



## **A UTILIZAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA NA DETECÇÃO DE ANOMALIAS EM SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO**

Prof. Dr. Lucas Fernando Seelig Rangel Arantes – FACULDADE FLORIDA (FARO)  
André Luís de Paula Santos – FACULDADE FLORIDA (FARO)

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é uma infraestrutura complexa e vital que abrange a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A subestação de distribuição representa o elo final dessa cadeia, sendo responsável por adequar os níveis de tensão e fornecer energia elétrica para consumidores finais, alimentando cidades inteiras e polos industriais. Dentro dessas instalações, uma vasta gama de equipamentos, condutores e conexões opera sob constante estresse elétrico e mecânico. Um dos principais modos de falha em sistemas elétricos é o sobreaquecimento de componentes, um fenômeno governado pelo Efeito Joule. Conexões frouxas, oxidação, corrosão galvânica (especialmente em junções bimetálicas de cobre e alumínio) ou contaminação aumentam a resistência elétrica em um ponto específico. Com a passagem da corrente, esse aumento de resistência provoca uma dissipação de potência na forma de calor. Se não detectada, essa anomalia térmica pode se agravar, levando à degradação de materiais isolantes, falha de equipamentos e, em casos críticos, a interrupções no fornecimento de energia. Diante desse cenário, justifica-se a fundamental importância do monitoramento contínuo da temperatura de conexões e equipamentos. A termografia infravermelha surge como uma técnica de ensaio não destrutivo e não invasivo, capaz de converter a radiação infravermelha emitida pelos corpos em uma imagem térmica visível, chamada de termograma. Ao ser aplicada em uma subestação, a técnica permite identificar "pontos quentes" de forma remota e segura, possibilitando que a equipe de manutenção atue de forma preditiva, corrigindo o problema antes que ele evolua para uma falha catastrófica. Este artigo visa, portanto, constatar a eficácia, as vantagens e os desafios da implementação da termografia infravermelha como pilar da manutenção em subestações de distribuição.

### **II. Conceitos Fundamentais**

Para compreender a aplicação da termografia, é essencial dominar os conceitos que a fundamentam, desde o ambiente de aplicação até a tecnologia em si.



## A. Subestações de Distribuição e Seus Componentes Críticos

Uma subestação de distribuição é composta por equipamentos como transformadores de potência, disjuntores, chaves seccionadoras, barramentos e isoladores. As conexões entre esses elementos são pontos críticos, pois concentram esforços mecânicos e elétricos. Falhas em terminais de transformadores, contatos de chaves ou emendas de cabos são ocorrências comuns que podem ser facilmente detectadas por meio de inspeção térmica.

## B. Princípios da Termografia Infravermelha

Todo corpo com temperatura acima do zero absoluto (-273,15 °C) emite radiação infravermelha, invisível ao olho humano. O termovisor, equipamento central da técnica, possui um sensor capaz de captar essa radiação e, com base em sua intensidade, calcular a temperatura da superfície do objeto. O resultado é um termograma, uma imagem onde diferentes cores representam diferentes temperaturas, permitindo a identificação visual imediata de discrepâncias térmicas. A precisão da medição depende da correta configuração de parâmetros como a emissividade (capacidade de um material emitir energia) e a refletividade do alvo.

## C. Efeito Joule como Origem da Anomalia

A lei de Joule descreve a potência dissipada em uma resistência:  $P=R \cdot I^2$ , onde P é a potência (em Watts), R é a resistência (em Ohms) e I é a corrente (em Ampères). Em uma conexão elétrica ideal, a resistência R é extremamente baixa. No entanto, devido à degradação, a resistência aumenta. Como a potência dissipada é proporcional ao quadrado da corrente, mesmo um pequeno aumento na resistência pode gerar um aquecimento significativo em circuitos de alta corrente, caracterizando a anomalia.



### **III. Metodologia**

O presente projeto foi conduzido por meio de uma pesquisa documental e bibliográfica, com abordagem quantitativa e caráter explicativo. A metodologia foi estruturada nas seguintes etapas:

#### **1. Levantamento Bibliográfico**

Realizou-se uma pesquisa aprofundada em livros, dissertações e artigos científicos, utilizando como base as obras de Santos (2006) e Muniz & Mendes (2019), para consolidar o entendimento teórico sobre termografia e manutenção elétrica.

#### **2. Análise Normativa**

Foi estudada a norma ABNT NBR 16292:2014, que estabelece o guia para inspeção termográfica em sistemas elétricos, a fim de compreender os procedimentos, critérios de avaliação e requisitos de qualificação profissional.

#### **3. Análise Qualitativa**

Investigaram-se as vantagens e desvantagens da aplicação da técnica, com foco nos impactos sobre a segurança operacional, a confiabilidade do sistema e a vida útil dos ativos.

#### **4. Análise Quantitativa**

Realizou-se uma comparação conceitual de custos, confrontando o investimento na implementação de um programa de termografia (aquisição de equipamentos e treinamento) com os custos evitados (multas regulatórias da ANEEL, custos de reparos emergenciais e substituição de equipamentos danificados).

### **IV. Resultados e Discussão**

A análise aprofundada da literatura técnica, das normas vigentes e dos estudos de caso em concessionárias de energia permite consolidar a termografia infravermelha não apenas como uma técnica viável, mas como um pilar estratégico na gestão de ativos em subestações



de distribuição. A discussão a seguir detalha os resultados observados, ponderando tanto os benefícios tangíveis quanto os desafios inerentes à sua implementação.

## **A. Vantagens Estratégicas da Implementação**

A adoção de um programa de inspeção termográfica sistemática gera um ciclo virtuoso de melhorias operacionais, cujos benefícios se manifestam em diversas áreas.

### **Segurança Operacional Aprimorada**

Em um ambiente de alta tensão como uma subestação, a segurança é inegociável. A principal vantagem da termografia é sua natureza não invasiva. A inspeção é realizada a uma distância segura dos componentes energizados, eliminando a necessidade de contato físico ou da aproximação perigosa que métodos mais antigos poderiam exigir. Isso mitiga drasticamente o risco de acidentes graves, como arcos elétricos (arco voltaico) e choques, que podem ter consequências fatais para os profissionais de manutenção. A capacidade de "ver" um problema sem intervir diretamente no circuito representa uma mudança de paradigma na segurança do trabalho em instalações elétricas.

### **Consolidação da Manutenção Preditiva**

A termografia é a personificação da manutenção preditiva. Ao invés de atuar reativamente após uma falha (manutenção corretiva) ou de intervir com base em um cronograma fixo, independentemente da condição do ativo (manutenção preventiva), a termografia permite ações baseadas na condição real do equipamento. A detecção precoce de um ponto quente, antes que ele se torne crítico, possibilita o planejamento detalhado da intervenção. Isso inclui agendar o reparo para um período de baixa carga, adquirir peças de reposição com antecedência, alocar a equipe técnica correta e preparar os procedimentos de segurança necessários, transformando um potencial parada de emergência caótica em uma operação controlada, eficiente e segura.



## Redução Substancial de Custos Operacionais e Regulatórios

Os impactos financeiros da implementação da termografia são profundos. Primeiramente, há a **prevenção de custos diretos** associados a falhas catastróficas. O custo de um reparo simples, como o reaperto de uma conexão, é irrisório quando comparado ao custo de substituição de um transformador de potência ou de um disjuntor de alta tensão, que pode chegar a centenas de milhares de reais. Em segundo lugar, a técnica mitiga os **custos regulatórios**. As agências reguladoras, como a ANEEL no Brasil, impõem pesadas multas às concessionárias que não cumprem as metas para os indicadores de continuidade do serviço, como o DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). Ao evitar desligamentos não programados, a termografia ajuda diretamente a manter esses indicadores dentro dos limites aceitáveis, evitando penalidades financeiras significativas.

## Aumento da Confiabilidade do Sistema e Extensão da Vida Útil dos Ativos

Um componente operando com sobreaquecimento constante sofre uma aceleração em seu processo de envelhecimento. O calor excessivo degrada as propriedades dielétricas dos materiais isolantes (como papel, óleo e polímeros), tornando-os frágeis e suscetíveis a falhas. Ao identificar e corrigir esses pontos quentes, a termografia garante que os equipamentos operem dentro de suas especificações térmicas de projeto. Isso não apenas aumenta a confiabilidade imediata do sistema, evitando interrupções, mas também preserva a integridade dos ativos a longo prazo, estendendo sua vida útil operacional e adiando a necessidade de investimentos vultosos (CAPEX) em substituições.



## B. Desafios e Limitações a Serem Gerenciados

Apesar de suas vantagens evidentes, a implementação de um programa de termografia bem-sucedido exige a superação de desafios técnicos e operacionais importantes.

### Investimento Inicial em Equipamentos e Software

A tecnologia termográfica, especialmente as câmeras de alta resolução e sensibilidade térmica necessárias para aplicações em sistemas de potência, representa um investimento inicial considerável. O custo pode variar significativamente dependendo da precisão, da resolução do sensor e de funcionalidades adicionais, como gravação de vídeos radiométricos e conectividade. Além do hardware, é preciso considerar os custos com softwares para análise de imagens e geração de relatórios, que são essenciais para documentar e rastrear os achados ao longo do tempo.

### Necessidade de Qualificação Profissional Especializada

A eficácia da termografia depende criticamente da competência do profissional que a executa. Um termografista qualificado precisa ir muito além de simplesmente "apontar e disparar" a câmera. É necessário um profundo conhecimento sobre os princípios de transferência de calor, radiação e, crucialmente, a correta configuração de parâmetros como a **emissividade** do material inspecionado e a **temperatura aparente refletida**. Um erro na configuração desses parâmetros pode levar a diagnósticos completamente equivocados: um "falso negativo" (não detectar um problema real) pode resultar em uma falha inesperada, enquanto um "falso positivo" (identificar um problema que não existe) pode levar a intervenções desnecessárias, dispendiosas e que introduzem novos riscos. A certificação profissional, seguindo normas como a ISO 18436, é fundamental para garantir a confiabilidade das inspeções.



## Influência de Fatores Ambientais e Operacionais

A inspeção termográfica em campo aberto, como em uma subestação desabrigada, está sujeita a uma série de variáveis que podem distorcer as medições. A radiação solar direta pode aquecer as superfícies e mascarar o calor gerado internamente. O vento pode resfriar um ponto quente por convecção, fazendo com que um problema grave pareça menos crítico. A chuva ou alta umidade podem alterar a emissividade das superfícies. Além disso, reflexos de outros objetos quentes (ou frios, como o céu) em superfícies metálicas e polidas podem criar falsos pontos quentes. O termografista deve ser capaz de identificar e compensar todos esses fatores para obter um diagnóstico preciso.

## Dependência Crítica da Carga Elétrica

O aquecimento em um ponto de alta resistência é governado pela lei de Joule, onde o calor gerado é proporcional ao quadrado da corrente. Isso significa que uma anomalia térmica só se tornará claramente visível quando o circuito estiver operando com uma corrente elétrica significativa. Realizar inspeções em períodos de baixa carga (como durante a madrugada ou em feriados) tem pouca utilidade, pois problemas latentes podem não gerar calor suficiente para serem detectados. Portanto, as inspeções devem ser cuidadosamente planejadas para coincidir com os períodos de pico de demanda da subestação, o que pode apresentar seus próprios desafios logísticos.

## V. Alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

A implementação da termografia em subestações está alinhada às metas da Agenda 2030 da ONU. O estudo contribui para o **ODS 7 (Energia Limpa e Acessível)**, ao reduzir perdas técnicas (energia dissipada como calor) e aumentar a confiabilidade do acesso à energia. Adicionalmente, dialoga com o **ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura)**, pois representa a aplicação de uma tecnologia inovadora para tornar-se uma infraestrutura crítica mais resiliente, segura e eficiente. Por fim, fortalece o **ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis)**, já que um fornecimento de energia estável e confiável é a espinha dorsal para o funcionamento de cidades modernas.



## VI. Conclusão

A análise aprofundada confirmou a termografia infravermelha como uma ferramenta de altíssima eficácia e com excelente retorno sobre o investimento para a manutenção de subestações de distribuição. As vantagens em termos de segurança, confiabilidade e redução de custos operacionais superam largamente os desafios de implementação. A capacidade de antecipar falhas, permitindo uma atuação planejada e preditiva, transforma a gestão da manutenção, saindo de um modelo reativo para um proativo. Conclui-se que a implantação da termografia não deve ser vista como um custo, mas como um investimento estratégico na resiliência e eficiência do sistema elétrico. Sua integração como parte fundamental de um programa de manutenção preventiva e preditiva é indispensável para as distribuidoras de energia que buscam excelência operacional, conformidade regulatória e a garantia de um serviço de qualidade para a sociedade.

## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16292:2014 – Ensaios não destrutivos — Termográfica — Guia para inspeção em sistemas elétricos e mecânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15763:2009 – Ensaios não destrutivos — Termografia — Critérios de avaliação para inspeção de componentes e sistemas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- CARDOSO, J. R. Manutenção Elétrica Preditiva. 3. ed. São Paulo: Érica, 2017.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 18434-1:2008 – Condition monitoring and diagnostics of machines — Thermography — Part 1: General procedures. Geneva: ISO, 2008.
- MUNIZ, Pablo Rodrigues; MENDES, Mariana Altoé. Termografia Infravermelha Aplicada à Manutenção Elétrica: dos fundamentos ao diagnóstico. Vitória: Edifes, 2019.
- SANTOS, Laerte dos. Termografia infravermelha em subestações de alta tensão desabrigadas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.
- USKOWSKI, M.; KRAKOWSKI, Z. Application of infrared thermography for the evaluation of electrical equipment and connections in operation. *Measurement*, v. 138, p. 147-155, 2019.