



IV Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica
IV EnICT
ISSN: 2526-6772
IFSP – Câmpus Araraquara
24 e 25 de outubro de 2019



TERMOGRAFIA APLICADA A MANUTENÇÃO PREDITIVA EM SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO DESABRIGADAS

MICHEL SOARES DE OLIVEIRA¹, FERNANDO AUGUSTO BAPTISTTINI PESTANA²
FABIANA FLORIAN³

¹ Graduando do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara - UNIARA – Araraquara/SP.

E-mail: michelsoares13@hotmail.com

² Orientador, Docente do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara - UNIARA – Araraquara/SP.

E-mail: fernando@rhafer.com.br

³ Coorientadora, Docente do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara - UNIARA – Araraquara/SP.

E-mail: fflorian@uniara.com.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): Engenharia Elétrica – 3.04.00.00-7

RESUMO: A Termografia é uma técnica não destrutiva utilizada em manutenção preditiva, cujo princípio baseia-se no calor emanado em forma de radiação infravermelha da superfície de um objeto sujeito a tensões de origem térmica. Através desta técnica é possível então detectar defeitos de origem térmica em seu estágio inicial, possibilitando rápidas intervenções, visando eliminar as anomalias antes de sua evolução para uma falha, evitando desligamentos indesejados em sistemas elétricos de potência, prejudicando a continuidade do fornecimento de energia e suas consequências, além dos prejuízos decorrentes dessas falhas. Baseado nestas premissas, o estudo apresenta de forma resumida os tipos de manutenções aplicados aos sistemas elétricos de potência, os principais conceitos sobre termografia, os planos mínimos de manutenções exigidos pela agência reguladora, além do modo de classificação da anomalia térmica referente ao grau de severidade do aquecimento. É apresentado também um estudo de caso aplicado à manutenção preditiva, onde foi possível adotar uma solução para eliminação de um ponto de aquecimento detectado através da inspeção termográfica efetuada em uma seccionadora de uma subestação de alta tensão, mostrando a eficiência desta técnica em diagnosticar possíveis problemas antes de sua ocorrência, gerando além de ações preventivas, grande economia à empresa.

PALAVRAS-CHAVE: falha; manutenção preditiva; termografia.

INTRODUÇÃO

Segundo informações divulgadas à imprensa pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), para o período 2019-2023, prevê-se um crescimento médio anual da carga de energia do Sistema Interligado Nacional (SIN) de 3,8% ao ano, significando uma expansão média anual de 2.687 MW médios. A projeção de carga do SIN atingiria 79.944 MW médios em 2023. Diante desse cenário de rápido crescimento, atrelado a dependência cada vez maior da energia elétrica pela sociedade, é imprescindível que se invista na expansão do SIN além de tornar-se cada vez mais importante e necessário manter a confiabilidade dos sistemas elétricos que já estão em operação para que os mesmos não venham a falhar.

Face ao exposto, ter um bom gerenciamento das manutenções do sistema elétrico controlado pelas várias geradoras, transmissoras e distribuidoras de energia elétrica que atuam no país é cada vez mais oportuno e necessário.

Este artigo aborda as manutenções aplicadas no sistema elétrico de potência, como a corretiva, a preventiva e principalmente a preditiva que se destaca atualmente pelos ganhos obtidos devido a sua grande eficiência no monitoramento de subestações de energia com todos os equipamentos a ela atrelados. Dentro da manutenção preditiva, a termografia é sem dúvida uma das técnicas mais eficazes, logo são apresentados os benefícios de se utilizar a técnica da termografia na manutenção preditiva, guiando as equipes de manutenção das empresas a um melhor planejamento e uma melhor abordagem do defeito.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Manutenção – Conceitos e tipos

Manutenção é um conceito definido como um conjunto de atividades e recursos aplicados aos sistemas e equipamentos de uma instalação, que visa garantir a continuidade de sua função dentro de parâmetros de disponibilidade, de qualidade, de prazo, de custos e de vida útil adequados. Pode ser caracterizada como um processo que tem seu início antes da aquisição de um equipamento tendo como principal função prolongar a sua vida útil (RESENDE, 2015).

Dentro dos tipos de manutenções atualmente existentes se destacam, as manutenções corretivas, preventivas e preditivas. Sendo um dos objetos deste estudo, a manutenção preditiva é a manutenção que atua na prevenção de falhas de um equipamento, porém sem desligá-lo. Ela busca defeitos neste equipamento antes que ocorram falhas, e que possam ser sanados dentro dos desligamentos de suas próprias manutenções preventivas, em desligamentos programados ou até mesmo em desligamentos imediatos, quando estes equipamentos oferecerem riscos as pessoas, a outros equipamentos ou ao sistema. É um tipo de manutenção que monitora os sinais vitais dos equipamentos privilegiando sua disponibilidade, já que sua realização não depende do seu desligamento. Em síntese, a manutenção preditiva busca tornar uma provável manutenção de natureza corretiva em uma programada manutenção preventiva (CASTILHO, 2006).

Requisitos mínimos de manutenção

Em sua Resolução Normativa Nº 669 - Anexo, a ANEEL se refere aos requisitos mínimos de manutenção como um conjunto de atividades mínimas de manutenção preditiva e preventiva com periodicidades e tolerâncias para os equipamentos gerais de uma subestação. É a partir dos resultados das referidas manutenções que a transmissora deve programar suas manutenções decorrentes ou monitorar as anomalias já verificadas. No caso das inspeções termográficas para equipamentos de subestações, o prazo mínimo exigido é de 6 meses com um mês de tolerância (ANEEL, 2015).

Termografia Infravermelha

A radiação infravermelha ou radiação térmica é emitida por todos os objetos e seres vivos que possuem temperatura acima do zero absoluto (0 K ou -273,16° C), sendo que uns emitem mais e outros menos. A intensidade com que esta radiação é emitida depende diretamente da temperatura gerada pelo objeto e da capacidade que este objeto possui de emitir radiação, conhecida por emissividade (ϵ). A emissividade é a propriedade de uma certa superfície que determina a capacidade que esta mesma superfície possui de emitir radiação, onde seus valores vão de zero a um, sendo que 1 representa a máxima emissão possível, comparado a um emissor perfeito chamado de corpo negro, onde quanto maior a temperatura do objeto, maior será a sua radiação emitida (SANTOS, 2006).

O corpo negro foi definido por Kirchhoff em 1860 como uma superfície que não reflete ou transmite, mas apenas absorve energia, não dependendo da direção ou comprimento da onda. Possuindo o corpo negro um valor unitário, para corpos que não se comportam como corpo negro ideal (corpos reais), seus valores de emissividade (ϵ) variam entre $0 \leq (\text{corpo real}) < 1$. O corpo negro, além de absorver toda a radiação incidente, também deve ser um perfeito irradiador ou “emissor”. Com este conceito, Kirchhoff, definiu a emissividade (ϵ) como a razão entre radiação térmica “G” emitida por um corpo a certa temperatura pela radiação térmica do corpo negro. Assim, seja um objeto qualquer cuja superfície possui emissividade de 0,7 por exemplo, quer dizer que ele irradia apenas 70% da energia irradiada pelo corpo negro. A emissividade depende da temperatura e da superfície do corpo, sendo que este parâmetro constitui em um importante fator quando da medição de temperatura de um objeto a distância e sem contato direto através da radiação térmica (BALBINOT, 2010).

Conforme figura 1, a região de radiação térmica estende-se entre 0,1 μ m a 1000 μ m de comprimento de onda, incluindo faixas espectrais como a de ultravioleta, visível e infravermelha, porém, usualmente os sensores utilizam a região entre 0,7 μ m à 14 μ m na medição de temperatura (BALBINOT, 2010).

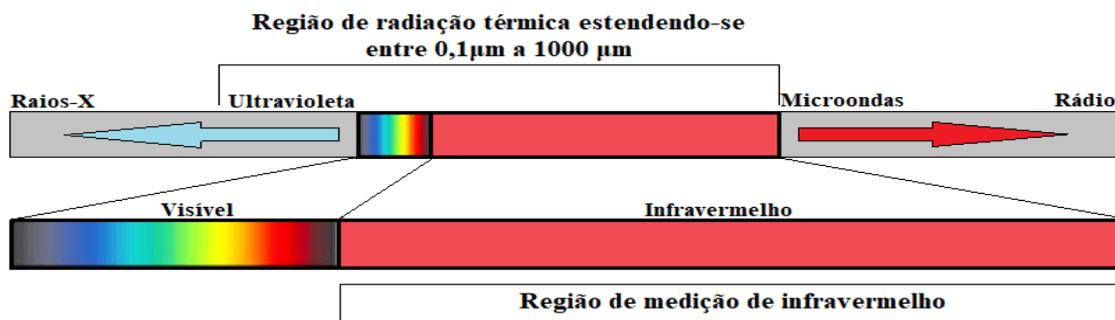


Figura 1 – Espectro Eletromagnético destacando-se a região de radiação térmica e de infravermelho.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A termografia capta a radiação emitida pelo objeto na faixa espectral de infravermelhos que são invisíveis a olho nu, podendo ser observadas após serem convertidas por um termovisor em imagens térmicas visíveis, os chamados termogramas. Logo, com o uso da termografia infravermelha, tem-se a possibilidade de converter tais imagens térmicas em leituras de temperaturas confiáveis associadas ao equipamento analisado de forma não destrutiva. Além disso, os termogramas são produzidos à distância pelo termovisor, o que dispensa o contato do profissional termografista com o objeto a ser inspecionado, tornando esta inspeção preditiva em uma das mais seguras de se realizar no Sistema Elétrico de Potência (SEP) (SANTIAGO, 2016).

Classificação de uma anomalia térmica por grau de severidade

Dependendo do nível de aquecimento encontrado no componente, obtido entre a diferença da temperatura medida e a temperatura ambiente (ΔT_{amb}) levando-se em conta a temperatura de referência (temperatura em um componente similar e sob a mesma carga (ΔT_{ref})), podemos classificar este aquecimento em uma escala de severidades para efetuar o atendimento. Com base na tabela 1, é possível definir a ação a ser tomada e o respectivo prazo para executar a manutenção de acordo com a norma internacional escolhida como segue:

- Severidade Baixa – Deve ser verificado na próxima manutenção programada;
- Severidade Média – Deve ser verificado e corrigido na próxima manutenção programada;
- Severidade Alta – Intervenção de urgência observando as restrições operativas do Sistema;
- Severidade Crítica – Deve-se planejar a intervenção imediatamente.

Tabela 1 – Comparativo de critérios de severidade de algumas normas internacionais.

Fonte: Adaptado de Santos, 2006.

Severidade	Referencia	CES ¹ (°C)	NETA ² (°C)	US NAVY ³ (°C)
Baixa	$\Delta T_{ref} \Delta T_{amb}$	14-20	1-3 1-10	10-24
Média	$\Delta T_{ref} \Delta T_{amb}$	21-60	4-15 11-20	25-39
Alta	$\Delta T_{ref} \Delta T_{amb}$	-	- 21-40	40-69
Crítica	$\Delta T_{ref} \Delta T_{amb}$	>61	>15 >40	>70

¹ CES Guidelines – Overhead electrical wiring. ² NETA – NETA MTS-2001, “Maintenance Testing Specifications for Electric Power Distribution System”, NETA – International Electrical Testing Association. ³ US NAVY – MIL-STD-2194 (SH) “Infrared Thermal Imaging Survey Procedure for Electrical Equipment” Naval Sea Command 02/1988.

Esta tabela é apenas uma referência, pois empresas do setor costumam possuir seus próprios valores de severidade e/ou prioridade conforme experiência adquirida com o tempo de uso de seus equipamentos e rotinas de manutenção.

METODOLOGIA

Estudo de caso de uma anomalia térmica em uma subestação desabrigada do estado do Paraná

Neste tópico, o estudo de caso proposto visa apresentar os benefícios de se realizar inspeções termográficas em subestações de alta tensão desabrigadas da rede básica do SEP, visando à confiabilidade, qualidade e segurança do sistema e das pessoas envolvidas no processo. Através deste será apresentada uma manutenção preditiva realizada em uma concessionária utilizando a técnica de termografia para identificar um problema em uma seccionadora de um circuito de 138 kV.

Identificação da anomalia térmica

Após uma manutenção preventiva realizada nos contatos de uma seccionadora que já havia apresentado pontos de aquecimento, esses mesmos pontos começaram a aparecer novamente e de forma mais intensa conforme termograma da figura 2, confirmando a degradação de seu contato após a sua retirada conforme figura 3. Com um ΔT_{amb} de 59,4 °C, o atendimento do defeito foi considerado pela concessionária uma “Prioridade 1” em uma escala de 1 a 5 conforme sua tabela interna ou, conforme tabela 1 deste trabalho, uma “Severidade Crítica” pela norma NETA, o que sugere uma intervenção imediata. Deste modo, tal severidade levou a equipe de manutenção a intervir na mesma utilizando-se de técnicas de linha viva, fazendo um *by-pass* na seccionadora para a retirada de seu contato móvel com defeito.



Figura 2 – Termograma evidenciando o forte aquecimento no contato e no conector por condução.

Fonte: Autor.



Figura 3 – (a) Tubo de alumínio e (b) chapa de cobre banhada a prata com desgastes.

Fonte: Autor.

Com o passar do tempo outros circuitos que possuíam a mesma seccionadora do mesmo modelo e fabricante começaram a apresentar sobreaquecimento, sempre detectado através da técnica preditiva de inspeção termográfica. Esses sobreaquecimentos consecutivos em circuitos cuja seccionadora era da mesma marca e modelo mostraram que o defeito poderia ser realmente relativo à parte construtiva do contato da parte móvel, especificamente no tubo de alumínio que envolve o contato de cobre recoberto com banho de prata.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Percebe-se pela figura 3 que o tubo de alumínio que fixa o contato de cobre banhado em prata, é oco, e oferece uma pequena área de contato com o mesmo. Para Padilha (2005) em uma conexão pobre, a temperatura do conector aumenta e acelera a deterioração das áreas de contato, causando dessa maneira uma resistência maior. A deterioração é cumulativa, resultando em temperaturas cada vez mais altas até a falha do conector. Veja que são usados dois parafusos para pressionar o tubo de alumínio no contato, e devido ao fato do alumínio possuir menor resistência mecânica, ele não suporta um torque forte o suficiente para um contato expressivo com a chapa de cobre banhada com prata, além de amassar. A pequena área de contato do alumínio aliada ao reaperto, ocasiona um atrito irregular e conseqüente perda do banho de prata no local, resultando em pequenos pontos de contato entre o cobre e o alumínio, causando conforme Padilha (2005), a corrosão galvânica.

A prata, além de ser um ótimo condutor e proporcionar estabilidade térmica à conexão cobre-alumínio, tem a finalidade de impedir a formação de corrosão galvânica entre esta conexão (PADILHA, 2005). Embora o cobre e o alumínio tenham natureza de processos diferente (como oxidação, relaxação de tensão, expansão térmica diferencial, corrosão galvânica, formação de compostos intermetálicos e *fretting* (desgaste pó fricção) que afetam adversamente a ininterrupta passagem de corrente elétrica através de uma conexão de alumínio-cobre e alumínio-alumínio), ambos são todos guiados pelo mesmo fenômeno fundamental, sendo o mais importante deles o da degradação da interface de contato e a mudança da resistência de contato associada. Destes processos, tem-se a corrosão galvânica como a mais encontrada e também uma das mais prejudiciais com relação à estabilidade das conexões alumínio-cobre (PADILHA, 2005).

Adotando-se o sistema metal-metal no caso deste estudo (cobre-alumínio), a corrosão galvânica vem a ser um dos mais sérios tipos de degradação. O metal que possui o potencial eletrolítico mais negativo é anódico e será consumido pela ação galvânica. Nas conexões bimetálicas como o cobre-alumínio, o alumínio (componente anódico) dissolve-se e deposita-se sobre o catodo de cobre na forma de óxido de alumínio hidratado, com uma evolução do hidrogênio no catodo (cobre). Deste modo, o processo irá continuar pelo tempo no qual a solução eletrolítica continuar presente ou até que o alumínio seja inteiramente corroído, mesmo que o acúmulo dos produtos da corrosão venha a limitar a taxa de corrosão na superfície da peça (PADILHA, 2005). Para solucionar essa falha de projeto das seccionadoras e impedir que este tipo de defeito viesse a causar perdas financeiras devido ao risco de desligamento, foi desenvolvida uma peça em alumínio maciço que envolve o contato de cobre banhado de prata inserido no interior do tubo de alumínio. Tal arranjo promoveria uma maior área de contato e conseqüentemente um maior torque de aperto dos parafusos de fixação, sem o risco de deformar o tubo de alumínio. A peça confeccionada pode ser conferida na figura 4.



Figura 4 – Arranjo confeccionado para aumentar a área de contato e evitar a corrosão galvânica.

Fonte: Autor.

Concluída a etapa de montagem do arranjo na seccionadora, as inspeções termográficas subsequentes não evidenciaram mais aquecimento nos contatos, certificando que a solução desenvolvida foi satisfatória.

CONCLUSÕES

A termografia aplicada de forma preditiva mostra-se uma excelente ferramenta para diagnosticar possíveis problemas antes de sua ocorrência, podendo ser realizada com os equipamentos de uma subestação em operação e à distância, oferecendo uma inspeção com excelente custo-benefício e extremamente segura ao profissional termografista.

Com o estudo de caso, foi possível demonstrar que esta técnica aliada à manutenção preditiva é viável e efetiva, pois a identificação da anomalia para posterior análise e resolução do problema transformou-se em uma ação preventiva em várias outras seccionadoras de mesmo modelo e fabricante. Tal ação evitou grandes prejuízos financeiros à empresa motivados por desligamentos acidentais, aumentando a qualidade, confiabilidade e segurança no SEP, proporcionando planejamento de ações que visem a continuidade do fornecimento de energia e segurança das pessoas envolvidas, além de manter uma boa imagem da empresa junto a seus clientes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço e sou grato ao Senhor Deus, criador de todas as coisas visíveis e invisíveis; a minha noiva e aos meus pais que tanto me apoiam; a todos os meus colegas de turma, professores, orientador, coorientadora e coordenador, que sempre acreditaram e me incentivaram perante as dificuldades do ambiente acadêmico. A todos o meu muito obrigado.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 669, DE 14 de Julho de 2015**. Regulamenta os Requisitos Mínimos de Manutenção e o monitoramento da manutenção de instalações de transmissão de Rede Básica. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audencia/arquivo/2014/022/ resultado/ren2015669.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audencia/arquivo/2014/022/resultado/ren2015669.pdf)>. Acesso em: 10 de mar. de 2019.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. v. 1. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

CASTILHO, JOÃO CARLOS NOGUEIRA DE; LIMA, FRANCISCO ASSIS. **Aspectos da Manutenção dos Equipamentos Científicos da Universidade de Brasília**. Dissertação apresentada a Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Ciência da Informação e Documentação (FACE) da Universidade de Brasília como requisito ao Grau de Especialista em Desenvolvimento Gerencial – Brasília – DF, 2006.

EPE. Notícias. <<http://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-ons-e-ccee-divulgam-projecao-da-carga-para-o-periodo-de-2019-a-2023>>. Acesso em: 05 de mar. de 2019.

PADILHA, HÉLIO. **Estudo sobre Revestimentos Depositados por Aspersão Térmica para Melhorar o Desempenho de Conexões Elétricas**. Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos (PIPE) / Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba – PR, 2005.

RESENDE, MATEUS MARCACINE. **Manutenção Preditiva: Inspeção Termográfica em Subestações de Rede Básica do Sistema Elétrico de Potência**. Trabalho de conclusão de curso para graduação em engenharia elétrica da faculdade Pitágoras de Londrina – PR, 2015.

SANTIAGO, PAULO MESSIAS; SILVA, EDUARDO LUIZ DA. **Termografia Aplicada em Redes de Distribuição**. Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica 2016 - XIV CEEL, Universidade Federal de Uberlândia – MG. Disponível em: <https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/doc/artigos/artigos2016/ceel2016_artigo084_r01.pdf>. Acesso em: 10 de mar. de 2019.

SANTOS, LAERTE. **Termografia Infravermelha em Subestações de Alta Tensão Desabrigadas**. Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia da Universidade Federal de Itajubá como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Energia, Itajubá - MG, 2006.