

COMPARAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE DRONES NA INSPEÇÃO DE LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO ELÉTRICA COM O TRABALHO HUMANO FOCADO NA SEGURANÇA DO TRABALHO

COMPARATIVE ANALYSIS OF DRONE USAGE IN INSPECTION OF ELECTRICAL DISTRIBUTION LINES VERSUS HUMAN LABOR WITH A FOCUS ON OCCUPATIONAL SAFETY

Shirlei Cardoso de Andrade¹
Ivo Licasali Furtado Pontes²

RESUMO: A energia elétrica é um insumo essencial para o funcionamento da sociedade contemporânea, presente em residências, comércios e setores estratégicos como a saúde, a indústria e os transportes. Diante do crescimento constante do consumo energético, aumenta também a complexidade das redes elétricas e, com isso, a necessidade de inspeções regulares e seguras. Tradicionalmente realizadas por trabalhadores especializados, essas inspeções envolvem riscos significativos à integridade física dos profissionais. Nos últimos anos, drones têm sido incorporados como alternativa tecnológica para a realização de vistorias aéreas, prometendo maior eficiência e menor exposição humana ao perigo. Este artigo tem por objetivo analisar comparativamente os dois métodos, com ênfase na segurança do trabalho. A pesquisa foi conduzida por meio de revisão bibliográfica e análise de dados técnicos de fontes institucionais e acadêmicas. Os resultados demonstram que a adoção de drones contribui para a redução de acidentes e otimização do tempo de inspeção, sendo uma alternativa promissora e alinhada aos princípios da inovação tecnológica e da prevenção de riscos ocupacionais. 623

Palavras-chave: Drones. Inspeção elétrica. Segurança do trabalho. Linhas de distribuição. Risco ocupacional.

ABSTRACT: Electricity is an essential resource for the functioning of contemporary society, present in homes, businesses, and strategic sectors such as healthcare, industry, and transportation. With the constant increase in energy consumption, the complexity of electrical networks also grows, along with the need for regular and safe inspections. Traditionally performed by specialized professionals, these inspections pose significant risks to workers' physical safety. In recent years, drones have been incorporated as a technological alternative for conducting aerial inspections, offering greater efficiency and reduced human exposure to hazards. This article aims to comparatively analyze both methods, focusing on occupational safety. The research was conducted through a literature review and analysis of technical data from institutional and academic sources. The results demonstrate that the use of drones contributes to reducing accidents and optimizing inspection time, representing a promising alternative aligned with technological innovation and occupational risk prevention.

Keywords: Drones. Electrical inspection. Occupational safety. Distribution lines. Occupational risk.

¹Prof./Orientador. Especialização em Engenharia Segurança do trabalho, Universidade de Vassouras.

²Especialização em Engenharia Segurança do trabalho. Graduação em engenharia elétrica, Universidade de Vassouras.

INTRODUÇÃO

A energia elétrica desempenha papel central no desenvolvimento econômico e social das nações modernas. Presente em praticamente todas as atividades humanas, sua disponibilidade contínua é condição essencial para o funcionamento de residências, serviços públicos, atividades comerciais, indústrias e setores vitais como saúde, segurança e transportes (TCU, 2025).

No contexto brasileiro, o consumo de eletricidade tem apresentado um crescimento consistente nas últimas décadas, impulsionado pela expansão urbana, industrialização e digitalização dos processos produtivos. De acordo com dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em dezembro de 2024 o consumo nacional de energia elétrica alcançou 47.138 GWh, refletindo o aumento da demanda em setores como o residencial, o comercial e o industrial (EPE, 2024).

Grande parte dessa energia é proveniente de fontes hidráulicas, cuja produção exige complexas estruturas de transmissão e distribuição. Após a geração nas usinas, a energia elétrica é transportada em alta tensão por meio das linhas de transmissão, interligando os centros geradores aos centros consumidores e, também, aos sistemas independentes (FUCHS, 2015).

Embora eficazes, os métodos tradicionais de inspeção exigem a presença física de técnicos em campo, muitas vezes em locais de difícil acesso ou com riscos elevados de acidentes, especialmente quedas e choques elétricos. Nesse contexto, a utilização de drones - Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) - surge como alternativa inovadora e mais segura.

Este artigo teve por objetivo analisar comparativamente os dois métodos de inspeção, com foco na segurança do trabalho, a partir de uma abordagem qualitativa baseada em revisão bibliográfica e análise técnica de documentos institucionais.

O estudo foi conduzido com uma abordagem qualitativa, de caráter exploratório e descritivo, voltada à análise comparativa entre métodos tradicionais de inspeção elétrica e o uso de drones em linhas de distribuição. A metodologia envolveu a revisão bibliográfica e a análise de dados técnicos de fontes institucionais e acadêmicas.

Foram utilizados documentos emitidos por órgãos oficiais como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Ministério do Trabalho, a ANAC, e empresas do setor elétrico como a Eletrobras e a Neoenergia. Os dados foram analisados por meio de interpretação de conteúdo, considerando a eficiência técnica, a redução de riscos e o potencial diagnóstico dos drones no contexto da segurança do trabalho.

No estudo foi adotada uma abordagem qualitativa, de caráter exploratório e descritivo, voltada à análise comparativa entre métodos tradicionais de inspeção elétrica e o uso de drones em linhas de distribuição, com foco na segurança do trabalho, eficiência operacional e análise técnica dos dados obtidos. A metodologia aplicada está fundamentada no tipo de pesquisa e é classificada como teórica e qualitativa, baseada na identificação, descrição e interpretação de evidências técnicas e práticas associadas à utilização de drones no setor elétrico. A abordagem qualitativa permite a análise aprofundada de dados não quantificáveis, como relatórios técnicos, artigos científicos, normativas regulamentadoras e experiências institucionais de campo. Como procedimentos metodológicos realizou-se a revisão bibliográfica por meio do levantamento de publicações científicas indexadas em bases como Scielo, Google Scholar e periódicos da área de engenharia elétrica e segurança do trabalho. Também foi realizada a consulta a fontes institucionais: análise de documentos emitidos por órgãos oficiais, como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério do Trabalho, ANAC, e empresas do setor elétrico como Eletrobras e Neoenergia, onde foi adotado como exemplo um estudo de caso. A fim de evitar dados ultrapassados, foram priorizadas fontes publicadas entre 2015 e 2025, com ênfase em materiais que abordassem inspeções em linhas de distribuição de energia elétrica, aplicações de drones no setor elétrico, segurança do trabalho e riscos ocupacionais no setor elétrico, tecnologias embarcadas em VANTs (sensores, câmeras, softwares) e as normas regulamentadoras aplicáveis às atividades elétricas.

625

A análise dos dados coletados foi realizada por meio de interpretação de conteúdo, identificando os principais elementos relacionados à eficiência técnica, redução de riscos, potencial de diagnóstico e limitações operacionais. Os dados qualitativos foram organizados em categorias temáticas que nortearam a estrutura analítica do artigo.

INSPEÇÃO CONVENCIONAL

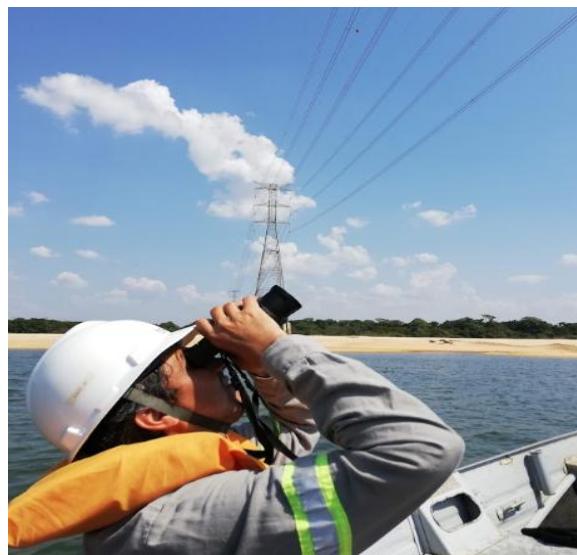
A inspeção convencional de linhas de distribuição de energia é realizada por eletricistas e técnicos de campo que, geralmente, utilizam veículos de manutenção, escadas, equipamentos de elevação ou realizam escalada direta em postes e estruturas. As tarefas envolvidas incluem o planejamento da rota de inspeção com base em mapas da rede, deslocamento até o local da inspeção, muitas vezes por áreas de difícil acesso, identificação visual de anomalias em componentes como cabos, isoladores, transformadores e conexões, além de testes físicos de integridade e registros manuais das observações. (MORAIS, 2020)

Apesar de eficaz, o método tradicional apresenta limitações relevantes, pois as atividades demandam esforço físico intenso, tempo prolongado de execução e expõem o trabalhador a diversos riscos ocupacionais, como quedas e choques elétricos. Observam-se nas imagens como é feito o trabalho tradicional, onde na Figura 1 tem-se a inspeção com fotografia e na Figura 2 a inspeção com binóculos.

Figura 1: Inspeção com fotografia



Figura 2: Inspeção com binóculo



Fonte: Revista o Setor Elétrico, 2024.

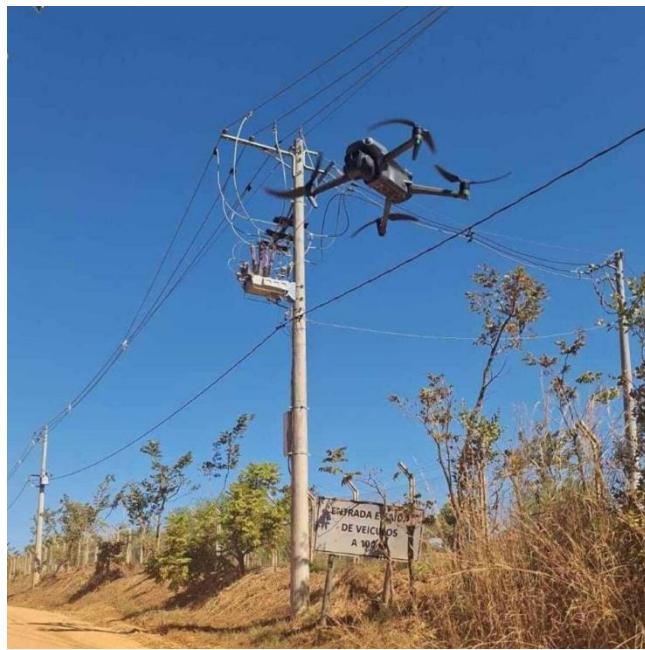
Fonte: Revista o Setor Elétrico, 2024

INSPEÇÃO COM DRONES

O uso de drones na inspeção de linhas de distribuição elétrica tem se consolidado como uma solução tecnológica eficaz para a identificação de anomalias que comprometem a integridade dos ativos e a continuidade do fornecimento de energia elétrica. Equipados com câmeras ópticas de alta resolução, sensores infravermelhos termográficos, sensores multiespectrais e sistemas LiDAR (Light Detection and Ranging), esses dispositivos realizam varreduras tridimensionais e térmicas de alta precisão. (ASAS Brasil Magazine, 2025)

Entre as falhas detectadas estão fissuras e trincas em isoladores, corrosão em estruturas metálicas, desalinhamentos de postes, afrouxamento de conectores, deformações em cabos, pontos quentes em conexões elétricas, proximidade perigosa de vegetação, presença de ninhos e sujeira condutiva. As imagens captadas são georreferenciadas, permitindo histórico de manutenção e análise automatizada por inteligência artificial. (Optelos, 2024). A seguir, imagem ilustrando inspeção com drone, vale observar, que uma grande vantagem do drone, além é claro, de evitar o risco ao trabalhador, e que ele pode tirar fotos em qualquer ângulo.

Figura 3 – Drone inspecionando rede de distribuição



Fonte – CEMIG, 2023

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS DRONES DE INSPEÇÃO

Para garantir a eficácia e a segurança nas inspeções de linhas de distribuição, o drone ideal deve atender a requisitos técnicos que permitam operar em ambientes complexos, sob diferentes condições climáticas e com precisão elevada na coleta de dados visuais e térmicos. O equipamento deve ser classificado como drone industrial multirrotor (geralmente quadricóptero ou hexacóptero), oferecendo estabilidade, capacidade de hover (voo estacionário) e manobrabilidade em espaços reduzidos. (COPEL, 2021)

627

As especificações e parâmetros de um drone para execução da tarefa de inspeção podem ser observadas no Quadro 1.

Quadro 1: Especificações e parâmetros de um drone para inspeção.

Especificação	Parâmetros Ideais
Tipo de Drone	Multirrotor (hexacóptero preferencialmente)
Carga útil (payload)	$\geq 1,5$ kg (para transportar simultaneamente câmeras ópticas, térmicas e outros sensores)
Tempo de voo (autonomia)	30 a 45 minutos (com carga útil média)
Alcance de comunicação	≥ 5 km (linha de visada, com redundância de sinal)

Resistência ao vento	Até 12 m/s (nível 6 na escala Beaufort)
Altitude operacional máxima	≥ 500 m (limitada conforme regulamentação local, mas útil em inspeções topográficas)
Precisão de posicionamento GPS	± 1 cm (RTK ou PPK integrado para mapeamento preciso e inspeções georreferenciadas)
Câmera RGB	Sensor de 20 MP, com zoom óptico de 10x ou mais, estabilização em gimbal de 3 eixos
Sensor termográfico	Resolução ≥ 640x512 px, sensibilidade térmica ≤ 50 mK, faixa de medição de -20°C a 150°C
Sensor LiDAR (opcional)	Precisão ≤ 5 cm, densidade ≥ 200.000 pts/s (para análises 3D de vegetação e estrutura)
Sensores de obstáculos	Detecção omnidirecional com tecnologia de visão estéreo ou ultrassônica
Sistema redundante de segurança	Módulo de emergência com paraquedas e RTH automático (return to home)
Material do corpo	Fibra de carbono ou compostos leves e resistentes
Temperatura operacional	-10°C a +40°C (mínimo), ideal para climas variados

Fonte: BRASIL INSPECT, 2023

RECURSOS DESEJÁVEIS

Segundo Calvo et al. (2023), os recursos desejáveis ao drone são:

Controle remoto com tela integrada ou conectividade com tablets industriais.

Software de missão automatizada: planejamento de rotas por waypoint, (ponto no globo terrestre precisamente definido por coordenadas geográficas através de um sistema global de posicionamento por satélite) detecção automática de anomalias via inteligência artificial.

Compatibilidade com GIS e plataformas de inspeção digital para integração com sistemas SCADA ou plataformas de manutenção preditiva.

Facilidade de transporte e montagem rápida, especialmente importante em áreas remotas.

A justificativa técnica na escolha do equipamento está embasada na alta qualidade de diagnóstico, com imagens detalhadas e dados térmicos precisos, maior segurança do trabalho, eliminando a necessidade de escalada ou interrupção da linha, cobertura de áreas extensas em menor tempo, com registros georreferenciados e acesso a locais de difícil alcance, como zonas montanhosas, florestas ou terrenos acidentados.

AS IMAGENS PRODUZIDAS NA CÂMERA DO DRONE

Nas operações de inspeção aérea com drones, espera-se que as imagens captadas apresentem alta nitidez, estabilidade e riqueza de detalhes técnicos, de modo a possibilitar a identificação visual precisa de anomalias, desgastes e não conformidades nos componentes da rede elétrica. Essas imagens devem ser registradas em diferentes ângulos e distâncias, com resolução suficiente para permitir análises térmicas, estruturais e comparativas ao longo do tempo. A qualidade visual obtida é essencial para garantir diagnósticos confiáveis e subsidiar decisões corretivas baseadas em evidências objetivas. As câmeras embarcadas nos drones operam, em geral, em dois padrões principais: o padrão RGB (vermelho, verde e azul), que reproduz imagens visuais em cores com alto nível de definição; e o infravermelho (IR), utilizado para capturar dados térmicos e detectar variações de temperatura em componentes sob carga. A combinação dessas duas modalidades permite uma inspeção mais abrangente e precisa, com ganhos expressivos na detecção precoce de falhas e na tomada de decisões técnicas fundamentadas.

629

IMAGENS CAPTADAS PELA CÂMERA RGB (VISÍVEL)

A câmera RGB (Red, Green, Blue) é uma câmera óptica de alta resolução, com sensor de 20 megapixels e zoom óptico de no mínimo 10x. Esse equipamento é montado em um gimbal de 3 eixos, o que garante estabilidade da imagem, mesmo em condições de vento moderado ou durante manobras de inspeção em voo. As características das Imagens RGB quanto à resolução e nitidez são produzidas em alta definição (por exemplo, 5472×3648 pixels), permitindo a identificação visual precisa de componentes como isoladores, parafusos, grampos, conexões e etiquetas de identificação. O zoom óptico permite capturas em proximidade segura da linha (sem necessidade de aproximação crítica), mantendo a qualidade da imagem. Isso é essencial para inspecionar estruturas a partir de uma distância segura (5-10 m). Cada imagem é registrada com coordenadas GPS (latitude, longitude, altitude) e metadados como horário, altitude do voo, direção da câmera, facilitando mapeamentos e históricos de manutenção. A câmera adapta automaticamente o foco conforme a

distância ao objeto inspecionado, mantendo o alvo principal em foco com alta profundidade de campo. As anomalias detectáveis com a imagem RGB normalmente são trincas em isoladores, oxidação ou ferrugem em grampos, desalinhamento estrutural, vegetação próxima à rede e cabos desgastados ou desconectados. (DroneVisual, 2024)

IMAGENS CAPTADAS PELA CÂMERA TERMOGRÁFICA (INFRAVERMELHO)

As imagens captadas pela câmera termográfica (Infravermelho) são geradas por meio da câmera termográfica embarcada possuindo resolução mínima de 640x512 pixels, com sensibilidade térmica ≤ 50 mK (milikelvin). Essa sensibilidade permite detectar variações mínimas de temperatura, essenciais para identificar falhas elétricas incipientes. Como características das imagens termográficas está a escala de temperatura onde as imagens representam a distribuição de temperatura em uma paleta de cores (por exemplo, azul para áreas frias e branco/vermelho para áreas quentes), com faixa típica de -20°C a $+150^{\circ}\text{C}$. As imagens termográficas permitem a medição em tempo real onde o operador pode visualizar pontos de aquecimento (hot spots) durante o voo. As imagens podem conter pontos de medição com valores absolutos, máximos e mínimos. Assim como nas imagens RGB (Red, Green e Blue), os dados térmicos são salvos com metadados, permitindo correlação com os ativos específicos no campo (imagem georreferenciada). As anomalias detectáveis com imagem térmica são aquelas onde há aquecimento anormal em conexões e emendas, isoladores com fuga de corrente (detectável por temperatura elevada), sobrecarga em condutores e defeitos internos em transformadores ou disjuntores (em subestações ou chaves seccionadoras). (UFSM, 2025) 630

CLASSIFICAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DAS IMAGENS

As imagens são organizadas por trecho, tipo de estrutura e componente (transformador, isolador, condutor, etc.). Softwares de gestão de inspeção como Pix4D, DroneDeploy ou DJI Terra permitem agrupar imagens e mapear visualmente os pontos inspecionados. (DSLRPros, 2020)

PROCESSAMENTO E COMPARAÇÃO

As imagens captadas são comparadas com padrões de referência de conformidade (imagens de equipamentos em bom estado), histórico anterior da mesma estrutura, o que permite detectar evolução de falhas, mapas térmicos, que destacam áreas de superaquecimento

com cores específicas, modelos de inteligência artificial, que identificam padrões de anomalias como rachaduras, pontos quentes ou corrosão. (SAMPLE, et al. 2025)

Antes da inspeção, define-se o que é considerado "conforme" — ou seja, padrões de integridade física e funcionamento esperado dos componentes. Esses padrões são estabelecidos com base em normas técnicas (como as da ABNT ou IEEE), manuais dos fabricantes e dados históricos.

Por meio de softwares de visão computacional ou inteligência artificial, as imagens são analisadas automaticamente. Esses sistemas identificam padrões geométricos e térmicos divergentes dos parâmetros considerados normais. (Sensyn Robotics, 2024)

Essa comparação permite identificar, classificar e priorizar problemas, listar falhas detectadas por gravidade (alta, média e baixa) além de fornecer informações detalhadas para um diagnóstico técnico mais preciso, gerar imagens comparativas entre inspeções, gerar mapas temáticos com pontos críticos destacados e sugerir prioridades de manutenção.

Esse método permite decisões mais rápidas e fundamentadas, além de facilitar auditorias e acompanhamento histórico.

COMPARAÇÃO ENTRE A INSPEÇÃO CONVENCIONAL E COM DRONE

A comparação entre os métodos tradicionais de inspeção e aqueles realizados por drones torna-se essencial para avaliar ganhos operacionais, técnicos e de segurança. Ambas as abordagens têm como finalidade identificar falhas e manter a integridade da rede de distribuição elétrica, mas diferem amplamente quanto aos recursos utilizados, tempo de execução, riscos envolvidos e qualidade das informações obtidas. A seguir, apresenta-se uma análise comparativa entre os dois modelos, considerando critérios como eficiência, precisão, exposição ocupacional e confiabilidade dos dados coletados em campo.

631

COMPARAÇÃO VISUAL QUALITATIVA (INSPEÇÃO CONVENCIONAL)

Na comparação visual direta entre as imagens de conformidade e não conformidade, o especialista observa diferenças evidentes em aspectos como forma, cor, textura e posição. Para que a comparação seja eficaz, é importante que a imagem de conformidade seja uma captura "perfeita", sem defeitos ou distúrbios. Diferenças visuais são normalmente notadas em zonas de contraste. Por exemplo, ao comparar dois isoladores, um com fissura e outro sem a fissura será visível como uma linha ou área de coloração diferente. Na utilização da imagem térmica, a conformidade e a não conformidade são centradas na variação de temperatura. O diferencial é

que a imagem térmica de conformidade geralmente apresentará uma uniformidade térmica (sem picos significativos), enquanto a de não conformidade apresentará pontos quentes, que indicam áreas com problemas. (MARAFON, 2024)

Para imagens RGB (Visíveis), a conformidade é observada quando se obtém imagem nítida de componentes como isoladores, cabos e suportes, com aparência intacta e sem deformações visíveis. Para as imagens de não conformidade serão observadas trincas ou fissuras no isolador, corrosão ou desgaste nos grampos ou conectores e desalinhamento visível de postes ou cabos. (ELRAHEEM, 2025)

Para Imagens Termográficas (Infravermelho), a imagem de conformidade será definida pela distribuição de temperatura de maneira homogênea, com variações mínimas entre os componentes. As imagens de não conformidade apresentarão hot spots (pontos de aquecimento) que aparecem como áreas mais quentes (geralmente representadas em cores como vermelho ou branco). Conexões com sobreaquecimento podem ser visualizadas facilmente como áreas mais intensas em termos de temperatura. (FENTERMAKER, 2024).

COMPARAÇÃO QUANTITATIVA (ANÁLISE AUTOMÁTICA E PÓS-PROCESSAMENTO)

A comparação quantitativa entre as imagens é realizada por meio de softwares especializados de análise de imagens e processamento de dados, que utilizam algoritmos de inteligência artificial (IA) ou processamento de imagens (como técnicas de subtração de imagens, comparação de histogramas e análises espectrais). No processo de comparação quantitativa são realizadas subtração de Imagens onde a comparação entre imagens de conformidade e não conformidade pode ser feita através da subtração pixel a pixel, identificando as diferenças. No caso de imagens RGB, a diferença será calculada nas cores de cada pixel (R, G e B), enquanto para imagens térmicas, a diferença será calculada na temperatura de cada pixel. (SANTOS, 2024)

Usando-se a análise de histograma, podem-se realizar a comparação dos histogramas de duas imagens comparando a distribuição de intensidades de cor ou temperatura. Desta forma, uma imagem de conformidade mostrará uma distribuição de cores ou intensidades uniformemente distribuídas (no caso de imagens térmicas, sem grandes picos de temperatura) e o histograma de uma imagem de não conformidade pode mostrar desvios significativos na distribuição, como picos de temperatura ou áreas com coloração diferente, que indicam falhas ou anomalias. (PHUNG, 2018)

INDICADORES E MÉTODOS DE QUALIDADE NA COMPARAÇÃO

A comparação entre imagens de conformidade e não conformidade também pode envolver a definição de limites e thresholds para o que é considerado aceitável em cada tipo de imagem. Assim, para imagens RGB, os critérios podem ser desvio de forma – se a estrutura se desvia em mais de 2–5% do alinhamento original; desvio de cor – devendo a cor da superfície estar dentro de uma gama aceitável (não mostrando sinais de corrosão ou desgaste). (LEARNING DRONE PHOTOGRAPHY, 2025)

Para imagens térmicas, a comparação pode envolver o desvio de temperatura - se a temperatura exceder um determinado limiar, como 10°C a 20°C acima do normal e área de aquecimento - se a área aquecida ultrapassar um percentual específico da área do componente (por exemplo, mais de 10% do isolador apresenta alta temperatura). (Nagler, 2022)

FERRAMENTAS DE COMPARAÇÃO AUTOMÁTICA

Algumas ferramentas específicas podem facilitar essa comparação, como: (REMOTE INSPECTIONS, 2024; TELEDYNE FLIR, 2025).

Pix4D: Para georreferenciamento e análise de imagens térmicas e visuais.

DroneDeploy: Para análise automatizada de imagens, com a possibilidade de _____ 633 destacar falhas visuais e térmicas.

FLIR Tools: Software que analisa imagens térmicas e destaca anomalias térmicas (pontos quentes) de maneira fácil.

MATLAB ou Python (OpenCV): Para desenvolvimento customizado de algoritmos de comparação de imagens com base em aprendizado de máquina e análise de imagem.

RESUMO DA COMPARAÇÃO DE IMAGENS

Quadro 3: Resumo da comparação das Imagens

Método de Comparação	Descrição	Resultado Esperado
Comparação Visual Qualitativa	Inspeção visual direta das imagens de conformidade e não conformidade	Identificação óbvia de falhas ou diferenças
Subtração de Imagens	Subtração de valores de pixels entre as duas imagens	Identificação precisa das diferenças térmicas ou visuais
Histograma	Comparação das distribuições de cores/temperatura	Detectar alterações significativas na distribuição
Deep Learning e IA	Classificação automática de imagens como conformidade ou não conformidade	Detecção de anomalias em grandes volumes de dados

Fonte: Licasali, 2025

SEGURANÇA DO TRABALHO E RISCOS OCUPACIONAIS

A inspeção de linhas de distribuição elétrica, quando realizada por métodos convencionais, envolve uma série de atividades críticas que expõem os trabalhadores a riscos ocupacionais significativos. Esses riscos decorrem, sobretudo, da necessidade de acesso físico direto às estruturas da rede, tais como postes, cruzetas, isoladores, transformadores e demais componentes energizados, muitas vezes localizados em ambientes de difícil acesso, como zonas rurais, encostas, florestas ou áreas urbanas densamente povoadas. (Drone Pilot Ground School, 2024)

O principal risco associado à atividade de inspeção manual é o trabalho em altura, o qual é regulamentado pela Norma Regulamentadora nº 35 do Ministério do Trabalho e Emprego (NR 35). A execução de tarefas acima de dois metros do nível inferior exige o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs), treinamentos específicos, análise preliminar de risco (APR) e sistemas de ancoragem. Contudo, mesmo com todas essas medidas, ainda há elevado índice de quedas com consequências graves ou fatais, especialmente em casos de falha humana ou estrutural.

Outro fator crítico é o risco de choque elétrico, regulamentado pela Norma Regulamentadora N° 10 (MTE, 2024). Ao realizar inspeções visuais ou medições em componentes energizados ou próximos a eles, o trabalhador está sujeito a arcos elétricos, descargas ou contato acidental com condutores sob tensão. A ausência de manutenção adequada nos equipamentos ou a não observância de distâncias mínimas de segurança podem agravar esse risco, colocando em perigo não apenas o inspetor, mas também a equipe de apoio e a população próxima.

Além dos riscos físicos evidentes, há ainda riscos ergonômicos relacionados a posturas forçadas, levantamento de cargas, esforços repetitivos e longas jornadas sob exposição solar. A atuação em áreas remotas também pode implicar isolamento geográfico, dificultando o acesso rápido a atendimento médico em caso de emergência. Ademais, a presença de vegetação densa, animais peçonhentos, terrenos irregulares, chuvas repentinas ou descargas atmosféricas adiciona complexidade à atividade, exigindo maior preparo e atenção contínua por parte dos profissionais envolvidos. (FEDS GROUP, 2024)

Estudos apontam que os profissionais do setor elétrico figuram entre os mais vulneráveis a acidentes laborais no Brasil. De acordo com o Anuário Estatístico de Acidentes do Trabalho (BRASIL, 2023), os acidentes fatais e graves nesse setor permanecem em níveis preocupantes,

o que evidencia a necessidade de adoção de soluções tecnológicas que contribuam para a mitigação desses riscos. Assim, torna-se cada vez mais pertinente discutir e implementar estratégias que substituam, sempre que possível, a exposição direta do trabalhador por sistemas automatizados de monitoramento, como é o caso dos drones.

CHECKLIST OPERACIONAL PARA INSPEÇÕES COM DRONES

A operação de drones em inspeções técnicas deve obedecer a critérios rigorosos de segurança, controle e conformidade normativa. A seguir, apresenta-se um modelo de checklist prático, dividido em três etapas fundamentais.

Checklist Pré-Voo

- Verificar previsão meteorológica (vento ≤ 12 m/s, sem chuva ou raios);
- Conferir área de voo (zonas restritas, autorizadas pela ANAC);
- Testar hélices, sensores, câmera e bateria do drone;
- Carregar controle remoto e dispositivos de armazenamento;
- Calibrar sensores de navegação e sistema de retorno automático;
- Confirmar EPIs da equipe: coletes, rádios, óculos de proteção;
- Delimitar e sinalizar área de decolagem e pouso;
- Preencher autorização interna ou de terceiros, se necessário.

635

Checklist Durante o Voo

- Manter linha de visada visual (VLOS) em todo o tempo;
- Monitorar nível da bateria e alertas de sistema;
- Acompanhar imagens captadas em tempo real;
- Registrar incidentes ou anomalias operacionais;
- Interromper operação em caso de risco à segurança.

Checklist Pós-Voo

- Pousar em local seguro e desligar o equipamento;
- Armazenar dados coletados (backup);
- Verificar estado físico do drone;
- Registrar tempo de voo, local, operador, tipo de missão;
- Iniciar recarga das baterias;
- Limpar lentes e sensores do drone. (Drone Pilot Ground School, 2024)

CONCLUSÃO

Este artigo teve por objetivo analisar comparativamente os métodos de inspeção manual e com drones em linhas de distribuição elétrica, com ênfase nos aspectos relacionados à segurança do trabalho. Para alcançar esse propósito, foi realizada uma pesquisa de natureza qualitativa, conduzida por meio de revisão bibliográfica e análise de dados técnicos provenientes de fontes institucionais e acadêmicas.

A partir da investigação realizada, constatou-se que o uso de drones representa uma alternativa tecnicamente viável e significativamente mais segura em comparação aos métodos tradicionais. A substituição parcial da inspeção manual por sistemas aéreos não tripulados reduz de forma expressiva a exposição dos trabalhadores aos riscos ocupacionais, principalmente os relacionados ao trabalho em altura e à proximidade com redes energizadas.

Além dos benefícios voltados à segurança, observou-se que os drones contribuem para a melhoria da eficiência operacional, redução de custos logísticos, aumento da acurácia na identificação de falhas e aprimoramento na gestão dos ativos da rede elétrica. As imagens captadas por câmeras ópticas e térmicas embarcadas nos drones permitem uma análise precisa de conformidades e não conformidades, com possibilidade de automação dos diagnósticos por meio de softwares baseados em inteligência artificial.

Dessa forma, conclui-se que os drones não apenas complementam, mas revolucionam os processos de inspeção elétrica, ao conciliar inovação tecnológica, produtividade e prevenção de riscos. Para ampliar os benefícios dessa tecnologia, recomenda-se o investimento em capacitação de operadores, o aprimoramento da regulamentação aeronáutica e elétrica, e a integração plena entre os dados captados e os sistemas de manutenção das concessionárias.

636

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASAS Brasil Magazine. Drones térmicos e mapeamento de subestações otimizam inspeção de redes elétricas. Asas Brasil Magazine, 4 fev. 2025.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica – Dezembro 2024.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. O TCU e o Desenvolvimento Nacional – Minas e Energia.

BRASIL INSPECT. Inspeção com Drones: Tudo o que Você Precisa Saber. Brasil Inspect, 2023.

CALVO, Álvaro; SILANO, Giuseppe; CAPITÁN, Jesús; VILLARRUBIA, Gabriel; OLIVARES-MÉNDEZ, Miguel.. Mission Planning and Execution in Heterogeneous Teams of Aerial Robots Supporting Power Line Inspection Operations. *arXiv*, [s.l.], 9 fev. 2023

COPEL – Companhia Paranaense de Energia. Com uso de drones na inspeção das redes, Copel evita desperdício e reforça segurança do processo. 13 ago. 2021.

DAS, Laya; GJORGiEv, Blazhe; SANSAVINI, Giovanni et al. An Improved Anomaly Detection Model for Automated Inspection of Power Line Insulators. *arXiv*, 14 nov. 2023.

DRONE PILOT GROUND SCHOOL. Powerline Inspection Drones: A Comprehensive Guide for Drone Pilots. *Drone Pilot Ground School*, 2024.

DRONEDEPLOY. Thermal Mapping e Radiometric Processing com DroneDeploy. *DroneDeploy Help Center*, 16 maio 2025.

DroneVisual. Como é realizada a inspeção de linhas de energia com drones. (s.d.).

DSLRPros. What is the Difference Between Pix4D, Drone Deploy, and DJI Terra? *Drone Trends Blog*, 15 abr. 2020.

ELRAHEEM, Amin K. A. Drone-Based Visual, Thermal and Corona Camera Inspection for Power Lines and Grids Infrastructure. *GNSS.AE*, 08 maio 2025.

FEDS GROUP. Using Drones to Enhance Worker Safety in the Utility Sector. *FEDS Group*, 15 nov. 2024.

637

FENSTERMAKER Blog. Everything You Wanted to Know About Thermal Drone Inspections. *Fenstermaker*, 2024.

FUCHS, Rubens Dario; RESENDE, José Wilson; CAMACHO, José Roberto; MACEDO JUNIOR, José Rubens; GUIMARÃES JÚNIOR, Sebastião Camargo. *Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas*. Uberlândia: EDUFU, 2015.

GLOBAL DRONES. Inspeção de linhas de transmissão e distribuição de energia com drones. *Global Drones*

IEEE. Guide for Unmanned Aerial Vehicle-Based Patrol Inspection System for Transmission Lines (IEEE 2821-2020). *IEEE Power & Energy Society*, 2020.

IEEE. Photogrammetric Technical Standard for Civil Light and Small Unmanned Aircraft Systems for Overhead Transmission Line Engineering (IEEE 1936.2-2023). *IEEE*, 2023.

LEARNING DRONE PHOTOGRAPHY. Temperature Threshold Mapping in Drone Thermal Inspections. *Learning Drone Photography*, 2024.

MLÊNDERS, William Mackenzie. New Abnormality Detection Technology for Drones Inspecting Power Facilities. *Unmanned System Technology*, 16 set. 2024.

MORAIS, Lidianne de Fátima Nascimento de. *Estudo da aplicação de drones para inspeção de linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica*. Mossoró: UFERSA, 2020.

NAGLER, Greg. Conducting Overhead Electrical Drone Inspections. Commercial UAV News, 22 jun. 2022.

PIVA, Victor et al. Drone Thermal Inspection Guide: uso de drones térmicos em redes elétricas. DJI Enterprise Insights, 2025.

PIX4D. Processing thermal images (documentação Pix4Dmapper). Pix4D Support, 2025.

RAMIREZ-SÁNCHEZ, et al. A Review: Thermal Imaging of Utility Power Lines. 2024.

REVISTA O SETOR ELÉTRICO. Inspeções em linhas de transmissão 16 de setembro de 2024

SANTOS, Tiago; CUNHA, Tiago; DIAS, André; MOREIRA, António P.; ALMEIDA, José. UAV Visual and Thermographic Power Line Detection Using Deep Learning. Sensors, 2024.

SENSORS (Portugal). UAV Visual and Thermographic Power Line Detection Using Deep Learning. Sensors, 2024.

SENSYN ROBOTICS INC. Developed AI for Automatically Detecting Abnormalities in Power Transmission Equipment in Collaboration with Chubu Electric Power Grid Co., Inc. 06 ago. 2024.

TELEDYNE FLIR. FLIR Thermal Studio Suite – Software for Thermal Analysis and Automated Reporting. Teledyne FLIR, 2025.