

Estudo de técnicas de antecipação de falhas em isoladores de linhas de transmissão e impactos na manutenção não planejada

Study of techniques for anticipating failures in transmission line insulators and their impact on unplanned maintenance

Antonio Thiago Rodrigues Chaves¹

Fábio de Araújo Leite²

Resumo

A operação adequada e a gestão eficiente da manutenção em linhas de transmissão de energia elétrica constituem elementos essenciais para garantir a segurança e a confiabilidade do fornecimento do setor energético. Os isoladores são componentes críticos que exigem monitoramento constante, pois estão expostos a fatores ambientais como chuva, poluição e maresia, que degradam sua rigidez dielétrica e provocam falhas severas. Este artigo analisa as principais técnicas empregadas na inspeção de isoladores, estabelecendo um comparativo entre métodos convencionais e não convencionais. Por meio de uma pesquisa exploratória e bibliográfica, constatou-se que o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), acoplados a sensores termográficos e ultravioletas, representa uma evolução estratégica na manutenção preditiva. Os resultados indicam que a antecipação de falhas por meio de drones melhora a precisão do diagnóstico, mitiga os custos associados a paradas não planejadas e minimiza os riscos operacionais das equipes de campo. Conclui-se que o modelo ideal consiste na integração tecnológica, em que os drones atuam como ferramentas de triagem avançada em complemento aos métodos tradicionais.

Palavras-chave: Isoladores de Linhas de Transmissão. Manutenção Preditiva. VANTs (Drones). Gestão de Ativos. Confiabilidade Elétrica.

¹ Aluno do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Santo Agostinho (UNIFSA)

² Professor Me. do Centro Universitário Santo Agostinho (UNIFSA)

ABSTRACT

The proper operation and efficient management of maintenance in power transmission lines are essential elements to ensure the safety and reliability of supply in the energy sector. Insulators are critical components that require constant monitoring, as they are exposed to environmental factors such as rain, pollution, and salinity, which degrade their dielectric strength and cause severe failures. This article analyzes the main techniques used in insulator inspection, establishing a comparison between conventional and unconventional methods. Through exploratory and bibliographic research, it was found that the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), coupled with thermographic and ultraviolet sensors, represents a strategic evolution in predictive maintenance. The results indicate that early fault detection through drones improves diagnostic accuracy, mitigates costs associated with unplanned shutdowns, and minimizes operational risks for field teams. It is concluded that the ideal model consists of technological integration, where drones act as advanced screening tools to complement traditional methods.

Keywords: Transmission Line Insulators. Predictive Maintenance. UAVs (Drones). Asset Management. Electrical Reliability.

1 INTRODUÇÃO

A operação adequada e a gestão eficiente da manutenção em linhas de transmissão de energia elétrica constituem elementos essenciais para a sustentabilidade do setor energético, bem como para a garantia da segurança e da confiabilidade do fornecimento. Atualmente, a inspeção de linhas de transmissão pode ser realizada por métodos convencionais e não convencionais. Os isoladores são componentes que necessitam de monitoramento constante e preciso para que seja evitado ou minimizada a interrupção do fornecimento.

Segundo Xavier (2017), diversos fatores ambientais podem influenciar o desempenho da suportabilidade elétrica dos isoladores, como chuva, neblina, vento e o acúmulo de poluição sobre a superfície desses componentes. A atuação desses agentes reduz a rigidez dielétrica e favorece a formação de caminhos condutivos, aumentando o risco de descargas parciais e falhas elétricas.

Entre as abordagens tecnológicas mais recentes destaca-se o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), popularmente conhecidos como drones, que possibilitam maior precisão, alcance e segurança operacional, especialmente em áreas de difícil acesso aos isoladores, além de outras formas de detecção de falhas como a análise termográfica e rádio frequência. Este artigo busca examinar as principais técnicas empregadas na inspeção de isoladores e na detecção de falhas em linhas de transmissão, considerando que tais ocorrências representam potenciais riscos capazes de causar interrupções no fornecimento de energia elétrica.

Diante desse cenário, a manutenção programada assume um papel estratégico na mitigação de falhas severas nesses componentes. A implementação de rotinas sistematizadas de inspeção, aliadas ao uso de tecnologias preditivas e ao monitoramento por imagens, contribui para a identificação antecipada de defeitos e para a redução de emergências operacionais. Assim, a manutenção planejada reforça a confiabilidade do sistema elétrico, diminui custos decorrentes de paradas inesperadas e aumenta a segurança das equipes envolvidas.

Assim, investigar como a manutenção programada e o uso de VANTs podem reduzir falhas severas em isoladores, é relevante para aprimorar a gestão da infraestrutura elétrica, minimizar custos com manutenções corretivas e garantir um fornecimento de energia mais seguro, estável e eficiente para a sociedade.

Como a manutenção programada pode reduzir a ocorrência de falhas severas em isoladores de linhas de transmissão? Nesse contexto, este artigo tem como principal objetivo, abordar diferentes aspectos relacionados à inspeção e ao monitoramento de isoladores, bem como técnicas de inspeção empregadas na sua detecção, visando contribuir para a redução de manutenções não programadas e o aumento da confiabilidade do sistema elétrico. De forma específica, identificar os principais tipos de isoladores utilizados em linhas de transmissão de energia, descrever as principais falhas que ocorridas nesses equipamentos, apresentar e comparar as técnicas de inspeção convencionais e não convencionais empregadas para esse fim.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva consiste em um conjunto de atividades planejadas e executadas em intervalos previamente definidos, com o objetivo de reduzir a probabilidade de falhas e manter os ativos em condições operacionais adequadas. Essa abordagem é baseada em inspeções periódicas, substituições programadas de componentes e ajustes técnicos, sendo aplicada de acordo com critérios como tempo, uso ou recomendações do fabricante. Além disso, práticas preventivas bem estruturadas permitem maior controle da degradação dos equipamentos e favorecem a padronização dos processos de manutenção (ISO 17359, 2018).

Sob a perspectiva estratégica, a manutenção preventiva desempenha papel essencial na melhoria do desempenho organizacional e na otimização dos custos do ciclo de vida dos ativos. Quando corretamente planejada, ela reduz intervenções corretivas emergenciais, minimiza perdas de produção e amplia a disponibilidade operacional dos equipamentos. Estudos recentes destacam que organizações que adotam políticas preventivas alinhadas à engenharia de confiabilidade apresentam melhores indicadores como MTBF e menor custo total de manutenção (MOBLEY, 2020). Segundo SLACK et al., (2022), a manutenção preventiva deve ser integrada à estratégia de gestão de ativos e às decisões gerenciais, contribuindo para a competitividade e a sustentabilidade das operações industriais.

2.2 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva é uma estratégia de manutenção baseada no monitoramento contínuo ou periódico das condições reais de operação dos ativos, utilizando técnicas como análise de vibração, termografia, ultrassom, análise de óleo e monitoramento de desempenho. Seu principal objetivo é identificar sinais iniciais de degradação e prever o momento mais adequado para a intervenção antes que a falha ocorra, evitando paradas não programadas e intervenções desnecessárias. De acordo com a ISO 17359:2018, a manutenção preditiva permite avaliar a condição dos equipamentos por meio de dados mensuráveis, contribuindo para maior confiabilidade operacional e tomada de decisão baseada em evidências.

Além dos benefícios técnicos, a manutenção preditiva apresenta impactos significativos na gestão de ativos e na competitividade das organizações, pois contribui para a otimização dos custos do ciclo de vida dos equipamentos e para o aumento da disponibilidade operacional. Estudos recentes demonstram que a aplicação consistente de técnicas preditivas reduz falhas

catastróficas, amplia o MTBF e melhora o planejamento das atividades de manutenção (MOBLEY, 2020). Conforme destacado pela ISO 13374-1:2018, sistemas de monitoramento e diagnóstico aplicados à manutenção preditiva permitem transformar dados em informações estratégicas, fortalecendo a integração entre manutenção, operação e gestão, e sustentando práticas de excelência operacional (ISO, 2018).

2.3 Manutenção corretiva

A manutenção corretiva é caracterizada pelas intervenções realizadas após a ocorrência de uma falha ou quando o equipamento deixa de desempenhar sua função conforme o esperado. Essa estratégia pode ser classificada como corretiva não planejada, quando ocorre de forma emergencial, ou corretiva planejada, quando a falha já é conhecida e a intervenção é programada para minimizar impactos operacionais. Segundo a EN 13306:2017, a manutenção corretiva é inerente a qualquer sistema produtivo, sendo necessária mesmo em ambientes que adotam estratégias preventivas e preditivas, pois nem todas as falhas são previsíveis ou evitáveis. Dessa forma, sua gestão adequada é essencial para garantir a restauração rápida e segura da função dos ativos (EN 13306, 2017).

Embora a manutenção corretiva esteja geralmente associada a maiores custos e riscos operacionais, sua aplicação controlada pode ser estrategicamente aceita em ativos de baixa criticidade ou com falhas de impacto reduzido. Estudos recentes indicam que o uso excessivo da corretiva não planejada tende a elevar custos com horas extras, peças de reposição urgentes e perdas de produção, além de aumentar a probabilidade de acidentes (MOBLEY, 2020). Nesse contexto, a ISO 55000:2018 reforça que a manutenção corretiva deve estar integrada à gestão de ativos, com análise de causa raiz e registros históricos, de modo a apoiar decisões que promovam a melhoria contínua e a redução de falhas recorrentes (ISO, 2018).

2.4 Linhas de transmissão e o papel dos isoladores

As linhas de transmissão de energia elétrica constituem elementos essenciais dos sistemas elétricos de potência, sendo responsáveis pelo transporte de energia desde as unidades geradoras até os centros consumidores. A confiabilidade dessas estruturas está diretamente relacionada à continuidade do fornecimento e à estabilidade do sistema elétrico como um todo, especialmente em sistemas interligados de grande porte (EPRI, 2017).

OLIVEIRA (2019), afirma que os isoladores desempenham papel fundamental no sistema, pois garantem o isolamento elétrico entre os condutores energizados e as estruturas aterradas, além de suportarem esforços mecânicos decorrentes de fatores como vento, peso dos cabos e variações térmicas. Dessa forma, a integridade desses componentes é indispensável para o funcionamento seguro das linhas de transmissão e distribuição.

Estudos recentes indicam que os isoladores estão entre os componentes mais suscetíveis a falhas, principalmente devido à exposição contínua a condições ambientais adversas, como poluição, umidade e radiação solar. Esses fatores contribuem significativamente para processos de degradação que comprometem suas propriedades dielétricas ao longo do tempo. Além disso, diferentes materiais utilizados na fabricação de isoladores, como porcelana, vidro e polímeros, apresentam comportamentos distintos em relação ao envelhecimento e à contaminação, sendo necessário considerar critérios técnicos específicos para sua aplicação em diferentes ambientes (ARAÚJO; SILVA, 2019)

2.5 Tipos de isoladores

As inspeções tradicionais são realizadas de forma presencial, onde uma equipe especializada percorre a linha de transmissão verificando todas as cadeias de isoladores. Esta verificação é realizada, na maioria das vezes, de forma visual, contando com no máximo o auxílio de um binóculo. Uma pequena parcela destas inspeções, geralmente restrita às linhas de transmissão de tensão mais elevada e alto grau de importância para o sistema elétrico, é realizada com o auxílio de equipamentos mais sofisticados (CAPELINI, 2015).

2.5.1 Isoladores de porcelana

Atualmente, o isolador de porcelana processado via úmida é a forma de isolamento elétrica mais utilizada no sistema de distribuição e transmissão de energia. Seu desenvolvimento teve início a partir do isolador tipo pino, usado em linhas de comunicação, mas, com as características elétricas melhoradas, tais como em relação à sua seção transversal e ao diâmetro da saia que foram ampliados para aumentar a distância de escoamento (PORTELLA, 2018).

Figura 1. Isoladores de porcelana em linhas de transmissão



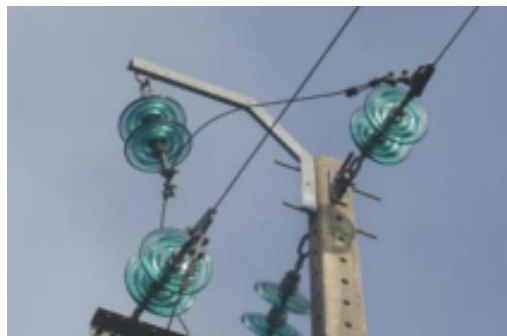
Fonte: Magnifica (2010)

Outro aspecto analisado recentemente são as falhas mecânicas em isoladores de vidro em serviços reais. Em um estudo de caso de uma linha de transmissão de 500 kV no Brasil, a corrosão e trincas no pino metálico foram identificadas como causas principais de falhas de isoladores, reforçando a importância de análises detalhadas de campo e manutenção preventiva (ARAÚJO et al., 2023).

2.5.2 Isoladores de vidro em cadeia

Os isoladores de vidro continuam sendo componentes essenciais nas linhas de transmissão de alta tensão, pois fornecem isolamento elétrico entre os cabos e as estruturas de suporte, além de resistirem a esforços mecânicos no ambiente externo (A ALI et al., 2024). Estudos recentes demonstram que o desempenho desses isoladores é diretamente afetado pelas condições ambientais, especialmente em ambientes poluídos, com deposição de contaminantes que podem levar a descargas superficiais e flashovers.

Figura 2. Isoladores de vidro



Fonte: Shutterstock.com (2023)

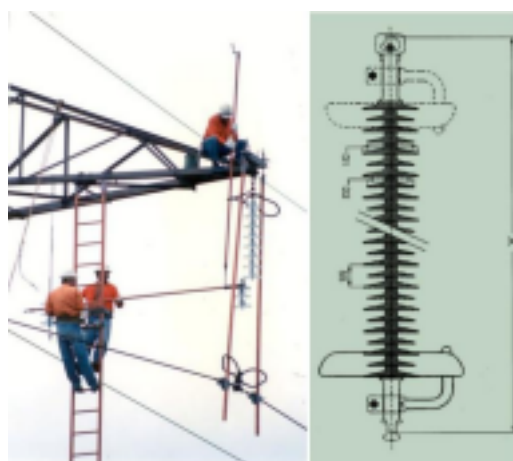
FERREIRA (2019), afirma que a análise do comportamento em cadeias desses elementos, destaca que a distribuição de potencial ao longo da cadeia é fundamental para determinar os níveis de tensão e estresse elétrico em cada unidade, especialmente quando há unidades com defeitos ou curto-circuito na série, o que pode alterar significativamente a operação da linha de transmissão e operação do sistema.

2.5.3 Isoladores poliméricos

Os isoladores poliméricos são constituídos basicamente de bastões isolantes de fibra de vidro, revestimento de silicone e borracha e também nos oferecem uma série de vantagens comparados aos demais, entre elas podemos destacar a sua leveza, fácil instalação e manuseio. Esses componentes estão sendo implantados cada vez mais em sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica, em substituição aos tradicionais isoladores de porcelana (DEUTSCH, 2016).

Para que um isolador seja ideal para utilização, ele deve ser fabricado de forma a ter seu potencial igualmente distribuído, a fim de suportar as tensões aplicadas durante a sua atuação. Hoje temos diversos tipos desse material existentes no mercado: Suspensão, roldana, pilar, bastão, rígido, entre outros.

Figura 3. Evolução tecnológica dos isoladores poliméricos. Fotos gentilmente liberadas pela CHESF.



Fonte: Blog T & D em foco (2019)

O isolador polimérico, é desta forma um dos mais usados em linhas, levando em

consideração todos os benefícios que nos oferece. O núcleo dos isoladores poliméricos, apresentados na figura abaixo, é formado por uma haste (ou bastão) de fibra de vidro reforçada por um polímero do tipo epóxi, poliéster ou vinil. Desta forma, esse núcleo é um Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (PRFV). Este núcleo deve suportar os esforços mecânicos impostos pelo peso do cabo ou por vibrações eólicas sem afetar suas propriedades isolantes (MENDONÇA, 2013).

2.6 Mecanismos de falha em isoladores

Os mecanismos de falha em isoladores estão associados à interação entre fatores elétricos, ambientais e mecânicos. Um dos principais fenômenos observados é a formação de correntes de fuga na superfície do isolador, geralmente provocada pela presença de contaminantes combinados com umidade, o que reduz a rigidez dielétrica do material (KUMAR; SINGH, 2017).

Segundo MISHRA e GORAI (2018), esse processo pode evoluir para descargas parciais e, posteriormente, para a formação de arcos elétricos, resultando em falhas completas do equipamento. Em ambientes com alta poluição atmosférica ou proximidade de regiões litorâneas, a incidência desses fenômenos tende a ser mais elevada.

Outro fator relevante é o envelhecimento dos materiais isolantes, que pode ser acelerado por estresses térmicos e elétricos. Esse processo reduz gradativamente a capacidade de isolamento, aumentando a probabilidade de falhas inesperadas e reduzindo a vida útil dos equipamentos (RAZA et al., 2018). Além disso, falhas em isoladores podem provocar efeitos em cascata no sistema elétrico, comprometendo a estabilidade operacional do sistema, uma vez que a indisponibilidade de um componente pode levar à sobrecarga de outros elementos da rede.

2.7 Técnicas de antecipação de falhas

A antecipação de falhas em isoladores tem se tornado uma estratégia essencial para o setor elétrico, principalmente devido à necessidade de aumentar a confiabilidade do sistema e reduzir custos operacionais associados à manutenção corretiva (FERREIRA; COSTA, 2020).

Entre as principais técnicas utilizadas, destaca-se a inspeção periódica, que pode ser realizada

por métodos visuais, termográficos e ultrassônicos. A termografia infravermelha, por exemplo, permite identificar pontos de aquecimento anormal que podem indicar falhas incipientes nos isoladores (ZHANG et al., 2019).

O uso de drones também tem se consolidado como uma ferramenta eficiente para inspeção de linhas de transmissão, permitindo a coleta de imagens em locais de difícil acesso, com maior segurança e redução de custos operacionais (SANTOS; PEREIRA, 2021). Outra abordagem importante é o monitoramento contínuo por meio da medição de corrente de fuga, que possibilita a identificação de degradação progressiva dos isoladores antes que ocorram falhas críticas (KUMAR; SINGH, 2017).

2.8 Técnicas de inspeção e detecção de falhas em isoladores

Durante vários anos, a inspeção de linhas de transmissão de alta tensão tem sido feita regularmente através de aeronaves tripuladas. As aeronaves executam vôos em baixa altitude e muito próximos das linhas de transmissão. Em alguns casos, devido às características geográficas da região, condições climáticas e outros fatores que venham a dificultar o sobrevôo, há uma grande exposição dos tripulantes a riscos associados à tarefa (Oliveira e Lages, 20017).

As inspeções em isoladores de linhas de transmissão são efetuadas juntamente com a inspeção nos demais componentes da linha e se dividem basicamente em dois grupos: terrestre e aérea (FERREIRA, 2019). Ainda segundo Ferreira, as inspeções terrestres realizadas hoje, são do tipo visual, minuciosa e específica, onde não temos um período determinado para manutenção, uma vez a mesma depende do estado em que se encontra o isolador. Atualmente têm-se alguns tipos de inspeções aéreas, preventivas utilizando equipamentos de rádio frequência, ultrassom, ou termovisores que detectam isoladores que apresentam problemas de isolamento (OLIVEIRA, 2018).

A seguir, temos uma pequena definição de cada uma delas:

2.8.1 Inspeções utilizando rádio frequência: A rádio interferência em redes de corrente alternada é geralmente definida pelo espectro de frequência, onde a rádio interferência é relacionada com a distância ao ponto de recepção do sinal e a sua distribuição estatística, na qual se deseja seu comportamento durante um determinado período (CLAYTON, 2004). A

interferência nas frequências de rádio, RFI (Radio Frequency Interference), é caracterizada por radiações eletromagnéticas emitidas por circuitos elétricos que geram sinais indesejados. A RFI também é conhecida como interferência eletromagnética (EMI).

Comumente realizada em conjunto com a inspeção por ultrassom, utilizando para isso, receptores de RF equipados geralmente com antenas do tipo "espinha de peixe", sendo a primeira utilizada para identificar estruturas que contêm isoladores com falhas e a segunda para identificar exatamente quais os isoladores nestas condições (CAPELINI, 2015). Entretanto, além de possuírem um custo elevado, não são assertivos devido às grandes interferências externas e também quando ocorre a falha do isolador e conseqüentemente o seccionamento da rede, não é mais possível utilizar os equipamentos citados.

2.8.2 Inspeções preventivas utilizando ultrassom: Um trabalho realizado pelas empresas LACTEC e COPEL indicou que numa amostragem de 728 isoladores de pino cerâmicos, constatou-se que a intensidade de ultrassom confiável para se retirar isoladores de campo é de 7dBu (KOWALSKI; MACHADO; FERNANDEZ; BORGES, 2006).

A inspeção por ultrassom é vantajosa por ser realizada a uma distância segura da rede elétrica, por ser não invasiva e por utilizar um equipamento diretivo, porém, o lado negativo é que a análise depende da experiência e da sensibilidade do operador (HAUSMANN, 2019).
Inspeções preventivas utilizando termovisores: Os termovisores apesar de indicar a temperatura de um ponto desejado, captam o comprimento de onda proveniente da radiação do ponto e através de diversos parâmetros do ambiente (inseridos pelo usuário) e realiza cálculos internos para estimar a temperatura daquele corpo.

Diante disso, algumas outras técnicas foram desenvolvidas para auxiliar as equipes no processo de manutenção, das mais simples às mais complexas. Com base nos estudos e análise dessas técnicas, constatou-se a eficiência de cada uma, e uma delas é exatamente a técnica de lavagem que, segundo Sousa (2010), é um processo de manutenção preventiva fundamental para o bom funcionamento do sistema elétrico, que está submetido à constante contaminação gerada pelo ambiente. A lavagem de isoladores permite reduzir o índice de defeitos na linha de transmissão, originados pelo acúmulo de poeira, maresia, poluição industrial, monóxido de carbono emitido por veículos, etc.

A limpeza do isolador é feita por intermédio de um jato d'água lançado sob pressão na forma de gotículas, na superfície do mesmo. Com este método a lavagem da superfície dos isoladores é de alta qualidade (SANTOS, 2017). De acordo com Montoya-Tena (2005), a lavagem é bastante efetiva quando o poluente depositado na superfície do isolador é poeira, sal, sujeira ou ácido, porque estes poluentes não aderem fortemente à superfície isolante. Ele também afirma que, em algumas áreas, a lavagem natural realizada pela chuva é suficiente a fim de prevenir flashover (Corrente desruptiva) no isolador devido à contaminação.

A frequência de lavagem depende do nível de contaminação e das condições ambientais. Os isoladores devem ser lavados antes que eles acumulem níveis de contaminação crítica. Quando necessária, a manutenção deve remover a camada de poluentes da superfície dos isoladores. Para isso, com os devidos cuidados, a cadeia de isoladores pode ser lavada. Porém a lavagem necessita de mão de obra especializada munida de maquinário adequado. O deslocamento de equipes e de maquinário para o local da lavagem pode levar vários dias, e 14 nesse intervalo de tempo, podem ocorrer tanto um flashover quanto uma precipitação pluvial, que lavaria naturalmente a cadeia de isoladores, tornando a posterior lavagem artificial desnecessária, implicando em custo desnecessário. (OLIVEIRA, 2018).

A contaminação dos isoladores com agentes poluentes pode gerar uma série de problemas sérios para o sistema elétrico. A atmosfera poluída favorece a formação de uma camada constituída por substâncias que, dissolvidas em água, produzem soluções condutoras sobre a superfície do isolador (SANTOS, 2017).

Além dos métodos clássicos de detecção de falhas, podemos citar outras formas, que foram detalhadamente abordadas por Capeline (2015), como as que aliam ruídos ultrassônicos emitidos com isoladores poluídos, também os sistemas robóticos que foram criados com a intenção de evitar o deslocamento das equipes de manutenção até os isoladores como é caso de veículos aéreos não tripulados e robôs capazes de caminhar pelas linhas de transmissão, com o objetivo de eliminar a desvantagem dos métodos tradicionais de inspeção, que é a necessidade de se ensaiar os isoladores em laboratório ou, para os casos em que os isoladores são ensaiados sem campo, a necessidade de se instalar os equipamentos de inspeção junto ao isolador.

Os inspetores devem estar especialmente atentos para os seguintes aspectos dos isoladores cerâmicos e de vidro: sinais de fissuras ou trincas (nos cerâmicos); deterioração da

cimentação; peças quebradas ou com pedaços arrancados; marcas de queima; sinais de poluição e pontos de corrosão em suas ferragens integrantes (FERREIRA, 2019).

Figura 1: Inspeção de linha de transmissão com utilização de drone



Fonte: FAW07 (2024)

Nos últimos anos, técnicas baseadas em inteligência artificial têm sido amplamente utilizadas para a detecção automática de falhas. Algoritmos de aprendizado profundo permitem analisar imagens e identificar padrões associados a defeitos em isoladores, aumentando a precisão e eficiência do processo de diagnóstico (LI et al., 2020)

2.9 Manutenção preditiva e impactos da manutenção não planejada

A manutenção em sistemas de transmissão pode ser classificada em corretiva, preventiva e preditiva. A manutenção preditiva se destaca por utilizar dados operacionais e técnicas de monitoramento para antecipar falhas e orientar intervenções de forma mais eficiente (FERREIRA; COSTA, 2020). Nesse contexto, a antecipação de falhas em isoladores contribui diretamente para a redução da manutenção não planejada, permitindo que intervenções sejam realizadas antes da ocorrência de falhas críticas. Essa abordagem resulta em maior confiabilidade do sistema e redução de custos operacionais (EPRI, 2017).

Por outro lado, a manutenção não planejada pode gerar impactos significativos, como interrupções no fornecimento de energia, prejuízos econômicos e riscos à segurança operacional. Além disso, falhas inesperadas podem resultar em penalidades regulatórias para as concessionárias de energia (CIGRÉ, 2018). Em sistemas elétricos interligados, a ocorrência de falhas pode comprometer a estabilidade da rede, evidenciando a importância de estratégias eficazes de monitoramento e manutenção (RAZA et al., 2018)

2.10 Confiabilidade e gestão de ativos

A confiabilidade das linhas de transmissão está diretamente relacionada à eficiência da gestão de ativos e à adoção de estratégias de manutenção baseadas em dados. Modelos modernos utilizam análise de risco e histórico de falhas para otimizar a tomada de decisão (CIGRÉ, 2018).

FERREIRA; COSTA (2020), afirmam que a manutenção centrada na confiabilidade se destaca como uma abordagem eficiente, pois permite priorizar intervenções com base na criticidade dos equipamentos e na probabilidade de falhas. Nesse cenário, a antecipação de falhas em isoladores representa uma ferramenta estratégica para aumentar a disponibilidade dos sistemas elétricos e reduzir intervenções emergenciais. Além disso, a integração de tecnologias como sensores inteligentes e inteligência artificial tende a transformar a gestão de ativos no setor elétrico (LI et al., 2020).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com Andrade (2018, p. 25), a pesquisa bibliográfica configura-se como uma competência essencial no âmbito da graduação, por constituir a etapa inicial das atividades acadêmicas e científicas. Além disso, esse tipo de investigação permite ao pesquisador fundamentar suas hipóteses, bem como ampliar o conhecimento acerca do tema analisado.

Nesse contexto, o presente artigo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza exploratória e bibliográfica, fundamentada na análise de produções acadêmicas previamente desenvolvidas sobre o tema em estudo. Foram considerados trabalhos que apresentaram e detalharam técnicas eficazes para a detecção de falhas em isoladores, bem como as respectivas aplicações de cada método.

Os resultados obtidos a partir do levantamento realizado em livros, teses, trabalhos de conclusão de curso e Normas Técnicas brasileiras foram abordados de forma qualitativa, com base nas informações coletadas nessas fontes, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada e sistematizada do assunto investigado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com Fidalgo (2007), no contexto dos ativos em operação nos sistemas de transmissão de energia elétrica, uma opção de longo prazo para o planejamento da manutenção consiste na maximização da condição operacional de um determinado conjunto de equipamentos, os quais executam uma função específica e são remunerados com base em sua execução ou disponibilidade constatada. Essa maximização da condição operacional pode ser atingida por meio da adoção de uma política de manutenção otimizada, orientada para o alcance de um objetivo previamente estabelecido, desde que sejam preservadas as demais condições externas ao sistema elétrico.

Os trabalhos analisados convergem ao afirmar que a poluição ambiental é o principal fator externo responsável pela degradação do desempenho dielétrico dos isoladores, impactando diretamente a confiabilidade das linhas de transmissão. Pereira (2020) demonstra que o acúmulo de contaminantes, quando associado à umidade, reduz significativamente a tensão suportável dos isoladores, facilitando a ocorrência de correntes de fuga e flashover, especialmente em ambientes classificados como de média e alta severidade segundo a ABNT IEC TS 60815-1.

Como contraponto, Sousa (2010) propõe o uso de ar comprimido como técnica alternativa de limpeza, obtendo redução significativa da corrente de fuga em ensaios laboratoriais e de campo, além de vantagens ambientais em relação ao método convencional com água. Comparativamente, enquanto a lavagem com água apresenta maior eficácia imediata, a técnica com ar comprimido mostra-se promissora sob a ótica da sustentabilidade, embora ainda dependa de maior maturidade tecnológica e padronização.

De forma geral, a comparação entre os trabalhos revela uma evolução conceitual clara, saindo de práticas predominantemente corretivas para modelos de manutenção baseados em condição e análise de risco. Enquanto estudos mais antigos concentram-se na resposta ao problema (lavagem e substituição), pesquisas mais recentes priorizam a antecipação da falha, combinando monitoramento, classificação da poluição e otimização dos recursos de manutenção.

4.1 Comparação entre inspeções com drones e métodos convencionais de inspeção de isoladores

As inspeções visuais terrestres apresentam baixo custo e simplicidade operacional, porém possuem limitações relevantes quanto à resolução da imagem, ângulo de visualização e alcance, especialmente em vãos longos e torres altas. Além disso, esse método é fortemente dependente da experiência do inspetor e apresenta baixa capacidade de antecipação de falhas incipientes, sendo mais eficaz na identificação de defeitos já visíveis, como isoladores quebrados ou fortemente contaminados.

As inspeções aéreas tripuladas com helicópteros ampliam o campo de visão e permitem a avaliação de longos trechos em curto intervalo de tempo. Entretanto, apresentam alto custo operacional, maior risco à segurança e dificuldade de execução em áreas urbanas ou ambientalmente sensíveis. Apesar da boa resolução visual, esse método ainda é predominantemente corretivo, uma vez que não permite medições detalhadas de parâmetros elétricos ou térmicos com proximidade segura.

Em comparação, a inspeção com drones apresenta vantagens expressivas sob os aspectos técnico, econômico e de segurança. Equipados com câmeras ópticas de alta resolução, sensores termográficos e, em alguns casos, câmeras ultravioletas, os drones permitem a identificação precoce de anomalias como trincas, corrosão de ferragens, aquecimento anormal e indícios de descargas parciais. Diferentemente das inspeções visuais tradicionais, os drones possibilitam a coleta de dados sob múltiplos ângulos, reduzindo a subjetividade da avaliação.

No contexto da antecipação de falhas, os drones representam uma evolução significativa. A análise termográfica permite identificar pontos de aquecimento associados a aumento de corrente de fuga, enquanto sensores UV possibilitam detectar efeito corona e descargas superficiais ainda em estágios iniciais. Esses indicadores são fortemente correlacionados com a perda de desempenho dielétrico dos isoladores, permitindo intervenções antes da ocorrência de desligamentos não programados.

Por outro lado, apesar das vantagens, a inspeção com drones não elimina completamente os métodos convencionais. Condições climáticas adversas, restrições regulatórias de voo e limitações de autonomia ainda impõem desafios operacionais. Assim, os estudos indicam que

a maior eficácia é alcançada quando os drones são utilizados de forma complementar, atuando como ferramenta de triagem avançada para direcionar inspeções em linha viva ou manutenções corretivas apenas aos pontos efetivamente críticos.

Diante dos resultados analisados, o presente artigo aborda um conjunto de técnicas de inspeção e manutenção de isoladores em linhas de transmissão considerado de abrangência moderada, visando fomentar a discussão sobre o tema. Isso se deve ao fato de que ainda há uma quantidade relativamente limitada de estudos disponíveis sobre o assunto, embora continue sendo objeto de inúmeras pesquisas. No entanto, os resultados satisfatórios alcançados indicam a viabilidade da aplicação dessas técnicas.

Do ponto de vista da antecipação de falhas e da evolução da manutenção corretiva para manutenção preditiva, a inspeção com drones apresenta-se como o método mais indicado para o monitoramento de isoladores em linhas de transmissão. Os métodos tradicionais permanecem relevantes, porém assumem caráter complementar, sendo acionados de forma direcionada a partir dos diagnósticos obtidos por VANTs.

5 CONCLUSÃO

A abrangência e a complexidade da manutenção em redes de energia exigem elevado nível de precisão na execução das atividades relacionadas aos seus componentes. Diante disso, este artigo apresentou, de maneira detalhada, as principais técnicas empregadas na inspeção e identificação de falhas em isoladores de linhas de transmissão.

O estudo evidenciou a efetividade dessas metodologias, bem como suas limitações, ressaltando que, apesar dos avanços já alcançados, ainda existem diversas pesquisas em andamento, técnicas em desenvolvimento e tecnologias em constante aprimoramento. Tais esforços visam atender às demandas das empresas responsáveis pela manutenção de isoladores, considerando que nenhuma das soluções disponíveis está isenta de pontos desfavoráveis.

E, a utilização de drones (VANTs) emerge como uma solução tecnológica altamente promissora, combinando maior segurança, redução de custos operacionais e ampliação da qualidade e diversidade dos dados coletados. A incorporação de sensores avançados, como

câmeras termográficas e ultravioletas, permite a identificação de fenômenos associados ao início da degradação dos isoladores, favorecendo intervenções antecipadas e reduzindo a ocorrência de desligamentos não programados. Assim, os drones contribuem diretamente para o aumento da confiabilidade do sistema elétrico e a otimização das estratégias de manutenção.

Apesar desse avanço, a substituição total dos métodos convencionais ainda não é viável, devido a limitações operacionais, regulatórias e ambientais inerentes ao uso de VANTs. Dessa forma, o modelo mais eficiente consiste na integração entre as diferentes técnicas de inspeção, em que os drones atuam como ferramenta de diagnóstico avançado e triagem, direcionando de forma mais precisa as ações de manutenção em campo.

Portanto, conclui-se que, embora exista uma variedade de métodos já desenvolvidos para a inspeção e detecção de falhas em isoladores, a adoção de inspeções com drones representa um marco na modernização da manutenção de linhas de transmissão, possibilitando a evolução para um sistema mais inteligente, preventivo e baseado em dados. Ainda que o campo de estudo esteja em expansão, os resultados já disponíveis demonstram não apenas a viabilidade técnica, mas também o elevado potencial de aplicação dessa tecnologia no setor elétrico.

REFERÊNCIAS

ALI, A. et al. Performance analysis of high voltage disc insulators with different profiles in clean and polluted environments using flashover, withstand voltage tests and finite element analysis. *Scientific Reports*, v. 14, art. 71392, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71392-5>

ANDRADE, M. M. *Introdução à metodologia do trabalho científico: elaboração de trabalhos na graduação*. São Paulo, SP: Atlas, 2018.

ARAÚJO, J. A. et al. A case study of glass insulator pin failure in 500 kV transmission line. *Engineering Failure Analysis*, v. 153, art. 107582, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107582>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5032: Isoladores para Linhas Aéreas com Tensões Acima de 1000V - Isoladores de Porcelana ou Vidro para

Sistemas de Corrente Alternada. Rio de Janeiro, 2004. 59 p.

ARAÚJO, A. C.; SILVA, F. H. Análise de falhas em isoladores poliméricos de linhas de transmissão sob condições ambientais severas. IEEE Latin America Transactions, v. 17, n. 4, p. 678–685, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR IEC 60079: Atmosferas explosivas: Proteção de equipamentos por segurança intrínseca. 6 ed. Rio de Janeiro: 2009. 113 p. Acesso em: 05 jan. 2020.

CAPELINI, R. M. Inspeção remota de isoladores em linhas de transmissão a partir de sinais de descargas parciais externas. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá. Minas Gerais, 2015. Disponível em:

https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/122/tese_capelini_2015.pdf?sequence=1. Acesso em 6 de fev. 2026.

CAPELINI, R. Inspeção Remota de Isoladores em Linhas de Transmissão a Partir de Sinais de descargas parciais Externas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2015.

CIGRÉ (CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES). Guidelines for the management of insulation systems in transmission networks. Paris: CIGRÉ, 2018.

CLAYTON, R. Paul. Electromagnetics for Engineers with Applications to Digital Systems. 2004.

DEUTSCH, Nicolay M. Diferenças entre isoladores de porcelana e poliméricos. Projeto de diplomação. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016. Disponível em: . Acesso em: 23 jan. 2026.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). Transmission Line Reference Book: 345 kV and Above. 3. ed. Palo Alto: EPRI, 2017.

EN 13306. Maintenance — Maintenance terminology. Brussels: European Committee for Standardization, 2017.

FERREIRA, L. S.; COSTA, M. R. Manutenção preditiva aplicada a sistemas de transmissão

de energia elétrica. Revista Brasileira de Energia, v. 26, n. 2, p. 45–60, 2020.

FERREIRA, Victor Andrade Lima. Fundamentação teórica e experimental para monitoração em cadeia de isoladores de vidro com base nas variações de sua distribuição de tensão. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

FIDALGO, J. Maximização de receita de concessionária de transmissão de energia elétrica através da otimização da manutenção. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Escola Politécnica - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

GARCIA, R. W. S. Isoladores para linhas de transmissão. Rio de Janeiro: CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2003.

HADIPOUR, M., SHIRAN M. A. Various Pollutions of Power Line Insulators. Majlesi Journal of Electrical Engineering, V. 6 No 1, 2017.

HAUSMANN, V. Interpretação gráfica de descargas parciais através da análise de sinais de ultrassom. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2019.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). IEEE Std 957-2017: Guide for Cleaning Insulators. New York: IEEE, 2017.

ISO 17359. Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

ISO. ISO 17359: Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

ISO. ISO 13374-1: Condition monitoring and diagnostics of machines — Data processing, communication and presentation – Part 1. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

ISO. ISO 55000: Asset management — Overview, principles and terminology. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

KOWALSKI, E.L.; MACHADO, R.P; FERNANDEZ, Mariana; BORGES, Ademar. Sistema de inspeção instrumental para detecção de falhas em isoladores nas linhas de distribuição, Projeto 2866-032, 2006.

KUMAR, R.; SINGH, S. P. Condition monitoring of high voltage insulators using leakage current analysis. *Electric Power Systems Research*, v. 148, p. 224–232, 2017.

LI, X. et al. Automatic detection of defective insulators in transmission lines using deep learning techniques. *IEEE Access*, v. 8, p. 213–225, 2020.

MAMEDE FILHO, João. Manual de equipamentos elétricos. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MISHRA, M.; GORAI, A. K. A review on contamination performance of outdoor insulators. *High Voltage*, v. 3, n. 1, p. 1–12, 2018.

MENESES, V. Linhas de Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos técnicos, orçamentários e construtivos. Escola Politécnica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MOBLEY, R. K. Maintenance Engineering Handbook. 9. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2020.

MOURA, Breno Batista. Construção de um banco de dados simulado de imagens de isoladores utilizados em cabos de alta tensão. 2023. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

OLIVEIRA, A. Proposta de dispositivo para identificação de falhas em isoladores de pino aplicados a redes de média tensão. Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2018.

OLIVEIRA, D. P. Avaliação de desempenho de isoladores em linhas de transmissão sob poluição ambiental. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

Oliveira, V. e Lages, W., 2017, “Comparação entre Duas Classes de Robôs Bracejadores Subatuados Utilizando Controle Preditivo Baseado em Modelo, VIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Florianópolis, Brasil.

PEREIRA, Alessandro Albini. Estudo da aplicação de isoladores elétricos em linhas de transmissão e subestações de acordo com o grau de poluição do ambiente. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Automação Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

PORTELLA, K. et al. Efeitos da poluição atmosférica (litorânea e industrial) em isoladores da rede elétrica da região metropolitana de Salvador. *Quím. Nova*, São Paulo, vol.31, no.2, 2008.

QUEIRÓS, J. P. M. Análise Comparativa do Comportamento Dielétrico dos Isoladores Poliméricos com Isoladores em Materiais Convencionais. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Portugal, 2013.

RAZA, M. et al. Failure modes and diagnostic techniques for power line insulators: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 343–356, 2018.

SANTOS, G. R.; PEREIRA, J. L. Uso de drones na inspeção de linhas de transmissão e detecção de falhas. *Revista Engenharia Elétrica*, v. 22, n. 3, p. 112–120, 2021

SLACK, N.; BRANDON-JONES, A.; BURGESS, N. *Administração da Produção*. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2022.

SOUSA, R. Uma nova técnica de lavagem de isoladores da rede elétrica de distribuição. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Centro de Tecnologia Pós-Graduação em Engenharia Elétrica- Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2010.

XAVIER, José A. R. Ajustamento de técnica de monitoração remota de poluição em cadeias de isoladores a partir de aferições laboratoriais. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017. Disponível em: . Acesso em: 25 de jan. 2026.

ZHANG, Y. et al. Infrared thermography for fault diagnosis of transmission line insulators. *Infrared Physics & Technology*, v. 98, p. 21–29, 2019.