



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GLT/09

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

**AValiação da Integridade de Emendas à Compressão por Inspeção Radiográfica
em Linha Viva**

Murilo M. Nogueira (*)
State Grid Brazil Holding

Márcio Souza
State Grid Brazil Holding

Edmundo A. Lins Júnior
BB&E Engenharia e Consultoria

RESUMO

Em 2014 a LT 500 kV Serra da Mesa 2 – Luziânia sofreu dois desligamentos por queda de condutores causada pelo rompimento de emendas à compressão. A prevenção desse tipo de falha é inviável através dos métodos usuais de manutenção, sendo a inspeção radiográfica das emendas a melhor alternativa não-destrutiva.

Este artigo descreve os desligamentos, sua recomposição e as inspeções pós-falha. Diferentes técnicas de inspeção não-destrutiva são discutidas. São apresentados os trabalhos de inspeção radiográfica em linha viva realizados e seus resultados.

PALAVRAS-CHAVE

Emendas à compressão, Inspeção radiográfica, Queda de condutores, Desligamentos em linhas de transmissão

1.0 - INTRODUÇÃO

A queda de cabos condutores em linhas de transmissão é um evento raro. Na maior parte das vezes está ligado a atos de vandalismo, processos de fadiga por vibração ou falhas em acessórios. Neste último caso estão as falhas em emendas as quais, de acordo com testes de tipo realizados em cabos e acessórios de diferentes concessionárias no exterior, possuem taxas de falha superiores às das falhas em cabos e terminações (1).

No Brasil, a maioria das linhas de transmissão em operação possui emendas à compressão (2). Caso haja não-conformidades durante sua prensagem, a luva de emenda pode vir a falhar, causando desligamentos cuja recomposição não é rápida, pois exige o lançamento de novo cabo e a confecção de nova emenda. Tais emergências podem gerar custos elevados tanto para a concessionária (devido à Parcela Variável por Indisponibilidade - PVI) quanto para o sistema elétrico.

Defeitos em emendas à compressão são também de difícil detecção (3). Além de não apresentarem anomalia visível, as emendas defeituosas — especialmente em linhas de extra alta tensão (345 kV e superior) cujas correntes de operação estão usualmente bem abaixo do limite térmico do cabo — não apresentam temperaturas elevadas passíveis de detecção com o auxílio de equipamentos de termovisão (4). Isso significa que a antecipação da queda de cabos por falha em emendas não pode ser feita pelas técnicas usuais de manutenção preventiva.

A ocorrência, em 2014, de dois desligamentos causados por queda de condutor em uma linha de transmissão da Serra da Mesa Transmissora de Energia (SMTE) levou ao estudo de alternativas não-destrutivas para avaliação da integridade das emendas à compressão desse projeto.

(*) Avenida Presidente Vargas, 955 – 15º andar – CEP 20.071-004, Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2552-5094 – Fax: (+55 21) 2173 7591 – Email: murilo.nogueira@stategrid.com.br

2.0 - DESLIGAMENTOS POR FALHA EM EMENDAS À COMPRESSÃO

No dia 03/04/2014, às 11h11min, ocorreu o desligamento automático da LT 500 kV Serra da Mesa 2 – Luziânia, de propriedade da Serra da Mesa Transmissora de Energia S.A. (SMTE), concessionária do grupo State Grid.

Chegando ao local, a equipe de manutenção verificou tratar-se da queda um subcondutor da fase C (feixe de 4 condutores), mas tarde confirmado ter sido causada pelo rompimento de uma emenda confeccionada quando da construção da linha.

Pouco mais de 8 meses depois, no dia 23/12/2014, às 06h25min, ocorreu novo desligamento automático da mesma linha e no mesmo vão. A equipe de manutenção confirmou posteriormente tratar-se da queda de outro subcondutor da mesma fase C, também rompido na luva de emenda.

A repetição do defeito levou a concessionária a programar uma intervenção em 01/02/2014, quando procedeu-se à substituição de todas as emendas à compressão desse vão.

A avaliação posterior das emendas substituídas (em um total de 10) demonstrou que todas estavam em bom estado e não sofreriam rompimento.

2.1 Informações adicionais sobre as ocorrências

A LT 500 kV Serra da Mesa 2 – Luziânia entrou em operação em abril de 2008 e possui 314 km de extensão. A linha possui 4 subcondutores por fase, CAA 954 MCM (Rail), em feixe quadrado com espaçamento de 457mm.

O vão onde ocorreu o rompimento dos subcondutores possui 535,29 metros de extensão. Uma das torres é do tipo raquete autoportante e a outra, crossrope estaiada. A silhueta das torres e o posicionamento dos condutores falhados são mostrados nas figuras 1, 2 e 3. As figuras 4 e 5 mostram fotos de uma das ocorrências.

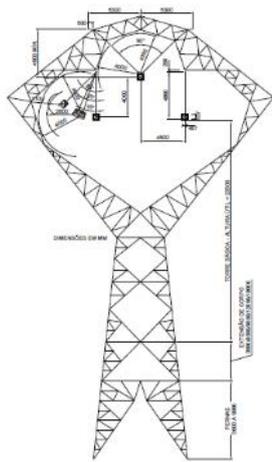


FIGURA 1 – Raquete autoportante

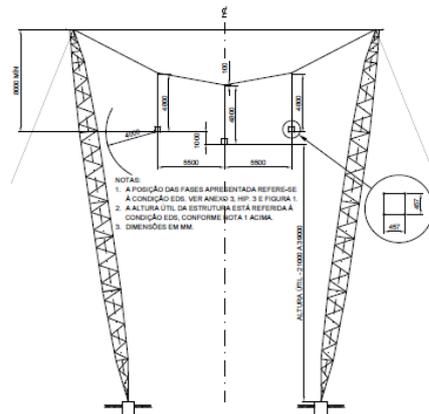


FIGURA 2 – Crossrope estaiada

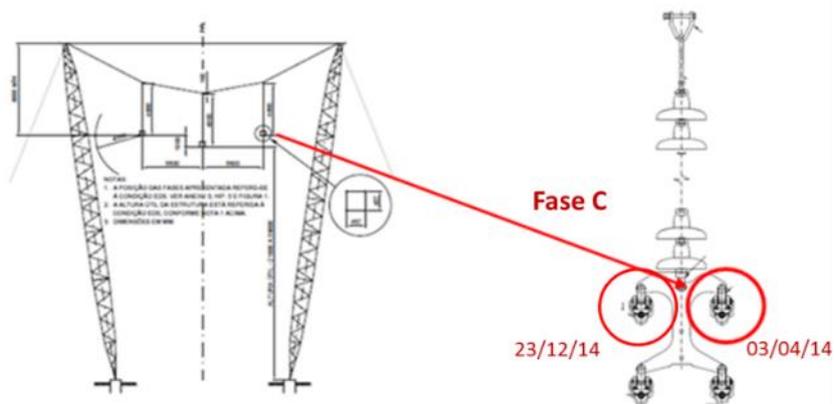


FIGURA 3 – Subcondutores com emendas rompidas



FIGURA 4 – Subcondutor danificado



FIGURA 5 – Subcondutor sobre as árvores

3.0 - ANÁLISE DAS EMENDAS FALHADAS

Em ambos os eventos, houve ruptura de emendas à compressão. Emendas desse tipo são compostas por duas partes, sendo uma luva de aço para a emenda da alma de aço e uma luva de alumínio para a reconstituição da seção condutora.

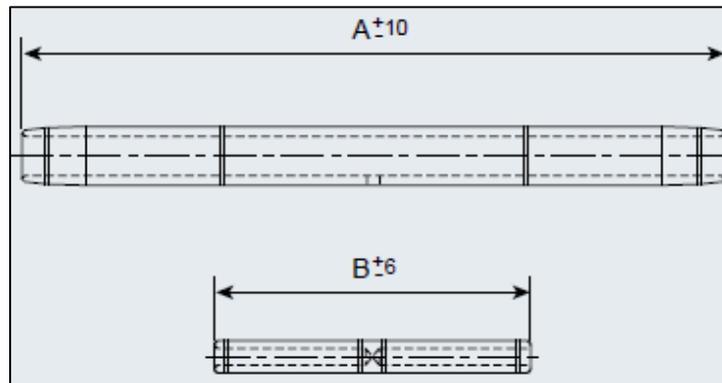


FIGURA 6 - Luva de emenda

No caso do condutor Rail, o comprimento A é de 711 mm e o comprimento da luva de aço B é de 240 mm. Respeitando as características de montagem, a emenda garante a carga de ruptura nominal do condutor inteiro (11.748 kgf).

O procedimento correto de montagem da emenda determina que as almas de aço das duas seções de condutores devem ser alinhadas e prensadas de forma que seus filamentos preencham toda a cavidade da luva, garantindo assim uma perfeita conexão mecânica. Em seguida, a luva de alumínio transpassa a luva de aço e é comprimida em suas extremidades, garantindo sim um perfeito contato elétrico e um suporte mecânico.

A avaliação da emenda danificada demonstrou, contudo, que, na ocasião de sua confecção, a luva de emenda da alma de aço não foi corretamente centralizada e acabou sendo prensada juntamente com a luva de alumínio. Essa condição pode ser claramente discernida nas figuras 7 e 8, que mostram um detalhe e o corte longitudinal das emendas falhadas. Em adição, verificaram-se não-homogeneidades na compressão que podem ter contribuído para o escorregamento do cabo.

A figura 9 por sua vez mostra, para efeito comparativo, o corte de uma emenda corretamente instalada.

Tal erro de montagem não tem como ser determinado pelos métodos de manutenção usualmente adotados, como inspeção visual e termovisão. Como a falha é interna à emenda de aço, é impossível detectá-la visualmente (v. figura 10). Esse tipo de falha tampouco impacta a condutividade da emenda, visto que a luva de alumínio, responsável pela condução da corrente elétrica, não é afetada, sendo por isso não detectável por câmeras infravermelhas. A figura 11 mostra uma imagem termográfica de emendas à compressão.



FIGURA 7 - Emenda danificada em 03/04/2014



FIGURA 8 - Emenda danificada em 23/12/2014



FIGURA 9 - Emenda inspecionada e bem prensada

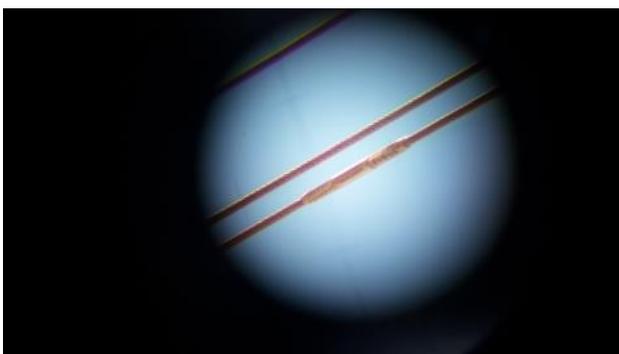


FIGURA 10 - Imagem com aproximação (zoom) de emenda à compressão

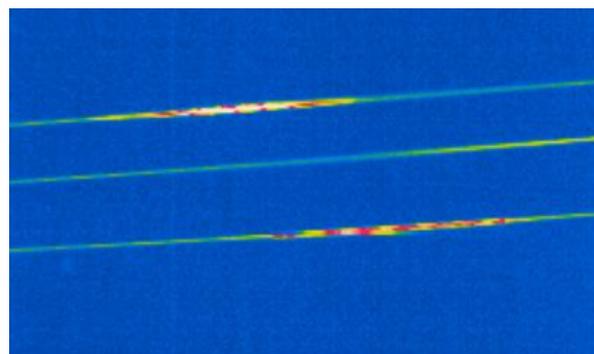


FIGURA 11 - Imagem termográfica de emendas à compressão

4.0 - ALTERNATIVAS PARA INSPEÇÃO NÃO-DESTRUTIVA DE EMENDAS EM OPERAÇÃO

Considerando as limitações da termografia e inspeção visual convencional, algumas alternativas têm sido experimentadas pelas concessionárias para detecção preventiva de falhas em emendas.

4.1 Termografia com veículos aéreos não tripulados (VANT)

O uso de veículos não tripulados busca, essencialmente, facilidade no acesso e na realização da inspeção visual em ângulos que não são possíveis obter a partir do solo, ou seja, há uma limitação quanto à qualidade da informação, e consequentemente do diagnóstico, pois as técnicas hoje disponíveis não são capazes de diagnosticar problemas que se encontram no interior dos componentes, sejam eles cabos, emendas, isoladores, grampos etc.

Somam-se às colocações acima os fatores limitantes da utilização dos veículos não tripulados: baixa autonomia, pequena capacidade de carga, restrições regulamentares quanto à permissão de voo e, igualmente, a influência do campo eletromagnético, que impede a aproximação da linha de transmissão a distâncias curtas ou limita as trajetórias de voo, especialmente em veículos multirotor.

Torna-se importante ainda elencar alguns aspectos de alta relevância:

- Existe um princípio básico, amplamente conhecido por todos aqueles que realizam inspeções: a qualidade das informações obtidas é inversamente proporcional à velocidade com que se realiza a inspeção. No caso dos VANT, modelos de asa plana, muito embora possuam uma velocidade de deslocamento bastante superior, possibilitam apenas a obtenção de informações visuais com baixo nível de detalhes. Informações visuais mais detalhadas só são obtidas a partir de veículos multirotor os quais apresentam uma velocidade de deslocamento bastante inferior. Veículos de asa plana também requerem condições de pouso e decolagem e pistas de decolagem e pousos não estão disponíveis em lugares remotos. A decolagem por arremesso e principalmente o pouso por retenção em redes põe em risco equipamentos embarcados;
- A literatura referenciada neste artigo é rica em detalhes na descrição dos inúmeros aspectos que interferem nos resultados da inspeção termográfica e os descreve detalhadamente. Deve-se ainda considerar que a indicação termográfica nem sempre é capaz de identificar anomalias e, caso as identifique, a informação terá caráter meramente sintomático e não conclusivo (4). Para uma inspeção conclusiva deverão ser associadas a radiografia e a termografia.

4.2 Medição da resistência elétrica da emenda

A medição da resistência elétrica da emenda busca complementar a termografia, pois o efeito resistivo nem sempre é capaz de provocar aquecimentos detectáveis. Tais aparelhos, entretanto, precisam ser instalados com auxílio de helicópteros, plataformas móveis e/ou bastões de linha-viva. Embora possuam boa precisão, esses medidores não irão detectar falhas na alma de aço que não alterem significativamente a condutividade da emenda (5).



FIGURA 12 - Medição da resistividade elétrica de emenda à compressão com uso de helicóptero

4.3 Ultrassom

O princípio de propagação e reflexão das ondas ultrassônicas se aplica à detecção de discontinuidades em corpos contínuos, sem interfaces, pois a reflexão das ondas, e consequentemente o pulso, ocorre quando a onda detecta uma não homogeneidade no corpo do componente, sejam vazios, escórias, trincas ou outros.

A SMTE fez alguns testes com equipamento de ultrassom para avaliação de emendas, como mostram as figuras 13 e 14 abaixo. O principal problema é a dificuldade na interpretação dos resultados, uma vez que o aparelho não define qual a razão da discontinuidade.

Também resta avaliar a viabilidade de execução desse tipo de ensaio em linha viva para verificar a influência dos efeitos do campo eletromagnético no equipamento de ultrassom.



FIGURA 13 - Inspeção em laboratório de luva de alumínio com transdutor ultrassônico



FIGURA 14 - Os picos indicam descontinuidades no material

4.4 Técnicas de inspeção eletromagnética

Só são aplicáveis a materiais onde se possa estabelecer um fluxo eletromagnético. No caso de cabos de LTs, são aplicáveis apenas às almas de aço e requerem o desligamento da linha. Não podem ser aplicadas à inspeção dos tentos de alumínio e igualmente ao corpo das emendas.

4.5 Radiografia digital ou computadorizada

Instrumentos de radiografia digital permitem a avaliação efetiva da integridade da emenda, produzindo imagens facilmente analisáveis. Porém, por se tratarem de equipamentos emissores de radiação ionizante, seu uso demanda treinamento e certificação prévios, que no Brasil são regulados pela CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear.

Estão disponíveis no mercado instrumentos de radiografia digital com raios-X e raios gama.

Aparelhos de raios-X possuem uma eletrônica embarcada que se mostrou vulnerável ao campo eletromagnético da LT (v. próximo capítulo). Seu uso em linha-viva demandaria o desenvolvimento de uma blindagem para o instrumento. Essa restrição não ocorre com a radiografia com raios gama.



FIGURA 15 - Equipamento de radiografia digital portátil com raios-X



FIGURA 16 - Equipamento de radiografia digital portátil com raios gama

4.6 Análise comparativa

Enquanto a inspeção visual não se aplica à detecção de falhas internas em emendas, a termografia tem limitações sobretudo pela influência da distância e presença de fatores redutores da temperatura (vento, emissividade, baixa corrente elétrica). O uso de VANT também sofre restrições e nem sempre melhora a qualidade do resultado.

A medição da resistência elétrica exige um operador e tem execução complexa em linha viva, mas sua principal limitação é a não detecção de falhas na alma de aço que não reduzam a condutividade do cabo — situação que motivou este trabalho.

O ultrassom mostrou ser uma técnica ainda incipiente devido à dificuldade na interpretação das leituras e na execução em linha viva.

Técnicas de inspeção eletromagnética, embora avaliem a integridade da alma de aço, exigem o desligamento da linha, situação inadmissível para a realidade regulatória das concessionárias de Transmissão brasileiras.

A radiografia digital é o método mais efetivo para análise da integridade das emendas, porém possui exigências específicas para manipulação de fontes ionizantes. Enquanto a radiografia com raios-X ainda não é ideal para uso em linha-viva, a radiografia com raios gama pode ser aplicada de imediato nesses casos.

5.0 - INSPEÇÃO COM RADIOGRAFIA DIGITAL DAS EMENDAS DO VÃO FALHADO

A SMTE conduziu testes com equipamento de raios-X portátil para inspeção de emendas retiradas do vão em que ocorreram os dois desligamentos. Esse tipo de equipamento (figura 16) possui baterias com autonomia de 5 h e permite o encaminhamento das imagens sem fio com alcance de até 1,5 km.

As imagens das figuras 17 e 18 foram obtidas, respectivamente, a partir da emenda defeituosa da primeira ocorrência (comparar com figura 7) e de uma emenda íntegra. Verifica-se que as imagens são de excelente qualidade e fácil interpretação. Tais imagens, contudo, foram obtidas nas instalações da SMTE. Para uso em linha viva essa técnica apresenta empecilhos devido à interferência do campo eletromagnético da linha.

O efeito do campo eletromagnético provoca diversos problemas nos equipamentos de raios-X, tais como descarga das baterias, interferências na transmissão sem fio e danos na eletrônica embarcada.

Um problema específico causado pela interferência da linha é o somatório da sua tensão (residual, se a linha estiver desligada) com a tensão produzida pelo raios-X. Os equipamentos de raios-X, portáteis ou não, funcionam elevando a tensão proveniente da bateria ou da fonte de energia (por exemplo: 36 V) ao valor da tensão nominal máxima do equipamento (tipicamente 80 kV a 160 kV conforme a configuração escolhida). A tensão presente na linha energizada — residual no caso de linha desenergizada — soma-se à tensão produzida pela bateria e é multiplicada, produzindo uma tensão final muito superior à tensão de operação nominal máxima dos equipamentos. Alguns aparelhos possuem sistemas de segurança que impedem que a tensão máxima de operação seja ultrapassada. Nesses casos, porém, o equipamento é travado, para prevenir danos maiores.

Em submissões à tensão em linha viva estes equipamentos muitas vezes suportam, inicialmente e em trabalhos curtos, os efeitos da tensão, mas invariavelmente não suportam trabalhos contínuos. Há também problemas relativos a superaquecimento, demandando o planejamento da inspeção.

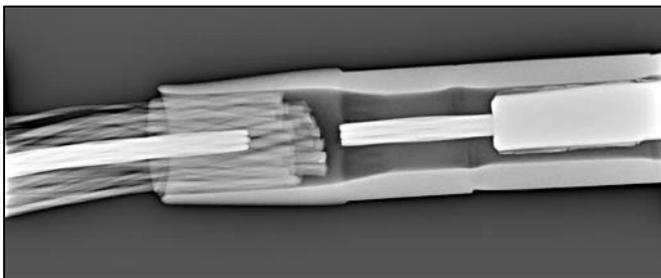


FIGURA 17 -
Imagem em raios-X da emenda danificada em
03/04/2014

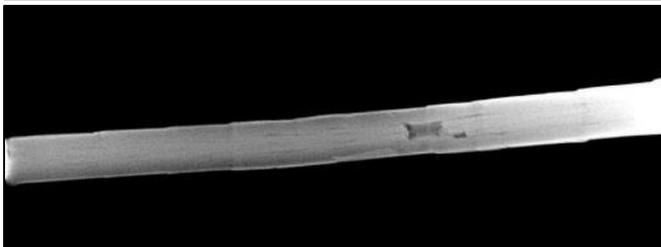


FIGURA 18 -
Imagem em raios-X de emenda corretamente
prensada

A radiografia com raios gama, por sua vez, não apresenta as restrições dos aparelhos de raios-X para operação em ambientes com forte interferência eletromagnética, além de também apresentarem imagens de qualidade (v. figura 20). Dessa forma, essa técnica foi a escolhida para realização das inspeções de campo de emendas da linha onde ocorreram as duas quedas de condutores, trabalho apresentado no capítulo seguinte deste artigo.

6.0 - INSPEÇÃO EM LINHA VIVA COM RAIOS GAMA DE EMENDAS EM OPERAÇÃO

Visando prevenir desligamentos similares, foi programada a inspeção radiográfica com raios gama de emendas em operação da mesma LT, em trechos construídos pela mesma empreiteira responsável pela montagem do vão onde ocorreram os defeitos.

O trabalho foi executado com equipe de manutenção de linhas de transmissão da SMTE (nove eletricitas), engenharia de segurança do trabalho e empresa especializada em inspeção com radiografia digital com raios gama (um engenheiro e dois técnicos). O serviço foi executado utilizando o método de trabalho em linha viva (ao potencial).

Foram realizadas inspeções em 56 emendas, aproximadamente 5% do total da linha, durante uma semana, conforme tabela 1. Para esta atividade foi utilizado uma fonte radioativa de Iridio 192. As imagens na figura 19 mostram o trabalho executado. A figura 20 mostra imagem obtida de uma das emendas.

Tabela 1 – Execução de inspeções em linha viva

Número de emendas inspecionadas	Dia da semana
12	Segunda-feira
12	Terça-feira
8	Quarta-feira
12	Quinta-feira
12	Sexta-feira



FIGURA 19 - Instalação do equipamento de inspeção radiográfica com raios gama em linha viva



FIGURA 20 - Imagem de uma das emendas em operação

As imagens obtidas da inspeção das 56 emendas se mostraram de boa qualidade, permitindo avaliar a consistência das emendas e possíveis riscos de falha. Nessa amostragem, não foi encontrada nenhuma emenda com o defeito que causou as quedas anteriormente.

Vale observar que as imagens radiográficas permitiram detectar alguns problemas menores devido à prensagem não-homogênea de algumas emendas, porém insuficientes para colocar em risco os cabos, ou provocar futuramente novos rompimentos.

O equipamento com raios gama ainda pode ser aperfeiçoado para permitir seu comando remoto, facilidade disponível nos equipamentos com raios-X quando usados em linhas desenergizadas.

7.0 - CONCLUSÃO

Em 2014 ocorreram dois desligamentos causados por queda de condutor em uma linha de transmissão da SMTE. Verificou-se que as falhas tiveram origem no rompimento de emendas à compressão, cujas luvas de aço foram incorretamente confeccionadas à época da obra, deixando uma folga na alma de aço dos condutores. Isso levou a SMTE a estudar alternativas não-destrutivas para avaliação da integridade das emendas remanescentes.

Devido às características regulatórias do setor de transmissão de energia, essas alternativas deveriam ser adequadas ao trabalho em linha viva, evitando a necessidade de se desligarem as linhas.

Técnicas de inspeção com termografia digital, mesmo com o apoio de VANT, não detectam problemas na alma de aço como os que causaram os desligamentos da SMTE. O mesmo ocorre com a medição da resistência elétrica, técnica que ainda demanda o uso de helicóptero, encarecendo a inspeção.

O uso de ultrassom esbarra na interpretação dos resultados, além de sofrer interferência sob linha-viva. As inspeções eletromagnéticas são capazes de avaliar a integridade da alma de aço, mas exigem o desligamento da linha.

A radiografia digital é o método mais efetivo para análise da integridade das emendas, porém possui exigências específicas para manipulação de fontes ionizantes. Enquanto a radiografia com raios-X ainda não é ideal para uso em linha-viva, a radiografia com raios gama pode ser aplicada de imediato nesses casos.

A avaliação precisa da integridade de emendas à compressão em LTs passa pela conjunção das técnicas termográficas, radiográficas e da medição da resistência elétrica. A inspeção radiográfica com raios gama elimina a influência do campo eletromagnético devido à inexistência de uma sofisticada eletrônica embarcada, como no caso dos raios-X. Essa técnica pode ser aperfeiçoada para permitir o acionamento remoto do equipamento.

Na etapa de construção, a inspeção por radiografia computadorizada em tempo real pode praticamente eliminar a ocorrência de problemas ulteriores acarretados pela má aplicação das emendas, permitindo sua correção imediata.

As inspeções com raios gama realizadas pela SMTE em outras emendas da mesma linha demonstraram que todas estavam íntegras, não havendo mais riscos de queda de cabos similares aos dois desligamentos anteriormente ocorridos.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BERLIJN, S. et al. **Type testing of cables and accessories**. KEMA High Voltage Laboratory. Jan 1997.
- (2) BARBOSA, C. et al. **Analysis of critical field procedures for power HV overhead transmission line splices installed after restructuring of Brazilian electrical sector**. Engineering Failure Analysis Vol. 18, Issue 7, p 1842-1847. Out 2011.
- (3) **Inspection & assessment of overhead line conductors: a state-of-the-science report**. EPRI 1000258. Nov 2000.
- (4) SNELL, R e RENOWDEN, J. **Improving results of thermographic inspections of electrical transmission and distribution lines**. IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance Proceedings. ESMO 2000 Proceedings. Out 2000.
- (5) HICKS, G, E RENOWDEN, J. **Evaluating Splice Integrity**. T&D World Magazine. Feb 2016.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Murilo Magalhães Nogueira (Rio de Janeiro - RJ, 1964) é Engenheiro Eletricista pela UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro (1986), Bacharel em Administração de Empresas (1989) e Bacharel em Informática (1994), ambos pela UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Mestre em Metrologia para Qualidade e Inovação pela PUC-Rio - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2005). Trabalha há 30 anos no setor elétrico, nas áreas de subestações e linhas de transmissão. Atualmente é Diretor de Engenharia da State Grid Brasil Holding S.A., onde também atuou como Diretor de Operação e Manutenção e Diretor Adjunto de Desenvolvimento de Negócios. Possui 2 patentes e 30 artigos técnicos publicados (15 como autor principal). Participou de mais de 20 projetos de P&D.

Márcio Antonio de Castro Souza (Jacareí - SP, 1977), graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistema Elétrico de Potência pela Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ) em 2006 e pós-graduado em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade FUMEC, em Belo Horizonte em 2007. Atuou como Engenheiro Eletricista na COMW Teknotrafo Transformadores LTDA em Belo Horizonte realizando trabalhos na área de qualidade de energia; como Engenheiro Eletricista na Gemon Geral de Engenharia e Montagens S.A. em contratos com a concessionária Ampla no norte do estado do Rio de Janeiro; como Engenheiro de Segurança do Trabalho na concessionária Light Serviços de Eletricidade S.A e, desde 2012, como Engenheiro de Segurança do Trabalho da Diretoria de O&M na State Grid Brazil Holding S.A.

Edmundo A. Lins Júnior (Rio de Janeiro - RJ, 1960). Engenheiro Mecânico pela Escola Politécnica da Fundação de Ensino Superior de Pernambuco em 1985 e especialista no trato com equipamentos emissores de radiações ionizantes em 1987 pelo Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco. Credenciado como Supervisor de Radioproteção pela CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear desde 1987 em Radiografia Industrial e Medidores Nucleares. Experiência de mais de 30 anos em inspeções técnicas, notadamente com o uso de radiografias e um dos precursores no Brasil, em 2001, na utilização da radiografia computadorizada industrial. Diretor desde 1991 da BB&E Engenharia e Consultoria. Desenvolvedor em 2013 de aplicações inéditas para inspeções radiográficas em GIS, um dos poucos até a atualidade a desenvolver este trabalho a nível global. Da mesma forma, o único no país e um dos poucos no mundo a realizar inspeções radiográficas em LTs, particularmente energizadas. Autor ou coautor de 16 artigos sobre o tema apresentados em eventos nacionais e internacionais.