



Grupo de Estudo de Subestações e Equipamentos de Alta Tensão-GSE

A eficácia do monitoramento preditivo de para-raios de óxido de zinco - ZnO de subestações, através da termografia infravermelha, na identificação de degradação prematura dos varistores e penetração de umidade nos equipamentos

ALEXSANDRO TEIXEIRA GOMES(*)
CEMIG GT

RESUMO

O trabalho apresenta a evolução da termografia infravermelha no monitoramento preditivo off-line de subestações e equipamentos, destacando os importantes avanços no processo, que têm permitido a aplicação dessa atividade de manutenção na área de Transmissão da CEMIG-GT com excelentes resultados, permitindo identificar e/ou aferir o estado de Defeito dos equipamentos, instalação ou sistema, minimizando a probabilidade de Falha.

O trabalho destaca a eficácia do monitoramento preditivo de para-raios de óxido de zinco - ZnO de subestações, através da termografia infravermelha, na identificação de degradação prematura dos varistores e de perda de estanqueidade dos equipamentos, como resultado de Planos de Manutenção de Rotina. Esses equipamentos estiveram em operação por um tempo muito inferior à expectativa de vida esperada, ou seja, operaram de 3 meses a 1 ano, para uma expectativa de vida útil técnica prevista pelos fabricantes em torno de 20 anos, e uma vida útil regulatória de 24 anos de acordo com o MCPSE¹.

PALAVRAS-CHAVE

Monitoramento, Termografia Infravermelha, Subestações e Equipamentos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Para-raios e com diferenças de temperatura a partir de 3°C em relação a para-raios adjacentes podem ser classificados com defeito. Além disso, de acordo com a experiência do setor elétrico, outras metodologias permitem uma avaliação mais ampla desses e outros equipamentos, como: análise em relação à temperatura absoluta, diferenças de temperaturas em relação à temperatura ambiente, diferenças de temperatura em relação a equipamentos adjacentes e avaliação da distribuição de temperatura do próprio equipamento. Baseado na ref.⁽¹⁴⁾.

Em relação ao histórico de manutenção de para-raios, há alguns anos a CEMIG-GT não desliga esses equipamentos para a realização dos ensaios tradicionais de Resistência de Isolamento e de Perdas Dielétricas, já que esses ensaios não são eficazes para o diagnóstico da condição operativa desses equipamentos, conforme diagnóstico realizado pela empresa. Por outro lado, a empresa tem investido muito no aprimoramento da termografia infravermelha no tocante a Aquisição de Equipamentos de Alto Desempenho (Termovisores), Capacitação de Pessoal e Desenvolvimento de Metodologias de Inspeção adequadas para cada aplicação.

¹ ANEEL – Manual de controle patrimonial do setor elétrico - MCPSE.

2.0 - OBJETIVOS E CONCEITOS DE MANUTENÇÃO

2.1 Objetivos da manutenção

Combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar (restaurar) um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida⁽¹⁾. Pode-se estabelecer então uma correlação entre a Manutenção com Disponibilidade e Confiabilidade da Função, dentro dos limites de especificação e expectativa de vida útil dos materiais e equipamentos⁽²⁾.

2.2 Conceitos da manutenção ^(1, 2, 3, 4 e 5)

Defeito: Qualquer desvio de uma característica de um item em relação aos seus requisitos de especificação.

Falha: Término da capacidade de um item desempenhar a Função requerida.

Manutenção Corretiva: Atividades realizadas em ativos após a ocorrência de falha funcional, com o objetivo de restabelecer sua condição satisfatória de operação.

Manutenção Preventiva: Atividades realizadas em ativos, que estejam na condição de defeito (falha potencial), com o objetivo de restaurar condições de desgaste ou resistência à falha. Pode ser realizada de maneira sistemática, quando existe uma relação direta e conhecida entre a degradação do item e o tempo ou utilização (número de operações), ou pode ser feita de maneira não sistemática em função de inspeções, medições e acompanhamento das condições de resistência à falha do ativo.

Manutenção Detectiva: Atividades de inspeção ou ensaio programado com a finalidade de detectar uma falha funcional que tenha ocorrido, mas que esteja oculta na condição normal de operação da Função.

Manutenção Preditiva: Atividades realizadas para acompanhamento das variáveis, grandezas ou parâmetros que indicam o desempenho dos equipamentos em operação, de modo sistemático, visando definir a necessidade ou não de manutenção preventiva não sistemática. Pode ser feita através de Atividades de inspeção e monitoramento com a finalidade de detectar uma condição de falha potencial. Se na inspeção uma condição de falha potencial é detectada, uma ação de restauração ou substituição (manutenção preventiva não sistemática) deve ser tomada ou programada. Caso contrário o equipamento ou sistema permanece em operação sem atividade adicional, a menos da continuidade das próximas inspeções definidas pelo Planejamento da Manutenção.

Manutenção Preditiva (Monitoramento): Conjunto de atividades de avaliação contínua, periódica e/ou sob condição, das condições de equipamentos, instalação ou sistema. A aquisição dos dados pode ser realizada on-line ou off-line. Inspeções, por sua vez, são verificações das condições de equipamentos, instalações ou sistema. Normalmente seu planejamento é baseado em calendário, número de horas de funcionamento ou número de operações⁽⁵⁾.

A Figura 1 apresenta os Estados Básicos dos Equipamentos e as Atividades Básicas de Manutenção, que permite entender os objetivos básicos da manutenção.

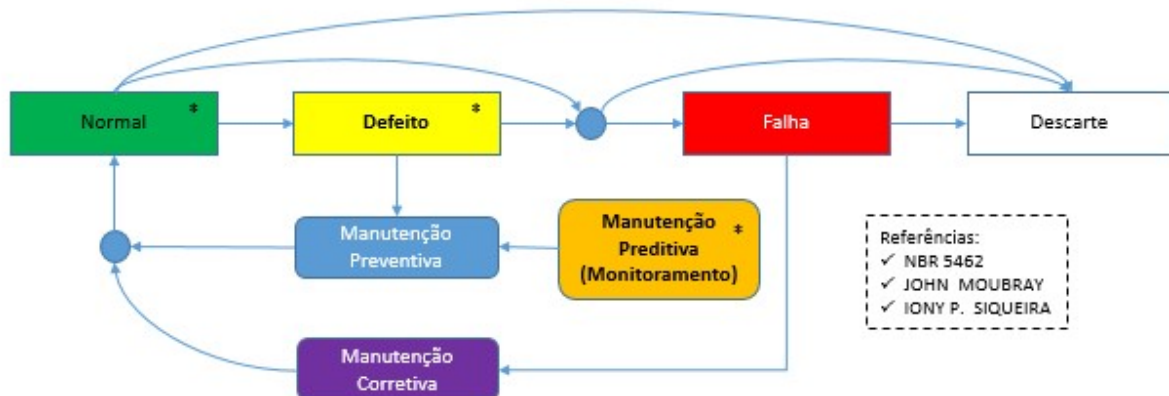


FIGURA 1 – Estados Básicos dos Equipamentos e as Atividades Básicas de Manutenção

3.0 - TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A termografia infravermelha pode ser definida como um método de medição de temperatura, sem contato, que possibilita a formação de imagens térmicas (chamadas termogramas) de um componente, equipamento ou processo a partir da radiação infravermelha emitida pelos objetos ⁽⁶⁾.

No âmbito da manutenção a termografia infravelha é caracterizada como uma técnica de manutenção preditiva, ou seja, uma das atividades de manutenção aplicada de forma sistemática ou sob condição, para o monitoramento da condição dos equipamentos ou sistemas, a fim de se identificar e/ou aferir a gravidade de determinados modos de falha.

Conforme consta na norma ISO 18434-1 a termografia infravermelha é parte de um programa para monitoramento de condições e diagnóstico ⁽⁷⁾. Esse documento, outras referências normativas e bibliográficas específicas, bem como estudos específicos da Engenharia de Manutenção suportam a execução da termografia infravelha na CEMIG.

O avanço evidente na aplicação da termografia infravermelha, como ilustra esse trabalho, se deve à evolução tecnológica dos equipamentos utilizados (termovisores), aprimoramentos na capacitação de pessoal e no desenvolvimento de metodologias específicas de trabalho; sob coordenação da Engenharia de Manutenção. É importante destacar que o monitoramento preditivo off-line de subestações e equipamentos na CEMIG-GT, é executado de acordo com critérios e metodologias desenvolvidas pela Engenharia de Manutenção, por Engenheiros com Experiência e/ou Especialização nas referidas aplicações.

No tocante aos aprimoramentos na capacitação de pessoal, é importante lembrar que a qualificação dos profissionais diretamente envolvidos com o monitoramento da condição, para qualquer técnica de manutenção, poder ter a conformidade avaliada de acordo com o "princípio da neutralidade" ^{2,(8, 9 e 10)}, com plenas condições de aferição da qualidade. No caso particular da CEMIG, e de empresas que têm estrutura similar, todos procedimentos de trabalho e requisitos de capacitação de pessoal para a execução das atividades de manutenção são definidos por profissionais da própria empresa, da área de Engenharia de Manutenção.

4.0 - MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DE EQUIPAMENTOS DE SUBESTAÇÕES ATRAVÉS DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

O relatório do WG A3.32 do CIGRE, que contou com uma pesquisa internacional, incluindo o Brasil, mostra que os métodos de monitoramento não invasivos mais utilizados são os mais tradicionais e de simples aplicação nos equipamentos de manobra, destacando a termografia infravermelha como a técnica mais utilizada no Monitoramento da Condição com o Equipamento em Operação ^(11 e 12), conforme apresentado na Figura 2.

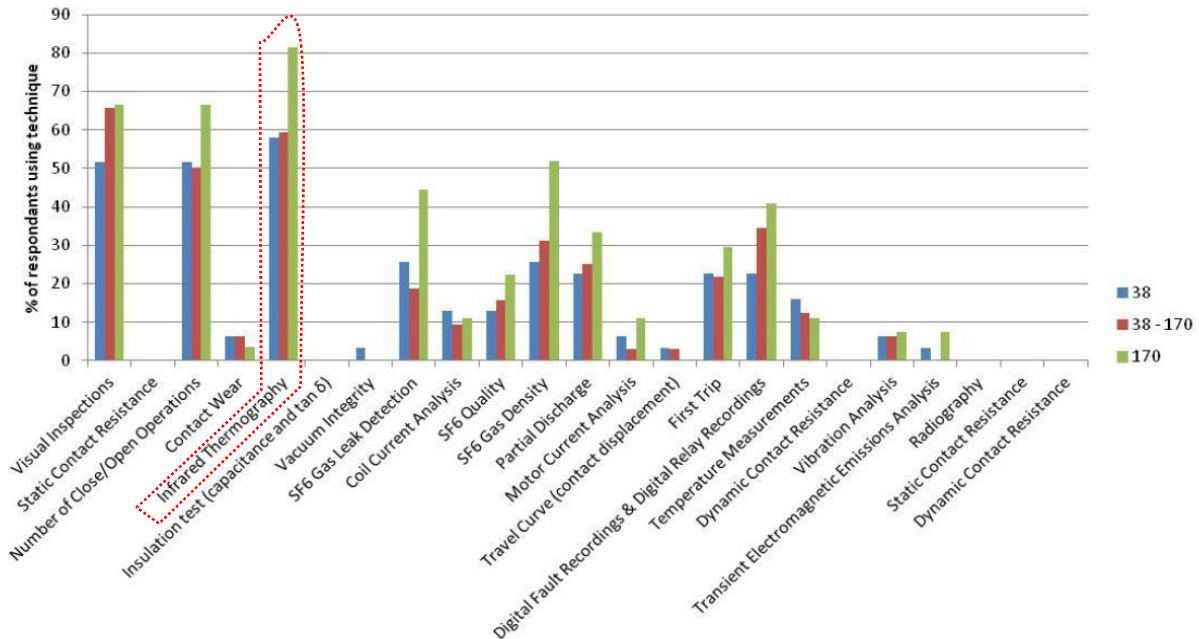


FIGURA 2 – Monitoramento da Condição em Equipamento de Manobra em Operação ⁽¹²⁾

² Princípio da neutralidade – A avaliação da conformidade pode ser avaliada por um fabricante ou fornecedor (primeira parte), um usuário ou comprador (segunda parte), ou um organismo independente (terceira parte) ^(8, 9 e 10).

As Figuras 3, 4 e 5 apresentam exemplos de aplicação do monitoramento off-line e diagnóstico de equipamentos de subestações através da termografia infravermelha⁽¹³⁾.

No caso do banco de baterias, Figura 3, a termografia infravermelha se mostrou capaz de aferir diferentes modos de falha, aderentes com a degradação e fim de vida útil dos elementos do banco.

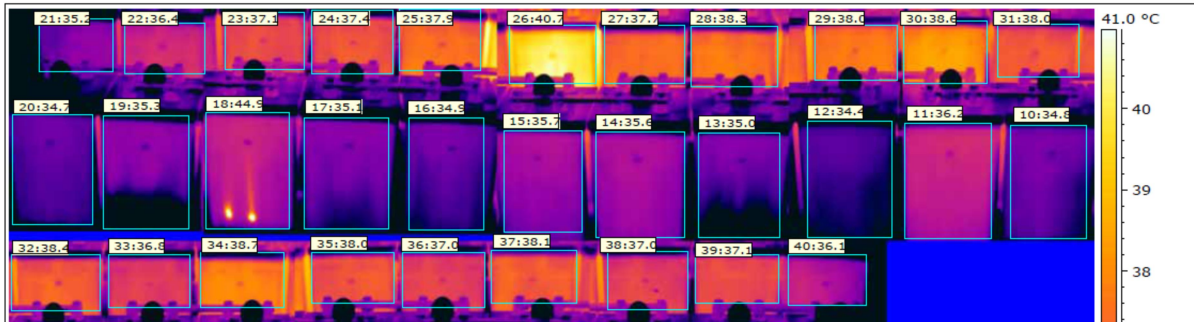


FIGURA 3 - CEMIG - Banco de Baterias Chumbo Ácido - 132V, 60 elementos, 550A/h

No caso do capacitor de potência, Figura 4, foi possível observar perfis térmicos específicos de projetos recentes de unidades capacitivas do tipo fusível interno à partir da termografia infravermelha, que além de serem diferentes do banco de dados histórico da empresa, são diferentes entre si, que trazem um desafio adicional para a engenharia de manutenção.



FIGURA 4 - CEMIG - Banco de Capacitores – Fusível Interno, 230kV, 60,48Mvar

No caso do disjuntor, Figura 5, a termografia infravermelha se mostrou extremamente útil para monitorar a condição operacional do equipamento até o limite operacional possível devido à degradação natural da severa aplicação, contribuindo no âmbito da confiabilidade e da disponibilidade.

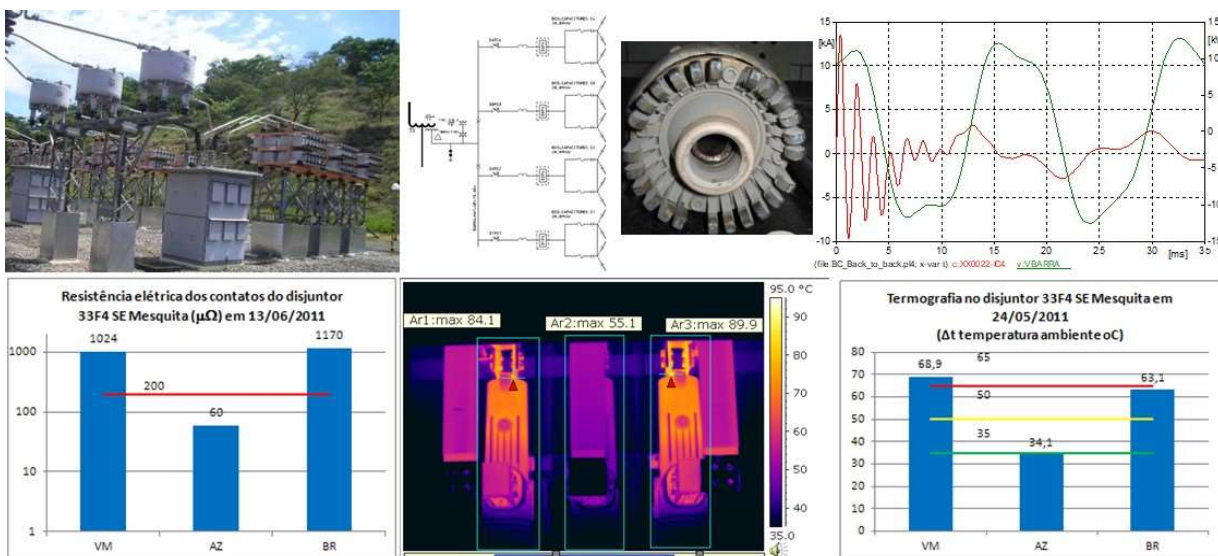


FIGURA 5 - CEMIG - Disjuntor – SF6, 13,8 kV – Banco de Capacitores, 28,8Mvar, Corrente de regime: 1.200 A, Chaveamento 4x back-to-back, Corrente de inrush 13.614A, frequência natural 634,34 Hz

5.0 - O MONITORAMENTO PREDITIVO DE PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO – ZNO ATRAVÉS DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

Conforme concluído pela ABRATE⁽¹⁴⁾, dentre as técnicas preditivas de diagnóstico de para-raios ZnO, a termografia infravermelha foi considerada a técnica mais efetiva, permitindo a retirada de operação do equipamento antes da falha. O trabalho da ABRATE destaca a evolução no diagnóstico à partir do aprimoramento dos níveis de criticidade, a importância do treinamento e da experiência do profissional, as condições de contorno e o desenvolvimento de metodologias para a inspeção. Destaca também a necessidade da correta especificação dos termovisores, principalmente em relação à resolução e à sensibilidade térmica, devido às pequenas diferenças de temperatura que caracterizam defeitos em para-raios e às grandes distâncias dos pontos de medição. É importante ressaltar que o trabalho do CIGRE⁽¹¹⁾, finalizado 5 anos depois do trabalho da ABRATE, porém, com pleno alinhamento, confirma o sucesso da termografia infravermelha como atividade de manutenção preditiva.

5.1 Para-raios de 138 kV - Modo de falha – Perda de estanqueidade (penetração de umidade)

O primeiro caso apresentado na Figura 6 refere-se à uma anomalia térmica verificada em um dos três para-raios de 138 kV de proteção de um transformador, que apresentou um ΔT Máximo 4,3°C em relação aos equipamentos adjacentes, caracterizando o para-raios em estado de defeito, e com uma preocupação adicional porque o equipamento estava em operação há apenas 3 meses. Destaca-se nesse caso que o Processo de Monitoramento Preditivo da CEMIG se mostrou eficaz, tendo em vista que os equipamentos são monitorados desde o comissionamento (com periodicidade reduzida), e no planejamento normal do plano de manutenção à cada 6 meses.

Adicionalmente foi realizada medição corrente de fuga resistiva de 3^oH, sendo verificado em algumas medidas elevação da corrente, contudo na maioria das medidas a diferença era irrelevante. Essas informações em princípio indicavam que não havia degradação dos blocos de ZnO. Porém, Também foram medidas as correntes de fuga total dos para-raios, e o para-raios indicado com defeito pela termografia infravermelha apresentou corrente 35% maior na maioria das medidas, convergindo de certa forma com o diagnóstico da termografia infravermelha, ver Figura 7. Essa experiência comprovou a independência de diagnóstico da termografia infravermelha nesse tipo de aplicação.

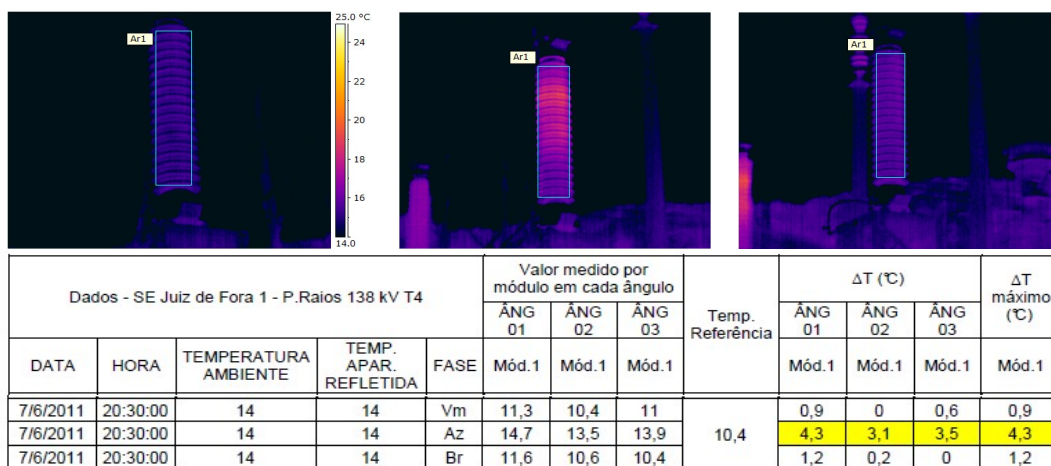
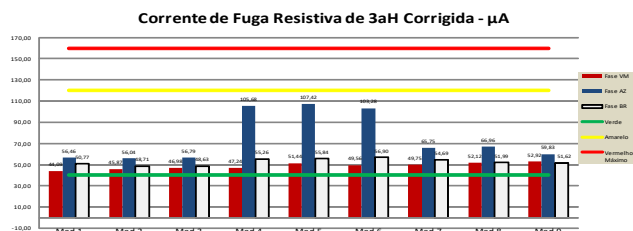


FIGURA 6 - CEMIG – Inspeção termográfica em para-raios de 138 kV



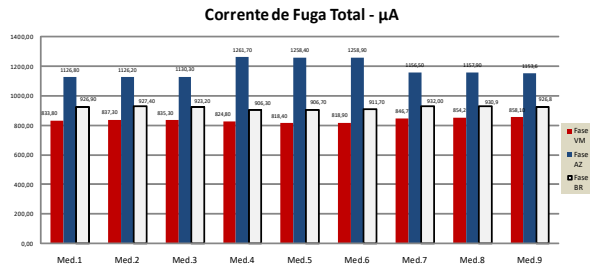


FIGURA 7 - CEMIG – Medição das correntes de fuga em para-raios de 138 kV

Posterior ao diagnóstico de campo os para-raios foram retirados de operação para investigação em conjunto com o fabricante, conforme apresentado nas Figuras 8 e 9.

Os ensaios elétricos comprovaram a condição de defeito do equipamento, que apresentou níveis de descargas parciais muito superiores ao limite aceitável. Referência: $DP \leq 10 \text{ pC}$ ($MCOV \times 1,05 \text{ pu}$).

Posterior aos ensaios o equipamento defeituoso foi desmontado, sendo comprovado a perda de estanqueidade, com presença de umidade e oxidação nas peças metálicas, e umidade nos blocos de ZnO.

A partir da inspeção e análise foi possível identificar a causa da perda de estanqueidade, sendo, deficiência e incompatibilidade dos materiais empregados pelo fabricante no sistema de vedação, sendo ANEL ORING de borracha nitrílica, fixado ao diafragma de alívio de sobrepressão com cola epóxi.

Obs.: Há relatos de experiências negativas no setor elétrico com esse tipo de aplicação de vedação.

N.Série	Tensão pico (kV)	Tensão rms (kV)	Tensão pico/rms (kV)	Corr. pico (mA)	Corr. rms (A)	DP (pC)	Corr. Resist. pico (mA)	Corr. resist. rms (mA)
VM - 005A-1	142,2	100,3	1,42	1,12	0,8	5,5	0,41	0,04
AZ - 005A-2	27,37	19,35*	1,41	1,58	1,12	17,4	0,94	0,49
	41,64	29,44	1,41	2,4	1,69	40,8	1,6	0,89
BR - 005A-3	143,9	101,8	1,41	1,14	0,81	8	0,42	0,08

*19,19% da tensão especificada para o ensaio ($MCOV \times 1,05 \text{ pu} = 100,8 \text{ kV}$)

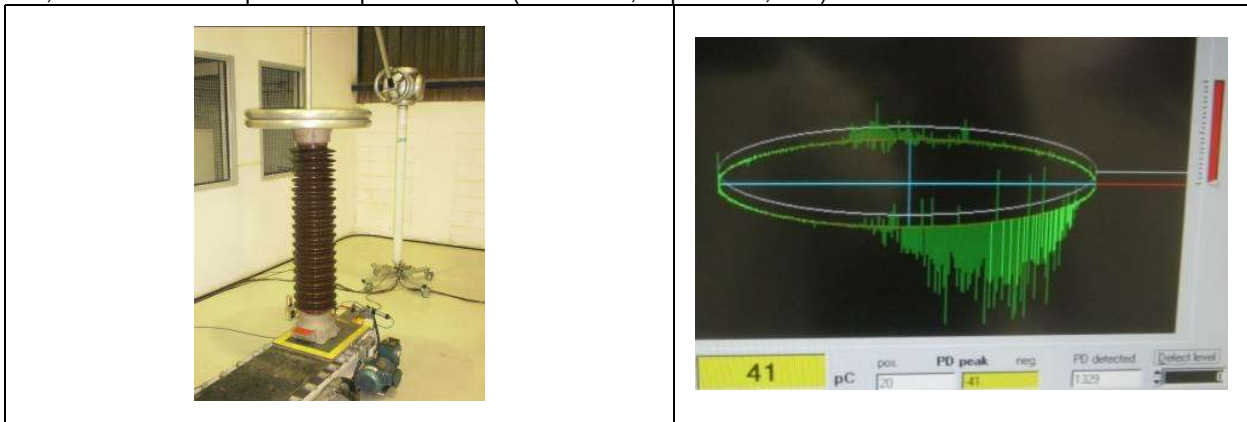


FIGURA 8 - Para-raios de 138 kV – Ensaios de Descargas Parciais no Fabricante



FIGURA 9 - Para-raios de 138 kV - Inspeção no Fabricante - Ponto de penetração de umidade: vedação superior - Colagem do ANEL ORING de borracha nitrílica com cola epóxi no diafragma

Alem de outras melhorias no processo, o fabricante substituiu os materiais do sistema de vedação. O material do ANEL ORING foi substituído por EPDM escolhido por oferecer melhor permeabilidade, intemperismo, ozônio, resistência a água e vapor, mantendo propriedades adequadas de compressão, temperatura e resistência química. Foi substituído o procedimento de fixação com o procedimento de lubrificação, utilizando graxa de silicone. O fabricante também implementou novo ensaio de estanqueidade em para-raios, utilizando gás hélio.

5.2 Para-raios de 345 e 500 kV - Modo de falha – Degradação prematura dos varistores ZnO

O segundo e terceiro casos, apresentados na Figuras 10 e 11, refere-se à anomalias térmicas verificadas em para-raios de 500 kV aplicados em linha de transmissão que estava em operação há apenas 90 dias, e de 345 kV aplicados em transformador que estava em operação há apenas 302 dias.

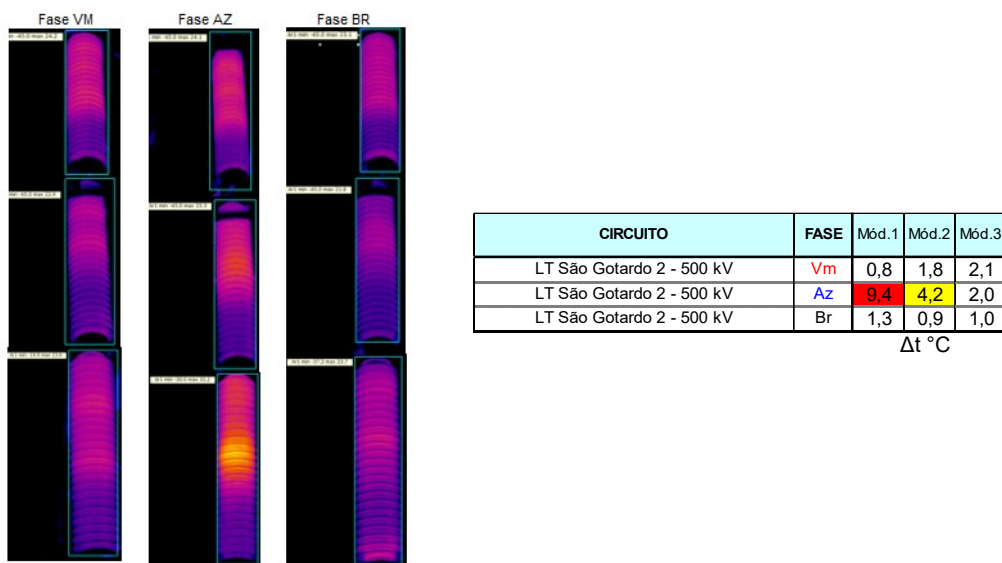


FIGURA 10 - CEMIG – SE Emborcação - Inspeção termográfica em para-raios de 500 kV

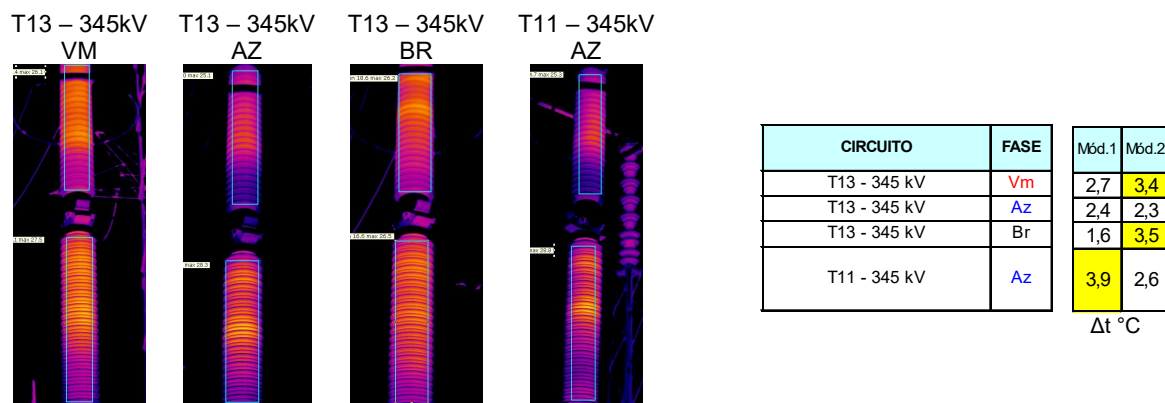


FIGURA 11 - CEMIG – SE Jaguara - Inspeção termográfica em para-raios de 345 kV

Devido ao risco de falha dos equipamentos, e em função da confiabilidade da termografia no diagnóstico de para-raios, a CEMIG optou em não medir a corrente de fuga resistiva de 3^ªH em campo, evitando a exposição dos empregados ao risco. Destaca-se uma grande vantagem da termografia infravermelha em relação à outras atividades de manutenção, que é realizada a uma distância de segurança, mantendo o executante afastado do risco.

Posteriormente os para-raios foram retirados de operação para investigação em conjunto com o fabricante, sendo comprovada a condição de defeito dos equipamentos nos ensaios, que apresentaram níveis de descargas parciais acima do critério de aceitação. Ver Figura 12.

Da mesma forma os equipamentos foram desmontados, sendo comprovada severa degradação dos blocos de ZnO, carbonização dos espaçadores isolantes, presença de umidade nas peças e corrosão nas peças metálicas. Apesar terem sido evidenciados excesso de cola epóxi no sistema de vedação, a penetração de umidade não estava tão clara como nos para-raios de 138 kV. Ver Figura 12.




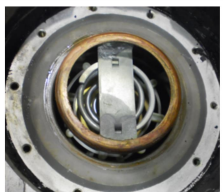


Tensão nominal (kV)	Nº de série	Δt °C	PD pC (1,05 x Uc)	I _r peak mA (MCOV)	Desmontagem e Inspeção (Aprovado?)	Fotos da Inspeção		
312	047A-5-Inferior	3,9	40,00	4,67	Não			
444	048A-2-Inferior	9,4	41,00	6,52	Não			

FIGURA 12 - CEMIG – Para-raios de 500 e 345 kV – Ensaio e Inspeção no Fabricante

Posteriormente o fabricante realizou testes de absorção de umidade nos blocos de ZnO dos para-raios de 500 e 345 kV, sendo comprovado essa susceptibilidade.

Foram realizados ensaios elétricos específicos, intensificando os esforços elétricos nos blocos ZnO, sendo reproduzidos os sinais de degradação dos blocos e os efeitos nos componentes internos do equipamento, sendo comprovada em laboratório a degradação prematura dos varistores.

Da mesma forma, o fabricante repetiu essas ações com um novo modelo de bloco ZnO definido para Recall dos equipamentos, com resultados satisfatórios.

6.0 - CONCLUSÕES

A termografia infravermelha continua sendo uma técnica de manutenção preditiva, ou seja, uma das atividades de manutenção aplicada de forma sistemática ou sob condição para o monitoramento da condição dos equipamentos ou sistemas, a fim de se identificar e aferir a gravidade de determinados modos de falha, conforme se vê nos exemplos apresentados nesse trabalho.

Os defeitos prematuros identificados nos para-raios ZnO, Perda de Estanqueidade e Degradação dos Blocos de ZnO, mostram a importância de se conceber e manter um plano de monitoramento da condição de subestações e equipamentos, e particularmente para termografia infravermelha.

A eficácia da termografia infravermelha no monitoramento da condição dos equipamentos ou sistemas está relacionado também aos resultados trabalhos da Engenharia de Manutenção no planejamento e controle das fases do ciclo de vida dos ativos.

O trabalho destaca a importância do monitoramento preditivo dos ativos do sistema elétrico, promovendo intervenções de manutenção nos momentos necessários, maximizando a disponibilidade e a confiabilidade.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) NBR 5462 - Confiabilidade e Manutenibilidade.

(2) Gomes, Alexsandro Teixeira. Atendimento da Resolução Normativa 669 de 14/07/2015 pela CEMIG GT, com foco no planejamento da manutenção e na integração do sistema informatizado da gestão da manutenção (SAP) com o Sistema de Acompanhamento da Manutenção - SAM do NOS – XXIV SNPTEE, 2017.

(3) MOUBRAY, JOHN. Manutenção Centrada em Confiabilidade, Editora Aladon Ltd, edição brasileira, 2000.

(4) SIQUEIRA, IONY P. DE. Manutenção centrada na confiabilidade, Editora Qualitymark, 1ª edição, 2005.

(5) Martins, Adriana de Castro Passos Martins - Experiência da Cemig GT – Ações Decorrentes dos Planos de Monitoramento Preditivo e de Manutenção Preventiva – XXIII SNPTEE, 2015.

(6) ABNT NBR 15424 - Ensaio não destrutivo - Termografia – Terminologia.

- (7) ISO 18434-1 - Condition monitoring and diagnostics of machines - Thermography - Part 1: General Procedures.
- (8) ABNT NBR ISO/IEC 17007 - Avaliação da conformidade — Orientações para redação de documentos normativos adequados ao uso na avaliação da conformidade
- (9) ISO/IEC DIR 2 - ISO/IEC Directives Part 2 (https://www.iec.ch/members_experts/refdocs/iec/isoiecdir-2%7Bed7.0%7Den.pdf).
- (10) ABNT Diretiva 2 - Regras para a estrutura e redação de documentos técnicos ABNT.
- (11) CIGRE - JWG A3.32 - Non-intrusive methods for condition assessment of distribution and transmission switchgear, 2018.
- (12) Carvalho, Antônio C. Técnicas não intrusivas de monitoramento de equipamentos de manobra de média e alta tensão – CIGRE WG A3.32. CIGRE Brasil - Workshop - Tendências Atuais e Futuras em Monitoramento e Diagnóstico de Equipamentos de Alta Tensão, 2017.
- (13) Gomes, Alessandro Teixeira. Monitoramento e diagnóstico de equipamentos de subestações através da termografia infravermelha. CIGRE Brasil - Workshop - Tendências Atuais e Futuras em Monitoramento e Diagnóstico de Equipamentos de Alta Tensão, 2017.
- (14) ABRATE. Técnicas preditivas de diagnóstico de para-raios, XXII SNPTEE, 2013.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Alessandro Teixeira Gomes, natural de Coronel Fabriciano, Minas Gerais, nascido em 12 de dezembro de 1975. Máster em Engenharia de Confiabilidade e Gestão de Ativos pela PUC MG (2015-2016), Especialista em Sistema Elétrico de Potência pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG (2008-2010), Graduado em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário do Leste de Minas Gerais - Unileste-MG (1997-2003) e Técnico em Eletrotécnica pela Escola Técnica Juscelino Kubitschek (1991-1994). Ocupa o cargo de Engenheiro Sênior de Planejamento de Manutenção de Geração e Transmissão na Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG, atuando como: Coordenador da Equipe de Planejamento e Engenharia Descentralizada, cujas atividades principais são Diagnóstico de Manutenção e Estabelecimento de Planos de Manutenção. Desde 2011 representa da CEMIG na ABRATE Associação Brasileira das Grandes Transmissoras de Energia Elétrica, contribuindo como Especialista em Equipamentos de Subestações de extra-alta tensão, Termografia Infravermelha, Engenharia de Manutenção e Planejamento da Manutenção. Professor Convidado da Disciplina: Métodos de Manutenção do SEP, do Curso: Especialização em Transmissão e Distribuição, na PUC Minas.