema ficou em 98,66%, porém este valor não reflete adequadamente o impacto real nas operações, já que falhas elétricas podem gerar paralisações mais prolongadas e danos cumulativos aos equipamentos.

A análise de confiabilidade revelou que as principais vulnerabilidades estão relacionadas a eventos externos, como descargas atmosféricas e abalroamentos, que causam variações de tensão de curta duração (VTCD). Esses eventos tiveram um impacto na produção, como ficou evidente nos dias críticos analisados, tanto em 2024 quanto em 2025. As ferramentas utilizadas, incluindo FMEA, FTA e MTBF, permitiram identificar as causas raiz das falhas e propor ações corretivas e preventivas para aumentar a resiliência do sistema.

4.2 Avaliação das Estratégias de Manutenção

A avaliação das estratégias de manutenção adotadas pela fábrica revelou que a manutenção corretiva ainda é a abordagem predominante, o que resulta em custos operacionais elevados e aumento do tempo de inatividade dos equipamentos. Em contraste, a manutenção preventiva e preditiva demonstrou ser mais eficaz na redução da frequência de falhas e na melhoria da disponibilidade dos equipamentos, garantindo uma operação mais estável e contínua.

A Cemig, responsável pelo fornecimento de energia elétrica, realizou diversas ações de manutenção preventiva ao longo de 2024, com o objetivo de garantir a qualidade e a continuidade do fornecimento de energia, com as principais ações realizadas evidenciadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Ações de manutenção realizadas pela distribuidora de energia.

Ações	Descrição
Inspeções Visuais e Térmicas	Foram realizadas inspeções periódicas nas linhas de distribuição para identificar possíveis pontos de falha, como cabos danificados, isoladores defeituosos e conexões soltas. Essas inspeções permitiram a detecção precoce de problemas que poderiam levar a interrupções no fornecimento de energia.
Poda de Árvores e Limpeza de Faixa	A vegetação próxima às linhas de transmissão foi podada regularmente para evitar que galhos e folhas entrassem em contato com os cabos, o que poderia causar curtos-circuitos e interrupções no fornecimento de energia.
Substituição de Equipamentos	Componentes críticos, como cruzetas, isoladores e postes, foram substituídos preventivamente para evitar falhas inesperadas. Essa ação foi especialmente importante em áreas com histórico de problemas recorrentes.

Fonte: Dados coletados (2025).

Apesar desses esforços, os eventos de variações de tensão de curta duração (VTCD) ainda ocorrem com frequência, principalmente devido a fatores externos que estão fora do controle direto da distribuidora. Por exemplo, em 03/01/2025, um curto-círcuito causado por um contato de pássaro em um para-raios na subestação resultou em uma interrupção prolongada no fornecimento de energia, afetando diretamente a produção da fábrica. Esse evento destacou a limitação das ações preventivas tradicionais em lidar com eventos imprevisíveis, como descargas atmosféricas e abalroamentos.

A manutenção preditiva utiliza sensores e sistemas de análise de dados em tempo real para monitorar parâmetros essenciais, como tensão, corrente, temperatura e vibração dos equipamentos. Esses dados são processados por algoritmos avançados, capazes de identificar padrões de comportamento anormais, o que permite a detecção precoce de possíveis falhas e a intervenção proativa da equipe de manutenção. Por exemplo, a instalação de sensores em equipamentos críticos, como transformadores e geradores de backup, poderia fornecer informações em tempo real sobre seu estado operacional. Isso permitiria que a equipe de manutenção atue de forma preventiva, evitando falhas antes que ocorram. Além disso, a análise preditiva poderia ser utilizada para prever a vida útil restante de componentes essenciais, como disjuntores e transformadores, permitindo a substituição programada antes que atinjam o fim de sua vida útil. Essa abordagem não apenas aumenta a confiabilidade dos sistemas, mas também otimiza os custos de manutenção.

No entanto, a análise revelou que a fábrica ainda depende excessivamente da manutenção corretiva, que é acionada apenas após a ocorrência de uma falha. Essa abordagem reativa gera custos elevados com reparos emergenciais e resulta em perda de produtividade devido ao tempo de inatividade dos equipamentos. A transição para uma estratégia de manutenção preditiva exigiria investimentos iniciais em tecnologia e treinamento da equipe, mas os benefícios a longo prazo são expressivos. Entre eles, destacam-se a redução de custos operacionais, o aumento da disponibilidade dos equipamentos e a melhoria da eficiência produtiva, o que justifica plenamente esses investimentos.

A análise dos custos associados às falhas e interrupções no fornecimento de energia evidenciou que as paradas não planejadas têm um impacto nas operações da fábrica. Eses custos abrangem tanto despesas diretas, como reparos emergenciais e substituição de componentes danificados, quanto custos indiretos, incluindo perda de produtividade e tempo de inatividade dos equipamentos, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Registro de Falhas e Impacto na Produção

Data	Tipo de Falha	Tempo de Parada (min)	Produção Perdida (unid)
21/11/2024	Religamento Automático (RAS)	92	90.411
03/01/2025	Curto-circuito (Para-raios)	110	142.978
09/01/2025	Falha no Transformador	78	85.320
20/01/2025	Oscilação de Tensão	45	65.789

Fonte: Dados coletados na empresa (2025).

Nota-se que um evento ocorreu em 03/01/2025, quando um curto-círcito na subestação causou uma interrupção prolongada no fornecimento de energia, resultando em uma queda de produção de 142.978 unidades. Além de afetar diretamente a receita da fábrica, o evento gerou custos adicionais com a necessidade de equipe de manutenção emergencial, ocasionando horas extras no trabalho que geram maior recompensa financeira e a compra de peças de reposição. A perda de produtividade durante o período de inatividade também comprometeu a capacidade da fábrica de atender à demanda dos clientes, impactando negativamente a satisfação e a confiança deles.

Outro evento relevante ocorreu em 21/11/2024, quando um evento de variação de tensão de curta duração (VTCD), causado por um religamento automático satisfatório (RAS)

no equipamento religador R118285, resultou em uma interrupção momentânea na produção. Embora a duração da interrupção tenha sido breve, o impacto na produção foi considerável, com uma queda de 90.411 unidades naquele dia. Esse tipo de evento, mesmo de curta duração, pode se acumular ao longo do tempo, gerando perdas financeiras expressivas e afetando a eficiência operacional da fábrica.

A análise dos custos operacionais reforçou a importância de reduzir a dependência da manutenção corretiva e investir em estratégias mais proativas, como a manutenção preventiva e preditiva. A implementação de medidas como a instalação de sistemas de monitoramento contínuo, a revisão dos intervalos de manutenção preventiva e a substituição programada de componentes críticos pode reduzir de forma considerável os custos associados às falhas e interrupções. Essas ações não apenas minimizam os gastos com reparos emergenciais, mas também aumentam a disponibilidade dos equipamentos e a eficiência produtiva, garantindo maior competitividade e sustentabilidade para a fábrica.

A avaliação das estratégias de manutenção adotadas pela fábrica revelou que a manutenção corretiva ainda é a abordagem predominante. Essa prática, que consiste em intervir apenas após a ocorrência de falhas, resulta em custos operacionais elevados e aumento do tempo de inatividade dos equipamentos. Em contraste, a manutenção preventiva e preditiva demonstrou ser mais eficaz, contribuindo para a redução da frequência de falhas e a melhoria da disponibilidade dos equipamentos, garantindo uma operação mais estável e contínua.

A implementação de tecnologias de monitoramento contínuo e análise preditiva surge como uma solução estratégica para antecipar falhas e evitar paradas não planejadas. Essas tecnologias permitem o monitoramento em tempo real de parâmetros críticos, como tensão, corrente e temperatura, e utilizam algoritmos avançados para identificar padrões de comportamento anormais. Com isso, é possível intervir de forma proativa, reduzindo os custos operacionais e aumentando a eficiência da produção. Além disso, a revisão dos intervalos de manutenção preventiva e a substituição programada de componentes críticos, como transformadores e geradores de backup, podem aumentar significativamente a confiabilidade dos sistemas elétricos.

A transição para uma estratégia de manutenção mais proativa, que combine abordagens preventivas e preditivas, exigirá investimentos iniciais em tecnologia e treinamento da equipe. No entanto, os benefícios a longo prazo justificam plenamente esses investimentos. Entre eles, destacam-se a redução de custos operacionais, o aumento da disponibilidade dos equipamentos e a melhoria da eficiência produtiva. A adoção de um modelo de manutenção que integre essas

práticas não apenas garantirá a confiabilidade dos sistemas elétricos, mas também fortalecerá a competitividade e a sustentabilidade da fábrica.

4.3 Propostas de Melhorias

Com base nos resultados das análises de confiabilidade e da avaliação das estratégias de manutenção, foram propostas diversas melhorias para aumentar a confiabilidade dos sistemas elétricos e otimizar as práticas de manutenção na fábrica. Essas propostas visam reduzir a ocorrência de falhas, minimizar os custos operacionais e garantir a continuidade da produção, mesmo em situações adversas.

4.3.1 Monitoramento Contínuo da Qualidade da Energia

Uma das principais propostas é a instalação de sistemas de monitoramento contínuo, que permitirão a detecção precoce de variações de tensão de curta duração (VTCD) e outras anomalias na rede elétrica. Segundo Dos Santos (2014), esses sistemas utilizam sensores inteligentes instalados em pontos estratégicos, como transformadores, geradores de backup e painéis de controle, para monitorar parâmetros como tensão, corrente, frequência e temperatura em tempo real. Os dados coletados são processados por um sistema central de análise, que alerta a equipe de manutenção sobre qualquer desvio dos valores normais de operação.

A análise de dados em tempo real possibilita a identificação de padrões anormais, como picos de tensão ou quedas de corrente, que podem indicar problemas iminentes (IBRAHIM et al., 2024). Por exemplo, um aumento gradual na temperatura de um transformador pode sinalizar uma sobrecarga ou falha iminente, permitindo que a equipe de manutenção intervenha antes que o equipamento pare de funcionar. Além disso, a integração com sistemas de gestão de manutenção (CMMS) permite a geração automática de ordens de serviço quando anomalias são detectadas, otimizando a eficiência das ações de manutenção.

4.3.2 Revisão dos Intervalos de Manutenção Preventiva

Outra proposta importante é a revisão dos intervalos de manutenção preventiva com base no tempo médio entre falhas (MTBF) dos equipamentos. Atualmente, a manutenção preventiva é realizada em intervalos fixos, que nem sempre correspondem às necessidades reais dos equipamentos. Com o cálculo do MTBF, será possível definir intervalos mais precisos para a substituição programada de componentes críticos (SELLITTO, 2005). Por exemplo, se o

MTBF de um transformador é de 1.200 horas, a substituição de componentes pode ser programada para ocorrer a cada 1.000 horas, reduzindo o risco de falhas inesperadas.

Em equipamentos com histórico de falhas recorrentes, como geradores de backup, as inspeções podem ser realizadas com maior frequência, incluindo verificações visuais, testes de desempenho e medições de parâmetros elétricos, como resistência de isolamento e corrente de fuga. A implementação de indicadores de desempenho, como a taxa de falhas evitadas e a disponibilidade dos equipamentos, permitirá avaliar a eficácia das ações de manutenção e ajustar os intervalos conforme necessário (SANTOS; DOS SANTOS, 2018).

4.3.3 Fortalecimento da Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva utiliza dados históricos e modelos matemáticos para prever falhas e evitar paradas não planejadas, pois essa estratégia é fundamental para reduzir a dependência da manutenção corretiva e aumentar a confiabilidade dos sistemas elétricos (BASRI, 2017). A fábrica deste estudo possui um vasto conjunto de dados históricos sobre falhas e interrupções, que podem ser utilizados para treinar modelos preditivos, e esses modelos serão capazes de identificar padrões de falhas e prever quando e onde problemas podem ocorrer. Assim, se os dados indicam que transformadores tendem a falhar após um certo número de horas de operação sob alta carga, o sistema poderá alertar a equipe de manutenção para realizar inspeções antes que a falha ocorra.

A implementação de sistemas baseados em inteligência artificial (IA) e machine learning permitirá a análise automatizada de grandes volumes de dados, identificando tendências e anomalias que podem passar despercebidas em análises manuais, pois esses sistemas podem, por exemplo, prever a vida útil restante de um componente com base em seu histórico de operação e condições atuais. (KELEKO et al., 2022).

4.3.4 Redução da Dependência da Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva, que é acionada apenas após a ocorrência de uma falha, ainda é a abordagem predominante na fábrica, no entanto, essa estratégia resulta em custos elevados com reparos emergenciais e aumento do tempo de inatividade. Para reduzir essa dependência, foram propostas medidas como a substituição programada de componentes críticos e a modernização dos equipamentos.

A substituição programada de componentes que estão próximos do fim de sua vida útil, como transformadores e geradores de backup, pode evitar falhas inesperadas (DE SOUSA et

al., 2022). Além disso, a modernização dos equipamentos, com a instalação de componentes mais robustos e tecnologias mais avançadas, pode aumentar sua confiabilidade e reduzir a necessidade de manutenção corretiva. Outra medida importante é a implementação de geradores de backup e sistemas de armazenamento de energia, como baterias de grande capacidade, que podem fornecer energia temporária durante as quedas de energia, garantindo a continuidade da produção.

Com base nas propostas analisadas, as estratégias de melhoria buscam integrar tecnologias avançadas, otimizar os processos de manutenção e reduzir os custos operacionais. A seguir, na Tabela 6, estão detalhadas as principais propostas que visam aprimorar a confiabilidade dos sistemas elétricos e garantir a continuidade da produção. As ações propostas contemplam tanto a implementação de novas tecnologias quanto ajustes nas práticas de manutenção existentes, oferecendo soluções para cada desafio identificado ao longo da análise.

Tabela 6 - Resumo das Propostas de Melhorias

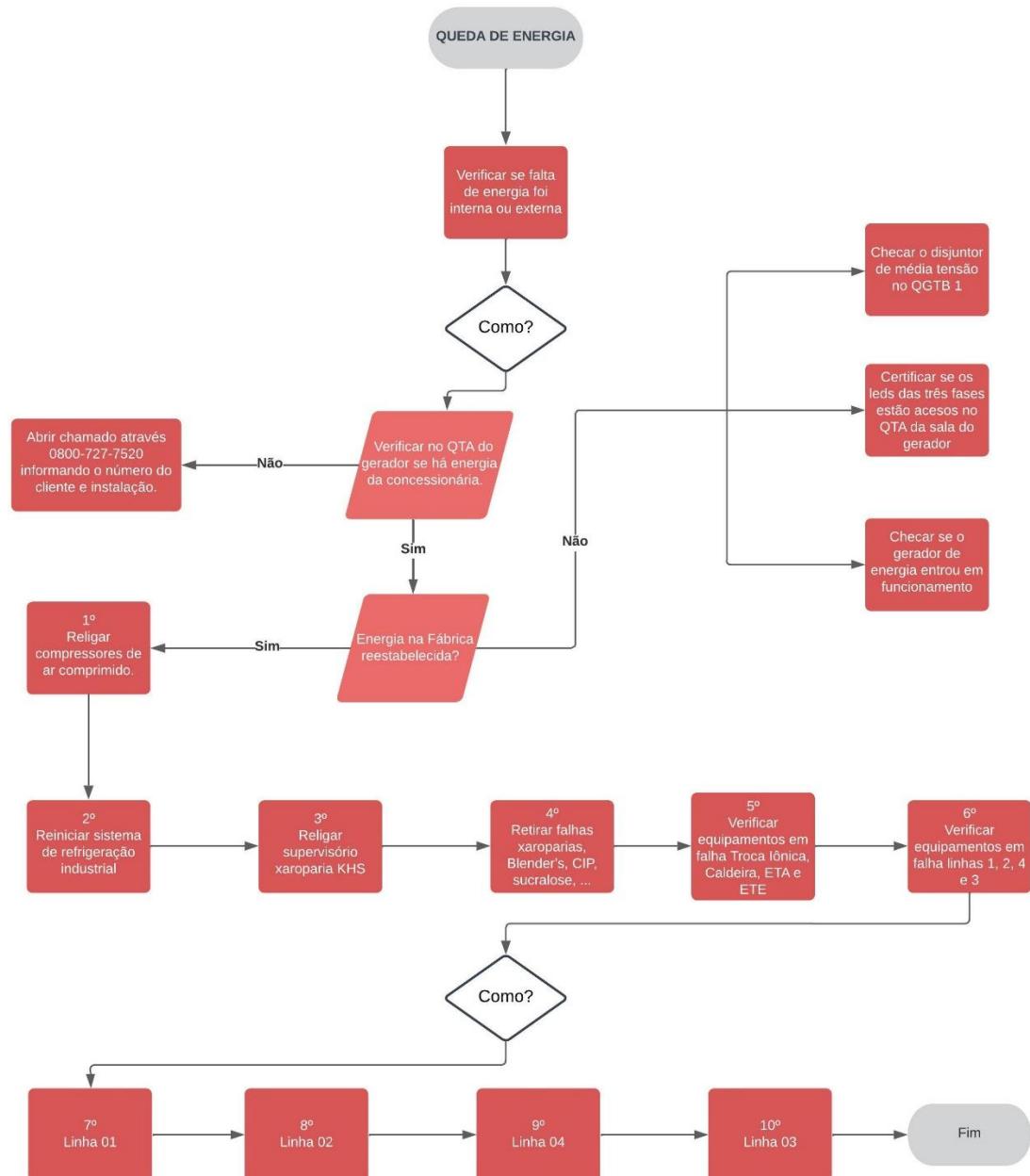
Categoría	Descrição	Ações Específicas	Benefícios Esperados
Análise de Confiabilidade	Identificação das principais vulnerabilidades e causas de falhas.	Aplicação de FMEA (Análise de Modos de Falha e Efeitos).	Melhoria na confiabilidade dos equipamentos.
		Uso de FTA (Análise de Árvores de Falha).	
		Entendimento das causas raiz das falhas.	Redução de falhas.
		Cálculo do MTBF (Tempo Médio Entre Falhas).	
Estratégias de Manutenção	Avaliação das práticas atuais de manutenção.	Priorização de ações corretivas e preventivas.	
		Manutenção Preventiva (inspeções, substituição de componentes).	Redução da frequência de falhas.
		Manutenção Corretiva (reparos emergenciais).	Melhoria na disponibilidade dos equipamentos.
Implementação de Tecnologias de Monitoramento	Uso de sensores e sistemas de análise de dados em tempo real.	Manutenção Preditiva (monitoramento em tempo real).	
		Instalação de sensores para monitorar tensão, corrente e temperatura.	Detecção precoce de anomalias.
Revisão dos Intervalos de Manutenção Preventiva	Ajuste dos intervalos de manutenção com base no MTBF.	Integração com sistemas de gestão de manutenção (CMMS).	Redução de paradas não planejadas.
		Substituição programada de componentes críticos (transformadores, geradores).	Redução do risco de falhas inesperadas.
Fortalecimento da Manutenção Preditiva	Uso de dados históricos e modelos matemáticos para prever falhas.	Inspeções mais frequentes em equipamentos sensíveis.	Aumento da confiabilidade dos sistemas.
		Análise de dados históricos para prever falhas.	Antecipação de falhas e intervenção proativa.
		Implementação de IA e machine learning para análise preditiva.	Redução de custos com reparos emergenciais.
		Alertas automatizados para a equipe de manutenção.	

Fonte: Elaboração própria (2025).

4.3.5 Otimização do Processo de Religamento Automático

A análise dos eventos de interrupção no sistema elétrico demonstrou que os processos de religamento automático representam um momento crítico para a estabilidade operacional da planta industrial. Durante as ocorrências analisadas em 2024 e 2025, observou-se que a eficiência no restabelecimento do fornecimento energético após falhas está diretamente relacionada à redução dos impactos na produção e neste contexto, o fluxograma apresentado na Figura 2 foi criado.

Figura 2 – Passo a passo para religamento da energia.



Fonte: Elaboração própria (2025).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal analisar a confiabilidade dos sistemas elétricos em um ambiente industrial, utilizando como estudo de caso uma fábrica de grande porte localizada em Uberlândia, Minas Gerais. A pesquisa permitiu identificar as principais falhas, suas causas e impactos na produção, além de avaliar as estratégias de manutenção adotadas e propor melhorias para aumentar a eficiência e a continuidade das operações.

Os resultados demonstraram que as falhas mais recorrentes estão associadas a variações de tensão de curta duração (VTCD), frequentemente causadas por fatores externos, como descargas atmosféricas e curtos-circuitos. A análise utilizando metodologias como FMEA, FTA e MTBF evidenciou que a predominância da manutenção corretiva na fábrica resulta em custos operacionais elevados e maior tempo de inatividade dos equipamentos. Além disso, a distância da subestação e a exposição a condições climáticas adversas foram identificadas como fatores críticos que aumentam a suscetibilidade do sistema a falhas.

Com base nessas conclusões, foram propostas melhorias estratégicas, como a implementação de sistemas de monitoramento contínuo da qualidade da energia, a revisão dos intervalos de manutenção preventiva com base no MTBF, o fortalecimento da manutenção preditiva por meio de tecnologias avançadas (como inteligência artificial e machine learning) e a redução da dependência da manutenção corretiva. Essas medidas visam não apenas mitigar as falhas identificadas, mas também otimizar os custos operacionais, aumentar a disponibilidade dos equipamentos e garantir maior segurança no ambiente de trabalho.

A adoção dessas estratégias tem o potencial de transformar a gestão da manutenção na fábrica, tornando-a mais proativa e eficiente. Além disso, este estudo contribui para o campo da engenharia elétrica industrial, destacando a importância da confiabilidade dos sistemas elétricos como um fator crítico para a competitividade e a sustentabilidade das operações industriais.

Como desdobramentos naturais desta pesquisa, destacam-se importantes direções para trabalhos futuros. A integração de fontes renováveis de energia, como sistemas fotovoltaicos, merece investigação aprofundada como forma de reduzir a dependência da rede externa e aumentar a resiliência do sistema. O desenvolvimento de modelos preditivos mais sofisticados, utilizando técnicas de deep learning para análise de grandes volumes de dados operacionais, pode trazer avanços na precisão das previsões de falha. A avaliação da viabilidade técnica e econômica de sistemas de armazenamento de energia em larga escala constitui outra frente

promissora de pesquisa, particularmente relevante para mitigar os impactos de interrupções no fornecimento.

A implementação das melhorias propostas neste trabalho representa uma transformação estratégica na gestão da manutenção, com potencial para elevar notavelmente a confiabilidade dos sistemas elétricos industriais. A transição de uma abordagem reativa para um modelo preditivo e preventivo, aliada à incorporação de tecnologias digitais avançadas, não apenas reduzirá custos operacionais e aumentará a disponibilidade dos equipamentos, mas também fortalecerá a competitividade da empresa no mercado.

Os conhecimentos gerados nesta pesquisa podem servir como base para estudos similares em outros contextos industriais, contribuindo para o desenvolvimento de práticas mais eficientes de gestão da confiabilidade em sistemas elétricos. Diante disto, este trabalho reforça a necessidade de investimentos em tecnologias e práticas de manutenção inovadoras, que garantam a confiabilidade dos sistemas elétricos industriais e assegurem a continuidade da produção, minimizando impactos financeiros e operacionais. A implementação das propostas apresentadas representa um passo importante em direção a uma operação industrial mais eficiente, segura e sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUALIGAH, Laith et al. Wind, solar, and photovoltaic renewable energy systems with and without energy storage optimization: A survey of advanced machine learning and deep learning techniques. **Energies**, v. 15, n. 2, p. 578, 2022.

BARROS, Jocilene Dantas. Sazonalidade do vento na cidade de Natal/RN pela distribuição de Weibull. **Sociedade e Território**, v. 25, n. 2, p. 78-92, 2013.

BASRI, Ernnie Illyani et al. Preventive maintenance (PM) planning: a review. **Journal of quality in maintenance engineering**, v. 23, n. 2, p. 114-143, 2017.

BECHARA, Ricardo. **Análise de falhas de transformadores de potência**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BENTO, Ana Rafaela Figueiredo. **Análise e desenvolvimento de dispositivos de proteção aplicados a micro-redes de corrente contínua**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade da Beira Interior (Portugal).

BLANCHARD, Benjamin S.; VERMA, Dinesh; PETERSON, Elmer L. **Maintainability: A key to effective serviceability and maintenance management**. John Wiley & Sons, 1995.

BORGES, J. C. et al. **Análise de confiabilidade em sistemas elétricos industriais**. São Paulo: Editora Técnica, 2021.

CAVALCANTI, Gustavo Oliveira et al. Efficiency of class III surge protection devices against lightning surges. **IEEE Latin America Transactions**, v. 19, n. 9, p. 1459-1467, 2021.

CASSULA, A. M. et al. Avaliação da confiabilidade em sistemas de distribuição considerando falhas de geração e transmissão. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 14, p. 262-271, 2003.

CHEN, Zhen-Song et al. Large-group failure mode and effects analysis for risk management of angle grinders in the construction industry. **Information Fusion**, v. 97, p. 101803, 2023.

DA SILVA LESSE, Cairo et al. Avaliação de falhas em redes de distribuição de energia elétrica através da corrente de curto-circuito. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 11, n. 2, p. 127-139, 2019.

DE ALMEIDA JÚNIOR, José Cândido; PARRA, Rogerio Botelho. Predictive & Detective Maintenance.31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. 2018. Disponível em: <https://www.icas.org/icas_archive/ICAS2018/data/papers/ICAS2018_0336_paper.pdf>. Acesso em: 30 jan 2025.

DE SOUZA, Valdir Cardoso et al. Utilização das tecnologias da indústria 4.0 na manutenção preditiva através do monitoramento de equipamentos e instalações. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 1, p. 7063-7083, 2022.

DHILLON, Balbir S. **Engineering maintenance: a modern approach**. cRc press, 2002.

DOMINGUES, Luiz Henrique. **Engenharia de produção e a indústria 4.0**. AYA Editora, 2020.

DOS SANTOS, Margareth Apostolo. Utilizando técnicas de confiança para controle adaptativo do intervalo de polling nos sistemas de smart metering. Mestrado, Universidade Federal Fluminense, 2014. Disponível em: <https://www.ppgeet.uff.br/site/wp-content/uploads/2021/01/Margareth_Apostolo_Dos_Santos.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2025.

EBELING, C. E. **An introduction to reliability and maintainability engineering**. 2. ed. Long Grove: Waveland Press, 2010.

FALCK, Johannes et al. Reliability of power electronic systems: An industry perspective. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 12, n. 2, p. 24-35, 2018.

FERREIRA, Ivanilda Agostinho; NOBREGA, Dayvisson Damasceno da. **Confiabilidade de sistemas no setor elétrico: estudo de caso envolvendo ocorrências de queimadas em linhas de transmissões**. XXXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção: A Engenharia de Produção e as novas tecnologias produtivas: indústria 4.0, manufatura aditiva e outras abordagens avançadas de produção. 2017. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_239_388_34765.pdf. Acesso em: 26 jan. 2025.

FRANKEL, Ernst G. **Systems reliability and risk analysis**. Springer Science & Business Media, 2012.

GILL, Paul. **Electrical power equipment maintenance and testing**. CRC press, 2016.

GRÜTZMACHER, Eduardo. **Análise e modelamento de disparadores bimetálicos de sobrecarga de disjuntores-motores de baixa tensão**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

IBRAHIM, Abdul Haleem Medattil et al. Incipient fault detection in power distribution networks: review, analysis, challenges and future directions. **IEEE Access**, 2024.

KABIR, Ehsanul et al. Solar energy: Potential and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 894-900, 2018.

KARDEC, Allan; NASCIF, Júlio. **Manutenção-função estratégica**. Qualitymark Editora Ltda, 2009.

KASIKCI, Ismail. **Short circuits in power systems: A practical guide to IEC 60909-0**. John Wiley & Sons, 2018.

KELEKO, Aurelien Teguede et al. Artificial intelligence and real-time predictive maintenance in industry 4.0: a bibliometric analysis. **AI and Ethics**, v. 2, n. 4, p. 553-577, 2022.

LI, Bing; BARKER, Kash; SANSAVINI, Giovanni. Measuring community and multi-industry impacts of cascading failures in power systems. **IEEE Systems Journal**, v. 12, n. 4, p. 3585-3596, 2017.

LINS, R. M. et al. **Manutenção preventiva e preditiva em sistemas elétricos**. Rio de Janeiro: Editora Industrial, 2019.

LOBO, Pedro Alexandre Costa. **Desenho e teste de sistemas resilientes**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho (Portugal).

LODDI, Willian Pires. **Análise do sistema de manutenção preventiva de aparelhos de ultrassonografia em hospital de alta complexidade, ensino e pesquisa**. 2020. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MACHADO, Cristofer Oliveira et al. MANUTENÇÃO PRESCRITIVA: A EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO NA INDUSTRIA 4.0. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 9, n. 9, p. 4444-4458, 2023.

MARQUES, Ana Claudia; BRITO, Jorge Nei. Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 7, p. 8913-8923, 2019.

MATOS, Roselane Biangaman de; MILAN, Marcos. Aplicação sistêmica do modo de análise de falhas e efeitos (FMEA) para o desenvolvimento de indicadores de desempenho de empresas de pequeno porte. **Revista Árvore**, v. 33, p. 977-985, 2009.

MENDES, José Carlos. **Redução de falhas em grandes transformadores de alta tensão.** 1995. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MEEKER, W. Q.; ESCOBAR, L. A. **Statistical methods for reliability data.** New York: John Wiley & Sons, 1998.

MODARRES, M.; KAMINSKIY, M.; KRIVTSOV, V. **Reliability engineering and risk analysis: A practical guide.** 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

MOLĘDA, Marek et al. From corrective to predictive maintenance—A review of maintenance approaches for the power industry. **Sensors**, v. 23, n. 13, p. 5970, 2023.

MOUBRAY, John. **Reliability-centered maintenance.** Industrial Press Inc., 2001.

NEPOMUCENO, Lauro Xavier. **Técnicas de manutenção preditiva, v. 1.** Editora Blucher, 1989.

OLIVEIRA, Ualison Rebula de; PAIVA, Emerson José de; ALMEIDA, Dagoberto Alves de. Metodologia integrada para mapeamento de falhas: uma proposta de utilização conjunta do mapeamento de processos com as técnicas FTA, FMEA e a análise crítica de especialistas. **Production**, v. 20, p. 77-91, 2010.

OLIVEIRA; Alexsandro Batista de. A importância da manutenibilidade na construção de pré-planos de manutenção corretiva. Orientadora: Marinilda Souza Lima. 2019. 27 f. Artigo (MBA em Gestão da Manutenção) – Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2019.

OTANI, Mario; MACHADO, Waltair Vieira. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. **Revista Gestão Industrial**, v. 4, n. 2, 2008.

PASCHOAL, D. R. et al. Disponibilidade e confiabilidade: aplicação da gestão da manutenção na busca de maior competitividade. **Revista da Engenharia de Instalações no mar da FSMA**, p. 1-14, 2009.

PATIL, Rajkumar B. et al. Fault tree analysis: a case study from machine tool industry. **Proceedings of TRIBOINDIA-2018 An International Conference on Tribology**. 2018.

POMORSKI, Thomas R. Total productive maintenance (TPM) concepts and literature review. **Brooks Automation, Inc**, v. 30, p. 1-30, 2004.

PRASS, Leandro C.; NUNES, Fabiano Lima. Implantação da manutenção preventiva em um centro de usinagem cnc de uma indústria moveleira. **Produção em foco**, v. 9, n. 2, p. 43-73, 2019.

RAMALHO, Geraldo Luis Bezerra et al. Detecção de falhas em motores elétricos através da classificação de padrões de vibração utilizando uma rede neural ELM. **Holos**, v. 4, p. 185-194, 2014.

RAPOSO, José Luis Oliveira. Manutenção centrada em confiabilidade aplicada a sistemas elétricos: uma proposta para uso de análise de risco no diagrama de decisão. **Universidade Federal da Bahia**, p. 33-34, 2004.

RAUSAND, M.; HOYLAND, A. **System reliability theory: Models, statistical methods, and applications**. 2. ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2004.

REASON, James; HOBBS, Alan. **Managing maintenance error: a practical guide**. CRC Press, 2017.

SANTOS, Marcio Alexandre Pires dos. **A maturidade da gestão da manutenção na área Industrial**, 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial) - Fatec Pindamonhangaba, Pindamonhangaba, 2021.

SANTOS, Pedro Vieira Souza; DOS SANTOS, Lucas Di Paula Gama. Gestão de indicadores: um estudo de caso no setor de serviços. *Brazilian Journal of Production Engineering*, v. 4, n. 4, p. 115-133, 2018.

SELLITTO, Miguel Afonso. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Production**, v. 15, p. 44-59, 2005.

SILVA, J. L. R. Avaliação da Confiabilidade em Sistemas Elétricos com Base nos Parâmetros de Qualidade da Energia. 79p. **Monografia (Especialização em Sistemas de Energia Elétrica ênfase em Qualidade da Energia)**– Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, 2008.

SILVA, Fabio de Assis Santino da et al. **Supervisão dos circuitos elétricos industriais e comerciais**. 2023. Trabalho de conclusão de curso (Curso Técnico em Eletrotécnica) - Escola Técnica Estadual Etec Jorge Street, São Caetano do Sul, São Paulo, 2023.

SILVA, Deivid Wesley; FLORIAN, Fabiana. SISTEMA DE PROTEÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218**, v. 3, n. 1, p. e3122422-e3122422, 2022.

SILVA, Allam Alves Feitosa da. Manutenção predictiva aplicada em placas eletrônicas de uma empresa têxtil através da análise de defeitos eletrônicos. 2023. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

SIMÕES FILHO, Salvador. Análise de árvore de falhas considerando incertezas na definição dos eventos básicos. **COPPE/UFRJ, D. Sc., Rio de Janeiro**, 2006.

SMITH, Ricky; MOBLEY, R. Keith. **Rules of thumb for maintenance and reliability engineers**. Butterworth-Heinemann, 2011.

TAYLOR, P.; JONES, S. **Monitoramento e manutenção preditiva em sistemas elétricos**. Londres: Editora Técnica Global, 2020.

VENKATESH, Jindal. An introduction to total productive maintenance (TPM). **The plant maintenance resource center**, p. 3-20, 2007.

VERRI, Lewton Burity. A Confiabilidade Prática Na Administração Da Engenharia. Clube de Autores, 2014.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. PCM-Planejamento e Controle da manutenção. Qualitymark Editora Ltda, 2002.