

APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA NA MANUTENÇÃO PREDITIVA EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

João Marcos Geris de Alcantara Baptista¹, Daniela Freitas Borges², Aurea Messias de Jesus², Alan Kardec Candido dos Reis², Agaone Donizete Silva², Cláudio Abdalla da Cunha³

¹Discente da Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG, Ituiutaba, Brasil
(joaomarcos_geris@hotmail.com)

²Docente da Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG, Ituiutaba, Brasil

³Bacharel em Engenharia Elétrica. Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG, Ituiutaba, Brasil

Resumo: A manutenção preditiva destaca-se como estratégia essencial para a competitividade e segurança industrial, superando modelos corretivos e preventivos. A termografia infravermelha permite identificar anomalias térmicas em sistemas elétricos de forma não invasiva, sem contato e em tempo real. Este estudo aborda fundamentos físicos, normas técnicas e fatores que influenciam a medição. A análise de casos evidenciou falhas como conexões frouxas, sobrecargas, corrosão e degradação de isolantes.

Palavras-chave: Manutenção Preditiva; Termografia Infravermelha; Sistemas Elétricos; Confiabilidade; Normas Técnicas.

INTRODUÇÃO

Contextualização

A confiabilidade dos sistemas elétricos é um fator crítico para a sustentabilidade e competitividade da indústria moderna. Como a produção é contínua e a indústria moderna é pesadamente dependente da tecnologia, a falha de qualquer componente elétrico único é capaz de causar a parada não programada de toda a instalação, perdendo grandes somas de dinheiro, bem como, em situações extremas, sérios acidentes. A interrupção do fornecimento, por mais curto que seja, pode disparar uma cascata de consequências para além do custo imediato da energia não consumida, afetando a produtividade, a qualidade da produção, os prazos de entrega e, por fim, a reputação da empresa no mercado. Estima-se que o downtime não planejado de equipamentos em indústrias custa, em média, R\$ 700.000 por hora (Aberdeen, 2016).

Nesse cenário, a manutenção torna-se um pilar estratégico vital para a sustentabilidade e o crescimento do negócio. Esse destaque nos últimos anos foi acompanhado pela evolução nas práticas de manutenção. Inicialmente, o modelo baseava-se em uma manutenção corretiva, ou seja, reativa, em que as organizações reparavam seus ativos apenas após a ocorrência de falhas. Esse modelo, apesar de ainda ser adotado por muitas organizações, tornou-se rapidamente extremamente oneroso e arriscado, uma

vez que as falhas inesperadas são recorrentes no momento em que são mais prejudiciais, ou seja, em momentos críticos da produção. Com os avanços em engenharia de confiabilidade e gestão de ativos, surgiram a manutenção preventiva, baseada em intervalos de tempo ou ciclos de operação. Embora represente um avanço significativo em relação à manutenção corretiva, ela ainda possui sérias limitações, uma vez que pode gerar intervenções desnecessárias, quando o componente ainda se encontra em um bom estado, ou insuficientes, ou seja, quando a componente falha antes de atingir o intervalo programado. A abordagem mais eficaz e moderna é a manutenção preditiva, uma vez que perfeitamente alinhada com os valores da Indústria 4.0 e da transformação digital. A manutenção preditiva envolve o monitoramento contínuo ou periódico da condição real dos ativos para antecipar falhas. Dessa forma, as organizações podem planejar e realizar as intervenções exatamente na hora certa, antes que a degradação dos componentes resulte em falhas catastróficas, mas sem desperdiçar recursos com manutenções prematuras.

Uma das tecnologias que possibilitam essa perspectiva preditiva é a termografia infravermelha, um dos métodos mais poderosos, versáteis e difundidos para diagnosticar equipamentos elétricos. A termografia é uma técnica não destrutiva; ou seja, ela usa distribuições de calor para gerar imagens térmicas de qualquer equipamento ou espaço com



corrente. Por sua vez, anomalias térmicas são frequentemente os primeiros sinais de danos em expansão. A principal vantagem da tecnologia infravermelha é que ela permite a inspeção em funcionamento. Assim, a segurança dos testadores é aprimorada, e a interrupção do sistema de produção é evitada.

Problemática

As falhas em instalações elétricas industriais são uma das complicações mais críticas para a administração de ativos e a funcionalidade comercial contínua das organizações. A identificação dos eventos de falha é variada, todas, desde prováveis erros no design e na instalação, a falhas nas partes que ocorrem ao longo do tempo como resultado do tempo e das condições de trabalho. As conexões soltas nos terminais são às vezes as causas de falhas mais comuns.

Um mau contato causa um aumento da resistência de tangenciamento no ponto de proximidade, aumentando o aquecimento local devido ao efeito Joule. No entanto, quanto o aquecimento local atinge alta temperatura, pode causar oxidação excessiva da contiguidade, e isolamento por queima no pior dos casos. Isso acidentalmente ocasiona um incêndio. Além disso, um desequilíbrio entre três fases é de outra forma involuntário, causado por uma grande quantidade de cargas monofásicas ligadas de usuário diferente nas três fases.

Outro motivo primordial de falhas é a corrosão em conectores, essencialmente em condições industriais com alta presença de umidade, partículas flutuantes, poeira, gases danificadores ou variações extremas de temperatura. A corrosão desencadeia uma expansão na resistência de contato e, indubitavelmente, provoca aquecimento localizado. Por fim, a degradação do isolamento elétrico ameaça a saúde e a segurança do sistema, provocando curtos-circuitos.

Assim, a partir do exposto, evidencia-se a problemática que norteia este trabalho: como a termografia infravermelha pode ser, de modo efetivo e sistematizado, empregada na manutenção preditiva de instalações elétricas industriais para antecipação de anomalias e prevenção a falhas.

Justificativa

A relevância do trabalho reside na intersecção de três fatores críticos para a indústria moderna: segurança, confiabilidade e eficiência econômica. As queimas elétricas representam não apenas uma fonte significativa de prejuízo financeiramente direto, na forma dos custos de reparo ou perda de produção, mas também uma ameaça constante à integridade dos trabalhadores e das instalações. A identificação prematura de pontos de aquecimento por meio da termografia é uma ação direta e eficaz nesse aspecto, que permite às equipes de manutenção a intervenção

planejada e segura antes que um cenário se desenvolva de emergência.

Um programa termográfico estruturado com base em normas técnicas internacionais e profissionais qualificados é a base que possibilita a transição de um modelo de manutenção reativa, em grande parte corretiva, para um modelo verdadeiramente preditivo, com benefícios quantificáveis e verificáveis.

Adicionalmente, a termografia infravermelha contribuirá para a eficiência energética da instalação. Conexões de alta resistência, sobrecargas e desequilíbrios geram perdas de energia na forma de calor, que devem ser compensadas pelo consumo de energia. Identificados e corrigidos no tempo, eles não apenas impedem queimas, mas também economizam energia, o que também contribui para a pegada de carbono e a sustentabilidade ambiental. Portanto, a disseminação de conhecimento sobre a aplicação correta do uso da termografia infravermelha, com ênfase nas melhores práticas, normas e interpretação de termogramas, beneficiará todo o setor industrial do Brasil.

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo aprofundado, sistemático e fundamentado sobre a aplicação da termografia infravermelha como ferramenta de manutenção preditiva em instalações elétricas industriais, com foco nas melhores práticas internacionais, na conformidade com as normas técnicas brasileiras (ABNT).

Para a consecução do objetivo geral estipulado, os objetivos específicos a seguir foram definidos, os quais nortearão o desenvolvimento deste trabalho:

- a) Detalhar os princípios da teoria do calor transferido e da radiação infravermelha que embasam a termografia, incluindo as leis de Planck, Stefan-Boltzmann e Wien e os conceitos de emissividade, refletividade e transmissividade.
- b) Analisar criticamente e comparar as principais normas ABNT vigentes ao ensaio de termografia em eletricidade, como as normas NBR 15866: 2010, NBR 16292: 2014, NBR 15572: 2013 e NBR 15424: 2016 e seus principais requisitos para a execução de inspeções termográficas confiáveis.
- c) Definir a metodologia de avaliação do termograma de instalações elétricas, considerando aspectos desde seu plano e preparação até a captura, análise e registro da imagem, abordando questões como emissividade, temperatura refletida, entre outros.
- d) Análise da aplicação da termografia em estudos de casos práticos embasados em dados teóricos e estatísticos nacionais qualificados, comuns em subestações industriais, como mau contato,



sobrecarga, desequilíbrio, corrosão em conector e degradação.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi elaborado a partir de uma pesquisa de natureza aplicada, abordagem qualitativa e objetivos exploratórios e descritivos. A natureza aplicada justifica-se pelo fato de que a pesquisa visa produzir conhecimentos práticos e aplicáveis à oportunidade de um problema real da indústria, neste caso a manutenção preditiva de instalações elétricas por meio da termografia infravermelha.

A abordagem qualitativa, por sua vez, foi a opção metodológica adequada, uma vez que o foco não está em realizar a quantificação estatística de dados, mas sim uma compreensão aprofundada dos fenômenos físicos, metodologias de inspeção, normas técnicas e melhores práticas associadas à termografia. Ou seja, busca-se compreender e descrever processos, procedimentos e critérios de análise relacionados, em vez de estabelecer relações numéricas entre variáveis. Em relação aos objetivos, a pesquisa se classifica com exploratória e descritiva.

A primeira ocorre com a pesquisa para aprofundar o conhecimento sobre um tópico que, embora exista na literatura técnica estrangeira, ainda tem uma divulgação e sistematização precárias no cenário nacional. Esta investigação explorou diversos aspectos da ferramenta, desde os fundamentos teóricos até suas aplicações práticas, reunindo informações de diversas fontes e desenvolvendo parâmetros do caso. A segunda ocorre por meio do esclarecimento de conceitos, de normas, de equipamentos, de procedimentos e de critérios que compõem a prática da inspeção termográfica. Explicou-se como a termografia atua, como aplicar e como interpretar os resultados, preparando um pré-guia para profissionais e empresas que desejam implementar ou aprimorar a ferramenta.

Coleta e análise de dados

A coleta de dados foi realizada de forma sistemática e criteriosa, com especial atenção ao critério de confiabilidade e atualidade das fontes pesquisadas.

Prioritariamente, foram utilizadas fontes oficiais (normas técnicas, anuários estatísticos de órgãos governamentais e de associações reconhecidas), fontes acadêmicas (artigos de revistas científicas revisados por pares, dissertações e teses) e fontes técnicas consideradas de alta reputação (manuais de equipamentos dos principais fabricantes do mercado, publicações de institutos de pesquisas e de entidades técnicas internacionais).

A análise dos dados coletados foi realizada de forma qualitativa, com abordagem dos conhecimentos de forma sintética, correlacionada e interpretada, com o

objetivo de formar uma argumentação coesa, fundamentada e logicamente estruturada que respondesse adequadamente à proposta deste presente trabalho. Algumas das atividades de análise e interpretação dos dados coletados incluíram: Síntese de Conceitos; Comparação de Normas; Interpretação de Dados Estatísticos e Construção da Argumentação.

Revisão bibliográfica

Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva, também conhecida como manutenção reativa ou “quebrou-consertou”, foi o primeiro modelo de manutenção adotado na indústria. Simplificando, os equipamentos são operados até a falha, e apenas então as intervenções necessárias para restaurar a funcionalidade são executadas. É necessária para evitar consequências graves à segurança do trabalhador, aos instrumentos de produção ou ao meio ambiente (Viana, 2012, p. 10).

“A manutenção corretiva é realizada após a ocorrência de uma falha ou pane em um equipamento. Seu objetivo principal é recolocar o item em condições de executar sua função. Muitas vezes ela é realizada em caráter de urgência, pois visa restaurar o funcionamento o mais rápido possível.

Embora possa ser evitada com um programa eficiente de manutenção preventiva, a alternativa corretiva desempenha um papel vital quando ocorrem falhas inesperadas, pois minimiza o tempo de inatividade (Support, 2025).”

Presumivelmente, este é um modelo “simples”, de baixo custo inicial – já que não requer investimentos em monitoramento constante ou manutenções preventivas. No entanto, a manutenção corretiva é inadequada para a maioria das aplicações industriais modernas, devido a várias desvantagens significativas. Em primeiro lugar, a falha é imprevisível; as falhas frequentemente ocorrem nos momentos mais críticos da produção. O reparo emergencial é caro: muitas vezes envolve horas extras, peças de reposição urgentes a preços elevados e serviços de terceiros sob urgência. Paradas não planejadas: produção interrompida, multas por violar acordos de desempenho.

Danos secundários: as falhas de um componente frequentemente danificam outros equipamentos do sistema. Ainda assim, a manutenção corretiva continua a ser adequada para alguns casos de uso, como equipamentos de baixo custo, fácil substituição; redundância: onde o fracasso de parte de um sistema não restringe o sistema de todo; baixa criticidade: equipamentos em operação intermitente.



Manutenção Preventiva

Como já discutido, a manutenção preventiva surgiu como um modelo lógico após a manutenção corretiva. A noção por trás da manutenção preventiva é que a maioria dos componentes possui uma vida útil definida. Através da conclusão de manutenções regulares, como limpezas, lubrificação, ajuste e reposição de peças desgastadas (Support, 2025), a vida útil restante pode ser estendida e a probabilidade de falha reduzida.

“É o tipo de manutenção com base em horas de vida útil. É programada de forma sistemática, ou seja, a manutenção preventiva é feita em intervalos regulares. Para isso, considera o tempo de trabalho como parâmetro para a troca dos componentes.

Quando se utiliza esse tipo de manutenção industrial o objetivo é evitar as falhas futuras, pois já se sabe quanto tempo uma peça pode trabalhar (Luciano, 2025).”

A manutenção preventiva oferecia uma série de vantagens sobre o conceito anterior de manutenção corretiva, abaixo alguns dos exemplos:

- 1) Realizações programadas, reduzindo assim a manutenção não programada e se produzir o mínimo de tempo e efeito sobre a instalação;
- 2) Cuidados regulares resultando na extensão da vida útil dos equipamentos,
- 3) Condições operacionais e de segurança, devido à substituição ou reparo de componentes desgastados e a locais insatisfatórios;
- 4) A capacidade de pré-planejar recursos, incluindo mão de obra, peças de reposição, ferramentas e insumos.

No entanto, a manutenção preventiva tem uma série de deficiências óbvias. A primeira é que todas as intervenções têm uma base estatística e uma estimativa de vida útil, não uma validade atual. Isto pode levar à manutenção forçada e manutenção insuficiente, como a manutenção forçada. Como cada remoção ou ajuste danifica o componente, o componente é revertido após apenas alguns usos sem sucesso. Atuar cedo e muitas vezes significa substituições preventivas regulares.

Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva acaba por representar um salto quantitativo em relação aos modelos anteriores, uma vez que as intervenções passam a ser realizadas com base na condição efetiva do equipamento, monitorada por técnicas de diagnóstico e análise de parâmetros operacionais. O objetivo final da manutenção preditiva é a detecção de sinais de degradação ou de falha incipiente, possibilitando que a manutenção seja realizada em uma janela temporal

ideal antes de ocorrer a falha, mas sem desperdiçar recursos com intervenções precoces, e utilizar o componente até o máximo de sua vida útil (Viana, 2012, p.11-12).

Segundo Kardec e Nascif (2009, p. 44-45):

“É conhecida também por manutenção sob condição ou Manutenção com base no estado do equipamento, pode ser definida da seguinte forma:

É a atuação realizada com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática.

Através de técnicas preditivas é feito o monitoramento da condição e a ação de correção, quando necessária, é realizada através de uma manutenção corretiva planejada.”

As principais técnicas de manutenção preditiva são: Análise de Vibração: utilizada para identificação de desalinhamentos, desbalanceamentos, folgas e falhas em rolamentos de máquinas rotativas; Análise de Óleo ou tribologia: identifica contaminação, desgaste de componentes e degradação de lubrificantes, sendo realizada a partir da análise de amostras de óleo; Ultrassom: detecta vazamentos de ar comprimido, falhas em rolamentos, descargas parciais em equipamentos elétricos e defeitos em válvulas; Termografia Infravermelha: realiza imagens térmicas da distribuição de temperatura em equipamentos, identificando pontos de aquecimento anômalo, que indicam falhas elétricas, processuais ou mecânicas; e Análise de Corrente Elétrica ou Motor Current Signature Analysis – MCSA: identificação de anomalias em motores elétricos a partir da análise do espectro da corrente.

Segundo a Danfoss, a manutenção baseada em condições pode reduzir os custos de manutenção em 14% a 30%, diminuir o tempo de inatividade em 20% a 45%, reduzir paradas em 70% a 75%, elevar a produção em 15% a 25% e proporcionar economia geral de 8% a 12% quando comparada a estratégias tradicionais de manutenção preventiva (Danfoss, 2025).

Manutenção Prescritiva e Indústria 4.0

A definição de manutenção prescritiva, a mais nova forma de manutenção evoluída da preditiva. As gigantescas evoluções apresentadas em Inteligência Artificial, Machine Learning, Internet das Coisas e Big Data Analytics ajudaram a criar a manutenção prescritiva, uma etapa além da preditiva. Enquanto a preditiva travou a localização de uma quebra antes de ocorrer, a manutenção prescritiva vai além e guia que ações devem ser realizadas para que não ocorra a falha, alavancando a performance do equipamento e otimizando o retorno do investimento.



“Responsável por realizar medições e análises de forma remota e em tempo real. Está intimamente atrelada à Indústria 4.0, uma vez que os técnicos responsáveis não necessitam ir a campo para fazer uma avaliação minuciosa dos equipamentos. Para isso, a indústria precisa contar com equipamentos integrados e com o uso da Inteligência Artificial (TagOut, 2023).”

Conforme apontado por GlobalData (2023), os sensores conectados, que constituem a base da Internet das Coisas (IoT - Internet of Things), são capazes de transmitir dados operacionais em tempo real provenientes de milhares de pontos de medição distribuídos em uma instalação. Esses dados são enviados para plataformas de computação em nuvem, onde algoritmos de Inteligência Artificial (IA) realizam a análise de padrões, comparando-os com modelos de falha previamente estabelecidos e com históricos de falhas de equipamentos similares. Com base nessa análise, o sistema emite recomendações preditivas, indicando quando, o que e por que determinada intervenção de manutenção deve ser realizada.

Além disso, os sistemas prescritivos podem simular diferentes planos de ação, guiando quão ruim pode ser cada decisão para a produção, custo do ativo e vida útil. Uma tendência é a integração da termografia com sistemas de manutenção. Câmeras termográficas fixadas podem realizar inspeções automaticamente contínuas, despachando as imagens e a imagem térmica para sistemas baseados em Inteligência Artificial. Esses sistemas podem automaticamente identificar anomalias e produzir alertas em tempo real, reduzindo drasticamente a necessidade de inspeções manuais e períodos de tempo de resposta.

Termografia Infravermelha

A termografia infravermelha é baseada nas leis da física que descrevem a radiação eletromagnética emitida por corpos aquecidos. Existem três leis que são mais importantes para a termografia: Lei de Planck, Lei de Stefan-Boltzmann e Lei de Wien.

Lei de Planck: Planck define a distribuição espectral da radiação por um corpo negro considerando o comprimento de onda e a temperatura (Da Silva, 2020). Para cada temperatura possível, há um comprimento de onda em que ele emite radiação com a maior intensidade possível. Se a temperatura aumentar, a intensidade da radiação emitida por esse corpo negro em todos os comprimentos de onda também aumentará, enquanto o pico de emissão é movido para comprimentos de onda menores.

Lei de Stefan-Boltzmann: A Lei de Stefan-Boltzmann estabelece que a energia total irradiada por unidade de área de um corpo negro é diretamente

proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta (em Kelvin). Matematicamente, a lei é expressa como:

$$E = \sigma \times T^4 \quad (1)$$

Onde E é a energia irradiada por unidade de área (W/m^2), σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), e T é a temperatura absoluta (K).

Essa relação de quarta potência significa que pequenas variações de temperatura resultam em grandes variações na energia irradiada, o que torna a detecção térmica extremamente sensível. Por exemplo, um aumento de temperatura de 50 °C para 100 °C (de 323 K para 373 K) resulta em um aumento de aproximadamente 2,15 vezes na energia irradiada.

Lei do Deslocamento de Wien: A Lei do Deslocamento de Wien determina o comprimento de onda no qual a radiação de um corpo negro é máxima, em função da temperatura. A lei é expressa como:

$$\lambda_{\text{máx}} = b / T \quad (2)$$

Onde $\lambda_{\text{máx}}$ é o comprimento de onda de pico (em metros), b é a constante de Wien ($2,898 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$), e T é a temperatura absoluta (K).

Para as faixas de temperatura típicas na instalação de instalações elétricas industriais, de 0 °C a 200 °C ou seja, 273 K a 473 K, o comprimento de onda de pico de emissão está na faixa de 6 a 10 μm , que é uma região do infravermelho médio. Como já mencionado, câmeras infravermelhas são projetadas para detectar radiação nesses comprimentos de onda porque a emissão é máxima na faixa de temperatura que estamos interessados.

É importante notar que os objetos reais não são corpos negros perfeitos. Eles emitem apenas uma fração da energia que um corpo negro emitiria na mesma temperatura. Essa propriedade é chamada de emissividade (ϵ), um valor adimensional que varia de 0 (espelho perfeito, que não emite radiação) a 1 (corpo negro perfeito). A emissividade depende do material, do acabamento da superfície, do comprimento de onda da radiação e, em menor grau, da temperatura. A correta configuração da emissividade na câmera termográfica é crucial para uma medição precisa da temperatura.

Equipamentos termográficos

As câmeras térmicas modernas são dispositivos sofisticados que integram óptica infravermelha, detectores sensíveis, processamento digital de imagens e interfaces de usuário intuitivas.

“A câmara de termografia é o principal instrumento de uma inspeção termográfica. Através dele a radiação infravermelha emitida pelo objeto é detectada

e convertida em imagem visível e em leituras de temperatura. A escolha correta da câmara de termografia para a inspeção depende do conhecimento das características técnicas da câmara de termografia, do ambiente onde ele será utilizado e do tipo de componente que será inspecionado (Aroeira, 2024).”

Compreender a precisão e as especificações técnicas dos componentes dessas câmeras é crucial para a seleção adequada da câmera para cada aplicação e para a interpretação correta dos resultados obtidos.



Figura 1. Câmera Thermal iSee.

Componentes Principais

a) Lentes infravermelhas: A lente de uma câmera termográfica é constituída por materiais transparentes à radiação infravermelha, como o germânio ou seleneto de zinco. Ao invés das lentes de vidro tradicionais em câmeras fotográficas convencionais que bloqueiam a radiação infravermelha, lentes de germânio permitem que a radiação infravermelha passe através dela e seja focalizada no detector. A lente certifica o campo de visão da câmera, que pode variar de lente grande angular para inspecionar áreas maiores para lentes telefoto para inspecionar componentes mais distantes ou menores.

b) Detector de infravermelho: O detector é o coração da câmera térmica. Consiste em um conjunto de sensores que transforma a radiação infravermelha incidente em sinais elétricos.

“Dos componentes que compõem a câmara de termografia, o detector de infravermelho é o mais importante e é fator limitante para o desempenho da câmara de termografia.

Os detectores respondem a uma mudança de temperatura com uma variação de alguma propriedade física, como por exemplo, a variação de sua resistência (Aroeira, 2024).”

Existem dois tipos principais de detectores: detectores sem contato, que operam em temperatura ambiente e são mais comuns em câmeras industriais portáteis por serem mais acessíveis; e detectores refrigerados, que oferecem maior sensibilidade e resolução do que os micro bolômetros, mas são mais caros e volumosos devido a um design e sistema de refrigeração mais complexos. Assim, os detectores

refrigerados são usados principalmente em instrumentos científicos e militares.

c) Processador de imagem: o processador recebe os sinais elétricos do detector, aplica algoritmos de correção e calibração e gera a imagem térmica que é então exibida na tela do laptop com a câmera. O processador de imagem também permite o ajuste contínuo de parâmetros de confiabilidade, como emissividade, temperatura refletida, distância, umidade e temperatura ambiente, que são necessários para uma medição precisa.

d) Display e Interface de Usuário: O display exibe uma imagem térmica usando uma paleta de cores que indica a distribuição da temperatura. As paletas mais usadas são a “iron” – que exibe uma imagem entre preto e branco, com tons de vermelho e amarelo; e a “rainbow” – que emprega todos os núcleos de um arco-íris. A interface de usuário permite configurar as configurações de medição, anotar e pontuar regiões diferenciadas, capturar imagens e vídeos e acessar funções avançadas de análise.

Emissividade e Fatores de Influência

A emissividade é, sem dúvida, o conceito mais crítico e, ao mesmo tempo, mais desafiador da termografia.

“A emissividade é uma propriedade de superfície que determina a capacidade dessa superfície em emitir radiação. Os valores de emissividade vão de zero (refletor perfeito) a um (emissor perfeito – Corpo Negro). A emissividade pode variar com a qualidade da superfície, com o comprimento de onda, com o formato do objeto, com a temperatura e com o ângulo de visão (Aroeira, 2024).”

A emissividade de um material, representada por ϵ , é a razão entre a energia radiante do material e a de um corpo negro à mesma temperatura. Como mencionado anteriormente, a emissividade varia de 0 a 1, o que significa que materiais com valores de emissividade altos, próximos de 1, são excelentes emissores de radiação infravermelha. Por outro lado, materiais com valores de emissividade baixos, próximos de 0, são emissores fracos e refletores brilhantes.

Fatores de Influência na Termografia

A má configuração da emissividade na câmera termográfica é uma das fontes mais comuns de erro de temperatura.

“[...] existem influências e limitações neste processo que podem induzir a um diagnóstico incorreto ou até mesmo incapacitar a detecção do defeito. A baixa emissividade dos componentes sob inspeção, a variação da corrente de carga do equipamento inspecionado e componentes de pequena dimensão a grandes distâncias são exemplos de fatores que



dificultam a inspeção termográfica. Em ambientes abertos, além dos fatores citados, influências ambientais como a radiação solar, a atenuação atmosférica, o vento, mudanças na temperatura ambiente, chuva e humidade podem estar presentes (Aroeira, 2024).”

Se a emissividade configurada for maior que a emissividade real do objeto, a câmera subestimar a temperatura. Se a emissividade configurada for menor que a emissividade real, a câmera superestimar a temperatura, conforme abordado previamente. Materiais com baixa emissividade, como metais polidos, são especialmente sujeitos a erros: erros pequenos na configuração da emissividade se traduzem em erros relativamente grandes no valor da temperatura.

a) Temperatura Aparente Refletida: Objetos com baixa emissividade e, por consequência, alta refletividade refletem a radiação infravermelha do ambiente. Assim, a radiação emitida pelo objeto inspecionado é captada pela câmera juntamente com a radiação emitida pelo objeto. Esta radiação adicional pode resultar em erros significativos da medição. A ABNT NBR 16292:2014 define procedimentos detalhados para medir e compensar a temperatura aparente refletida. Em casos em que há fontes de calor intensivas nos arredores do objeto inspecionado, por exemplo fornos, luz solar direta, ou lâmpadas. Atualmente, a radiação refletida pode ser substancialmente diferente da radiação ambiente, e deve ser medida e inserida na câmera para compensação.

b) Distância de Medição: A radiação infravermelha emitida por um objeto é parcialmente absorvida pela atmosfera, especialmente pela umidade e pelo CO₂, à medida que se propaga até a câmera. Quanto maior a distância entre a câmera e o objeto, maior o alcance da absorção atmosférica. Consequentemente, a intensidade da radiação que atinge o detector diminui. As câmeras térmicas modernas podem inserir dados como a distância, a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar, permitindo que o processador compense a absorção atmosférica. Para distâncias superiores a 10 metros e, principalmente, em ambientes com alta umidade, essa compensação é essencial para medições precisas.

c) Ângulo de observação: a emissividade de muitos materiais varia com o ângulo de observação. Para a maioria dos materiais não-metálicos, a emissividade é relativamente constante dentro de um ângulo de observação de até 60° da normal da superfície. Ela diminui à medida que o ângulo de observação aumenta. A emissividade dos metais polidos é muito baixa nesse ângulo, aumentando ligeiramente com o ângulo de visualização. Para obter medições precisas,

a câmera deve ser apontada o mais perpendicularmente possível à superfície do objeto.

d) Condições climáticas: Vento, chuva e luz solar direta podem influenciar significativamente as medições termográficas. O vento aumenta a taxa de resfriamento convectivo, o que pode mascarar anomalias térmicas ou fazer com que componentes normalmente quentes pareçam frios. A chuva resfria as superfícies e cria padrões de temperatura enganosos. A luz solar direta aquece as superfícies expostas e cria falsos positivos – pontos quentes que não são causados por falhas elétricas, mas sim pelo aquecimento solar. Por esses motivos, as inspeções termográficas de instalações elétricas devem ser realizadas em condições de vento fraco, sem chuva e, preferencialmente, sem luz solar direta. Inspeções externas pouco frequentes devem ser feitas no início da manhã ou no final da tarde, quando os efeitos solares são mínimos.

e) Transmissividade do material: alguns materiais são transparentes à radiação infravermelha, enquanto outros são opacos. Por exemplo, o vidro comum é opaco e permite a passagem da radiação infravermelha de ondas mais longas, que é a radiação usada pela câmera termográfica. Portanto, não é possível funcionar sob uma janela de vidro. Materiais plásticos muito finos podem ser parcialmente transparentes ao infravermelho, o que significa que a câmera “vê” o objeto por ele. Essa propriedade pode ser vantajosa em algumas aplicações, mas pode ser confusa quando não considerada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicação da termografia em instalações elétricas

Procedimentos de inspeção termográfica

Fase 1: Planejamento

O planejamento é a fase mais estratégica da inspeção e a primeira a ser realizada. Nesta fase, são determinados os objetivos da inspeção, o escopo, a periodicidade, os recursos e as condições de segurança. O planejamento deve levar em consideração a criticidade dos ativos: equipamentos críticos para a produção primeiro, a carga operacional dos ativos – acima de 40% de seu máximo.

O ideal é que a termografia seja realizada com os equipamentos sob carga. Isso ocorre porque as anomalias térmicas se destacam melhor. As condições ambientais, o acesso seguro a todos os pontos de inspeção e se há necessidade de desligar circuitos são condições para a inspeção.

Fase 2: Preparação

Verificar e calibrar seu equipamento, a câmera termográfica deve estar calibrada e em condições de



funcionamento. As baterias devem estar carregadas e os cartões de memória devem ter capacidade suficiente para armazenar todas as imagens.

Coletar informações: o termografista deve obter diagramas unifilares, plantas das instalações, informações sobre a capacidade nominal dos equipamentos e informação operacional sobre a carga existente no momento da inspeção.

Equipamentos de proteção individual – EPIs: o termografista deve estar protegido com todos os EPIs necessários para trabalho em instalações elétricas, à saber: capacete, óculos de proteção, luva isolante, calçado de segurança e, quando aplicável, roupa de proteção contra arco elétrico.

Comunicação com a equipe de operação: o termografista deve informar a equipe de operação sobre a inspeção, sobre a necessidade e requerimento para acesso das instalações e solicitar informações sobre a carga existente.

Fase 3 : Execução

A execução é a fase do processo em que se concluem as imagens termográficas. O passo-a-passo do termografista consistem em:

Configurar a Câmera: Antes de iniciar a execução dos registros, o termografista deve configurar os parâmetros da câmera, que são emissividade, temperatura refletida, distância, temperatura ambiente e umidade relativa, nos dispositivos atuais a configuração é realizada de forma automatizada.

Realizar a Varredura Térmica: O termografista realiza a varredura de todos equipamentos e componentes que estão dentro do escopo da execução, observando seu display à procura de padrões anômalos de temperatura.

Capturar Imagens de Anomalias: Quando uma anomalia é detectada, o termografista capta imagens termográficas detalhadas do ponto anômico e de componentes semelhantes para comparação, ademais, captar também uma imagem fotográfica do mesmo, tendo em vista a melhor identificação posterior.

Registrar a Anomalia: Para cada anomalia detectada, o termografista deve registrar a localização, o identificador do equipamento, a temperatura máxima digital, a temperatura de referência, a diferença de temperatura, a carga e a condição operacional.

Observar Normas de Segurança: Por fim, é importante que ao longo da execução o termografista nunca toque instalações elétricas ou cercanias, mantendo-se a distância segura e desconectados da energia e também deve se atentar a faísca ou fumaça, ou odor de queimado. Fase 4: Análise

Após a inspeção, o termógrafo realiza uma análise detalhada das imagens capturadas utilizando um

software de análise termográfica. Os seguintes passos devem ser seguidos nesta etapa:

1. **Revisão de Todas as Imagens:** O termógrafo revisa todas as imagens capturadas para confirmar as anomalias identificadas em campo e verificar outros sinais de alerta que possam ter passado despercebidos durante a inspeção inicial.

2. **Medição Precisa da Temperatura:** Utilizando as ferramentas disponíveis no software, o termógrafo mede a temperatura precisa nos pontos quentes e nos pontos de referência, calculando as diferenças de temperatura.

3. **Classificação da severidade:** Utilizando os critérios previstos pelas normas, como ABNT NBR 15866, NETA, etc., o termógrafo classifica cada anomalia como Crítica, Grave, Importante ou Monitorar.

4. **Diagnóstico da Causa Provável:** Com base no padrão de aquecimento, na localização da anomalia e nas características do equipamento, o termógrafo elabora um diagnóstico da causa provável. 5. **Recomendações de intervenção:** Para cada anomalia detectada, o termógrafo formula recomendações de intervenção específicas, incluindo o cronograma proposto para a retificação e as práticas recomendadas.

Fase 5: Documentação

Dessa forma, a última etapa do procedimento é a elaboração do laudo técnico de inspeção termográfica. Essa fase do trabalho é a responsável por documentar os resultados obtidos, as anomalias detectadas, as análises realizadas e as recomendações de intervenção realizadas no equipamento ou instalação inspecionada. O laudo deve ser estruturado em um texto claro, bem formatado, e é constituído das seguintes partes, quando completo e bem elaborado: identificação; escopo; condições de inspeção; resultados; conclusão e anexos. Sendo a linguagem acessível aos gestores de manutenção e operação.

Critérios de avaliação de severidade

A classificação do grau de gravidade de uma anomalia térmica é crucial para priorizar as medidas de manutenção e acrescentar recursos de maneira eficiente. Os critérios de classificação do grau descritos na literatura técnica e também nas normas são diferentes. Os mais usados são os critérios da NETA. A ABNT NBR 15866 usa a referência da NETA e a maioria das companhias no Brasil e em todo o mundo adere a eles.

Com base na diferença de temperatura entre o ponto quente e o ponto de referência (ΔT), com os critérios NETA, as anomalias são classificadas nos seguintes quatro graus.

Categoria	ΔT (°C)	Descrição	Ação Recomendada	Prazo
Prioridade 1 (Crítica)	> 40 °C	Anomalia severa com risco iminente de falha. Possibilidade de danos ao equipamento, risco de incêndio e de acidentes.	Correção imediata. Considerar desenergização de emergência se houver sinais de risco iminente.	Imediato (horas)
Prioridade 2 (Séria)	15 - 40 °C	Anomalia significativa que requer atenção urgente. Falha provável em curto prazo se não corrigida.	Programar correção mais breve possível. Monitorar até a intervenção.	Dias a semanas
Prioridade 3 (Importante)	5 - 15 °C	Anomalia moderada que indica início de degradação. Falha possível em médio prazo.	Programar correção na próxima parada programada. Monitorar evolução.	Semanas a meses
Prioridade 4 (Monitorar)	1 - 5 °C	Anomalia leve ou possível variação normal. Requer monitoramento.	Monitorar em próximas inspeções. Investigar se houver evolução.	Próxima inspeção

Figura 2. Critérios de severidade segundo NETA.

Estudo de caso

será discutido um estudo de caso que se refere à aplicação prática da termografia para detectar anomalias nas instalações elétricas industriais. Situação apresentada com caráter verídico e sido registrado em relatório de inspeção. O conteúdo proposto será estruturado com base na metodologia descrita.

Caso 1: Mau Contato de Disjuntor Termomagnético de Baixa Tensão

Contexto: Durante uma inspeção termográfica rotineira em um painel de distribuição de baixa tensão (QDBT) em uma indústria frigorífica.

Condições de Inspeção: Carga operacional de aproximadamente 20 A (80% da capacidade nominal), temperatura ambiente de 28°C.

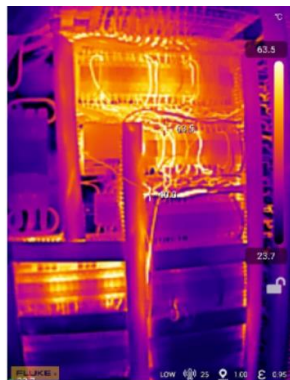


Figura 3. Termograma Disjuntor.

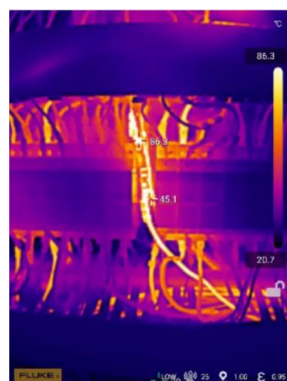


Figura 4. Identificação de Ponto de Aquecimento superior 85 °C.

O termograma acima exibe uma anomalia com interface clara e indiscutível no terminal de saída da Fase B do disjuntor. Nesse exato local, a temperatura máxima medida é de 85 °C. Em contraste, ao terminal de saída da fase A, que carrega corrente semelhante, apresenta temperatura 42 °C. A linha lateral do disjuntor, próximo da área dos terminais, está a 38 °C.

O cálculo da diferença de temperatura (ΔT) entre o ponto quente (Fase B) e os pontos de referência (Fases A) resulta em:

$$\Delta T = 85 \text{ °C} - 42 \text{ °C (média de A)} = 43 \text{ °C}$$

Diagnóstico

Um padrão de aquecimento localizado em um único terminal, enquanto as outras fases estão em temperaturas normais, sugere mal contato elétrico. No caso acima, a alta resistência de contato está no terminal da Fase B. Exemplos comuns de origens de mau contato incluem, entre outros, aperto ruim ou de parafuso de fixação ao terminal, oxidação ou corrosão na superfície de contato, deformação de terminal ou terminal de cabo, tipo errado ou dimensionados do terminal. Uma vez que há uma alta resistência em um ponto de conexão, a passagem de corrente elétrica através do ponto causa aquecimento por Efeito Joule ($P = R \times I^2$).

Como resultado, o aquecimento acelera a oxidação do contato, aumenta ainda mais a resistência e cria um ciclo de degradação progressiva dentro do sistema de conexão. Este tipo de ciclo pode resultar na falha do terminal, na falha do disjuntor e, em algumas situações, em incêndio. Severidade: segundo os critérios NETA, Δ de 44 °C classifica a anomalia como crítica.

Classificação de Severidade

Com a utilização dos critérios da NETA, a anomalia é classificada como Crítica ou Prioridade 1, com um ΔT de 44 °C. A temperatura absoluta de 85 °C aproxima-se de níveis destrutivos para o isolamento do cabo e até para o disjuntor. Além disso, está prevista uma evolução rápida podendo se agravar se nada for feito.

Recomendações

1. **Desenergização Imediata:** O circuito deve ser desenergizado o quanto antes. Recomenda-se que a operação seja feita no mesmo dia da inspeção, para evitar o risco de uma falha catastrófica.

2. **Inspeção Visual Detalhada:** após a desenergização, os técnicos devem realizar inspeção visual detalhada no terminal da Fase B, no cabo conectado e no parafuso de fixação, verificando sinais de oxidação, corrosão, deformação ou outros danos.

3. Limpeza e Reaperto: deve-se limpar as superfícies de contato com escova de aço ou lixa fina, remover qualquer oxidação visível, aplicar pasta ou spray antioxidante e reapertar o parafuso de fixação aplicando torque adequado – função do fabricante do disjuntor.

4. Substituição se Necessário: se o terminal estiver danificado, deformado ou excessivamente oxidado, o disjuntor deve ser substituído ou o terminal do cabo deve ser removido e um novo instalado.

5. Nova Inspeção Termográfica: após a intervenção e a reenergização do circuito, o infravermelho ou a imagem térmica devem ser novamente feitos para confirmar que a anomalia foi corrigida e que a temperatura do terminal diminui para níveis normais.

Análise de Causa Raiz – I: a causa raiz de problemas semelhantes deve ser investigada – erro de instalação, falta de manutenção planejada ou componentes para disjuntores de baixa qualidade.

Impacto da Não Correção

Se a anomalia não for corrigida, a evolução provável é:

- Aumento progressivo da temperatura, com aceleração da oxidação
- Fusão parcial ou total do terminal
- Falha do disjuntor (abertura indevida ou impossibilidade de abertura)
- Parada não programada da esteira transportadora
- Possibilidade de incêndio no painel elétrico
- Risco de acidentes com os trabalhadores

Caso 2: Análise de Aquecimento de Motor Elétrico AC

Contexto: Durante instalação de um motor de alta potência 600 CV, modelo W40 NEMA Premium Efficiency 600 HP 2P 447/9TS 3F 460 V 60 Hz IC01, em um compressor de uma indústria frigorífica foi realizada análise termográfica para verificação de sobreaquecimento no estator do motor.

Condições de Inspeção: Potência do equipamento 600 CV (CAVALO-VAPOR), carga operacional de aproximadamente 270 A (85% da capacidade nominal), temperatura ambiente de 40°C.

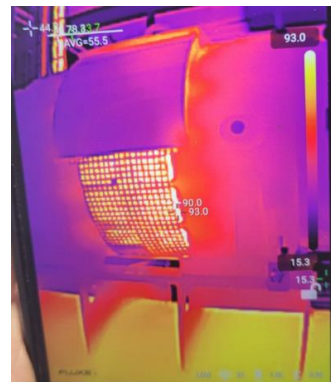


Figura 5. Termograma Estator Motor 600 CV.

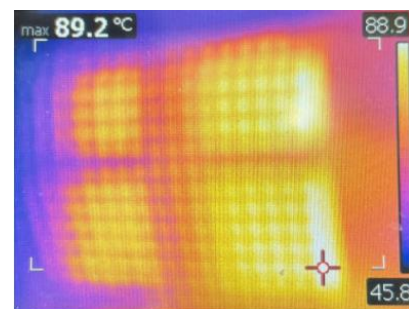


Figura 6. Estator motor 600 CV - 88.9 °C.

Diagnóstico

O padrão de aquecimento sugere o funcionamento dentro de padrões estabelecidos pelo fabricante WEG.

Para confirmar o diagnóstico, o termografista realizou medições de corrente em cada fase do barramento principal:

- Fase A: 270 A
- Fase B: 235 A
- Fase C: 230 A

Assim identificando fator crucial de desbalanceamento de carga entre fases, com a fase A suportando uma parcela maior de carga total do equipamento.

Classificação de Severidade

Aplicando os critérios da WEG sobre condições de vida do equipamento conforme tabela 5 – Classe de Isolamento Motores WEG, a condição é classificada como importante (Prioridade 3). Embora não seja uma emergência, o desequilíbrio deve ser corrigido para evitar a degradação acelerada dos componentes e para melhorar a eficiência energética.

Recomendações

1. Levantamento de Carga: Realize o levantamento detalhado de todas as cargas conectadas ao painel, identificando a fase de alimentação de cada carga e a corrente nominal.



2. Redistribuição de Carga: Com base no levantamento, redistribua as cargas entre as três fases para equilibrar as correntes. Idealmente, a diferença de corrente entre as fases não deve exceder 10% da corrente média.

3. Agendamento da Intervenção: A redistribuição de carga requer a desenergização de circuitos e a troca de disjuntores no painel. A intervenção deve ser agendada para um período de menor impacto na produção, como um fim de semana ou parada programada.

4. Atualização do Diagrama de Fiação Única: Após a redistribuição, atualize o diagrama de fiação única do painel para refletir a nova configuração.

5. Inspeção Termográfica de Verificação: Após a intervenção, realize uma nova inspeção termográfica para confirmar que o desequilíbrio foi corrigido e que as temperaturas retornaram ao padrão normal e equilibrado entre as fases.

6. Monitoramento Periódico: Realize inspeções termográficas periódicas (1 a 2 inspeções anuais ou semestrais) para a detecção precoce de novos desequilíbrios que possam surgir devido à adição de cargas.

Impactos da não correção

- Degradação de componentes da Fase A devido à velocidade de envelhecimento conjunta em disjuntores, cabos, barramentos
- Maior risco de falha da Fase A
- Sobrecarga da capacidade do condutor neutro
- Perdas de energia devido ao efeito Joule
- Energia-ineficiência do sistema
- Aumento dos custos de energia elétrica.

CONCLUSÃO

Por fim, este trabalho conseguiu, a partir de uma profunda revisão bibliográfica, análise de normas técnicas, exposição de estudos de caso, provar que a termografia infravermelha é uma ferramenta de extraordinária eficácia, versatilidade e importância estratégica para o futuro da manutenção preditiva de instalações elétricas industriais. Sua capacidade de detectar, de maneira não invasiva, rápida e in loco, anomalias térmicas precursoras de falhas a torna um dos pilares fundamentais para a manutenção preditiva, confiável e segura no cenário da indústria atual.

Simultaneamente, as estatísticas analisadas no decorrer deste trabalho evidenciam mais uma vez que as práticas preditivas em instalações elétricas devem ser urgentemente implementadas no parque fabril brasileiro. A termografia deve se assumir como um

centro de resultados é um fator crítico de sucesso das organizações.

As sistemáticas de casos explicadas detalhadamente demonstram, na prática, como a termografia infravermelha é utilizada no diagnóstico de falhas elétricas. Cada ocorrência destes casos práticos reforça a importância da análise crítica, leitura do quadro operacional, comparação de desempenho entre componentes similares e uso de critérios de gravidade para determinar a ordem de manutenção.

Além disso, também expõe como a termografia infravermelha não mostra apenas por que um defeito está ocorrendo, mas também como parte integrante de um painel de soluções e métodos técnicos para corrigi-lo de maneira eficaz. Por tudo isso, a aplicação sistemática da termografia infravermelha, dentro de um espectro terminável e abrangente de manutenção preditiva, com a adição dos parâmetros da indústria 4.0 com o IoT, a IA e o Big Data para análise e decisão, é um investimento essencial para qualquer empresa preocupada com a excelência de seus processos, a longevidade de seus negócios e a responsabilidade social nos mercados atuais onde opera.

REFERÊNCIAS

- Abnt - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15424: Ensaios não destrutivos - Termografia - Terminologia. Rio de Janeiro, 2016.
- Abnt - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15572: Ensaios não destrutivos - Termografia - Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos. Rio de Janeiro, 2013.
- Abnt - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15866: Ensaio não destrutivo – Termografia – Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos. Rio de Janeiro, 2010.
- Abnt - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16292: Ensaios não destrutivos — Termografia — Medição e compensação da temperatura aparente refletida utilizando câmeras termográficas. Rio de Janeiro, 2014.
- Abnt - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16818: Ensaios não destrutivos – Termografia infravermelha — Procedimento para realização de inspeções e ensaios termográficos. Rio de Janeiro, 2020.
- Aroeira, Carlos. Equipamentos da termografia. DMC Engenharia e Sistemas Ibéricos, 2024. Disponível em: <https://www.dmc.pt/equipamentos-de-termografia/>. Acesso em: 25 out. 2025.



Danfoss. Manutenção preditiva: maximização da eficiência do equipamento por meio do monitoramento de condição. Danfoss Drives Expert Hub, 2025. Disponível em: https://www.danfoss.com/pt-br/about-danfoss/our-businesses/drives/drives-expert-hub/condition-monitoring-with-intelligent-drives/predictive-maintenance/?utm_source=chatgpt.com#tab-overview. Acesso em: 20 out. 2025.

Kardec, A.; Nascif J. Manutenção: função estratégica. 3ª edição. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2009. 384 p.

Luciano, Bruno. Tipos de manutenção industrial: quantas existem? Qual usar? Abecom, 2025. Disponível em: <https://www.abecom.com.br/tipos-de-manutencao-industrial/>. Acesso em: 20 out. 2025.

Support. NBR-5462: entenda os tipos de manutenção industrial. Disponível em: <https://support.eco.br/manutencao-industrial/nbr-5462-entenda-os-tipos-de-manutencao-industrial/>. Acesso em: 25 out. 2025.

Tagout. Tipos de manutenção industrial: conheça quais são os principais. 2023. Disponível em: <https://www.tagout.com.br/blog/tipos-de-manutencao-industrial-e-como-melhorar-a-eficiencia-nas-industrias>. Acesso em: 25 out. 2025.