



CB/GLT/08

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

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

**INSPEÇÃO *IN-SITU* DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS DE 500 kV EM LINHA DE TRANSMISSÃO
ENERGIZADA POR RADIOGRAFIA DIGITAL COMPUTADARIZADA**

**Henrique B.D.T. Lott Neto (*)
STN**

**Márcio A.B. Fontan
STN**

**Paulo R.R. Britto
STN**

**Armando H. Shinohara
UFPE**

**Edmilson J. da Silva Júnior
UFPE**

**Gustavo J.V. Xavier
UFPE**

**Hissae Fujiwara
UFPE**

RESUMO

Os isoladores poliméricos de linhas de transmissão de extra-alta-tensão podem falhar mecanicamente através de rompimento do compósito de GFRP pelo mecanismo de fratura frágil por SCC e causar a queda dos cabos condutores. Com estabelecimento da parcela variável por indisponibilidade (PVI), evitar o rompimento do compósito de GFRP é de fundamental importância para transmissoras. Visando detectar e avaliar defeitos ocultos e críticos em isoladores poliméricos em linhas de transmissão de 500 kV energizadas, um sistema de inspeção não destrutivo utilizando radiografia digital computadorizada de alta resolução espacial foi desenvolvido e testado em campo. Os resultados obtidos são relatados.

PALAVRAS-CHAVE

Isoladores poliméricos, Fratura frágil do compósito FGRP por SCC, Linhas transmissão energizada de 500 kV, Avaliação da integridade estrutural, Radiografia digital computadorizada

1.0 - INTRODUÇÃO

Na construção de uma linha de transmissão, estima-se que o custo dos isoladores representa em torno de 3% a 8% mas quando entra em operação, mais de 70% das falhas e até 50% dos custos de manutenção de uma linha são devidos aos isoladores [1,2]. Em função disto tem despertado atenção e grande interesse dos pesquisadores e tecnólogos para compreender as causas e auxiliar na busca de melhoria do produto pelos fabricantes.

Atualmente, devido a uma série de vantagens dos isoladores poliméricos em relação às cadeias de isoladores tradicionais de vidro e porcelana, os isoladores poliméricos passaram a ser extensivamente utilizados em linhas de transmissão de alta-tensão e extra-alta-tensão, que já excede mais de 20 milhões de isoladores poliméricos em operação no mundo [3].

No Brasil, há relatos de ocorrências de falhas mecânicas causado pelo rompimento do bastão de compósito de GFRP – “glass Fiber reinforced plastic” devido ao mecanismo de fratura frágil por SCC – “stress corrosion cracking” dos isoladores poliméricos de 69 kV, 138 kV, 230 kV e 500 kV, apesar das transmissoras realizarem periodicamente inspeções preditivas com as técnicas tradicionais tais como visual, por termografia de infravermelho, medição de ultravioleta (daycor) [4]. Inspeção de conformidade dos isoladores poliméricos novos tem sido realizada de acordo com a norma IEC [5] e por técnicas de ultrassom [6]. O rompimento do bastão de

compósito de GFRP por SCC é atribuído à presença de defeitos tais como fissuras no material que recobre e protege o bastão de compósito, formação e presença de ácidos nítrico e sulfúrico e seus ataques ao bastão de GFRP que estão sob tensão mecânica devido ao peso do cabo condutor [7,8,9,10]. Com a inserção e estabelecimento de parcela variável por indisponibilidade (PVI) pela ANEEL, a linha de transmissão não estar disponível mesmo que não esteja transmitindo energia, é de grande preocupação às empresas transmissoras.

Com respeito à inspeção da integridade estrutural dos isoladores poliméricos em operação em linhas de transmissão, a dificuldade reside em detectar e discernir defeitos ocultos tais como fissuras no material que reveste e protege o compósito de GFRP devido a presença de camada de poluentes, a falta de controle da espessura de estar abaixo do valor recomendado pelo Cigré [3, 7], a presença de vazios, bolhas de ar e a falta de aderência ao bastão de compósito por técnicas tradicionais em uso há mais de 20 anos. Tais defeitos podem levar ao rompimento do bastão de compósito. Portanto, é de grande preocupação para as empresas transmissoras de energia elétrica em alta e extra-alta tensão. Assim sendo, o desenvolvimento de técnicas não destrutivas que possam detectar tais defeitos e possibilite avaliá-los é de fundamental importância. Dentre várias técnicas inovativas possíveis, a radiografia digital tem um potencial de ser uma das técnicas de detecção de tais defeitos ocultos e críticos. Na década de 1980, visando aplicação médica, a Fuji Film, no Japão, desenvolveu um detector de imagem radiográfica inovativo bidimensional denominado de *Imaging Plate* (IP), empregando o fenômeno de luminescência de cristais (BaFBr:Eu²⁺) fotoestimulável [11, 12]. O detector IP possui mesclas das características dos detectores de pulso e integral. Em 1985, as características do IP foram detalhadamente investigadas e testadas como detector não somente de imagens, mas para estudos de estruturas cristalinas de materiais biológicos com sucesso, que apresentam naturalmente baixa intensidade de difração, espalhamento de raios-X [12]. Assim, as seguintes características foram observadas: altíssima sensibilidade, atingindo até três ordens de grandeza em comparação com um filme de raios-X convencional, faixa dinâmica extremamente maior, linearidade muito superior, excelente resolução espacial da ordem de 25 µm. Empregando o detector de imagem radiográfica *Imaging Plate* (IP), isoladores poliméricos de uma linha de transmissão de 230 kV cobertos com camada espessa de poluentes, que estiveram em operação por mais de 10 anos e houve ocorrência de rompimento de um dos isoladores poliméricos, foram analisados por radiografia digital [13] e tomografia computadorizada [14] no laboratório. Resultados mostraram a presença de várias fissuras no material que recobre o bastão de compósito GFRP e principalmente na região próxima à fase. Retirando a camada de poluentes, fissuras foram visíveis a olho nu. Análise adicional da superfície com microscopia eletrônica de varredura (MEV), revelou a existência de inúmeras microfissuras imperceptíveis a olho nu [15]. Portanto, monitoramento periódico dos isoladores poliméricos é de fundamental importância. Outro estudo de um isolador polimérico de 69 kV fraturada por fratura frágil por SCC por radiografia revelou que o material que recobre o bastão de compósito, a espessura do material que recobre o bastão GFRP apresentava espessura abaixo de 1 mm, bem inferior à espessura recomendada por Cigré, que recomenda pelo menos 3 mm de espessura [16]. Outra falha revelada por inspeção radiográfica com detector IP foi a presença de vazios e descolamento do material que reveste o compósito em dois pontos de injeção do silicone. Através de inspeção por câmera de infravermelho em linha de transmissão energizada de 230 kV, estes pontos apresentaram como 2 pontos quentes [17].

No presente trabalho, resultados de inspeção de isoladores poliméricos de 500 kV em linha energizada no campo com um sistema de radiografia digital computadorizada desenvolvido por autores foi utilizado para detectar e monitorar defeitos ocultos e críticos tais como trincas/fissuras submilimétricas, variação de espessura e sua avaliação quantitativa no material que reveste e protege o compósito são relatados.

2.0 - FUNDAMENTOS DE RADIOGRAFIA DIGITAL COMPUTADORIZADA DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL

Em radiografia industrial, o arranjo para inspeção das estruturas/defeitos internos mantém-se inalterado há mais de 120 anos, que data desde a descoberta dos raios-X em 1895 pelo físico Wilhelm Conrad Röntgen na Alemanha, como é mostrado esquematicamente na figura 1, o qual é conhecido também como método de absorção. Em radiografia, a formação de imagem radiográfica ocorre devido ao contraste da passagem do feixe direto da radiação pelo objeto e também pela radiação espalhada resultante da interação da radiação com a matéria durante a sua passagem, que reduz o contraste dificultando a interpretação. E para obter radiografia de alta qualidade, a distância mínima entre a fonte de radiação e o detector de imagem, de acordo com as normas ISO: 5579, EM-444 e DIN 541111 [18] é estabelecida pela equação (1):

$$\frac{a}{s} = Kb^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

onde "a" é a distância (em mm) entre a fonte de radiação e objeto de interesse, "s" é o diâmetro efetivo do foco da fonte de radiação e "b" a espessura do objeto e "K" é uma constante, que vale 15 para técnicas de alta sensibilidade (classe B) e 7,5 para técnica normal (classe A).

Na prática, além do espalhamento da radiação, há quatro fatores que afetam majoritariamente a qualidade da imagem em radiografia industrial:

- Penumbra geométrica, U_g , devido à dimensão da origem da fonte de radiação (ponto focal),

- Penumbra do filme, U_f , devido ao espalhamento dos elétrons no filme,
- Penumbra devido ao intensificador de imagem (écran), U_s , causado pelo espalhamento da luz na camada fluorescente,
- Penumbra devido ao movimento, U_{mv} , devido ao movimento relativo do objeto e filme.

Em termos de resolução espacial do Imaging Plate, que está relacionada com a resolução do filme, U_f , refere-se a capacidade de discernir detalhes. Atualmente, existem dois tipos de Imaging Plate disponível comercialmente, tipo "standard" (altíssima sensibilidade mas resolução espacial relativamente baixa) e tipo "azul" (sensibilidade alta, mas menor que o Imaging Plate "standard", mas possui resolução espacial superior), [19].

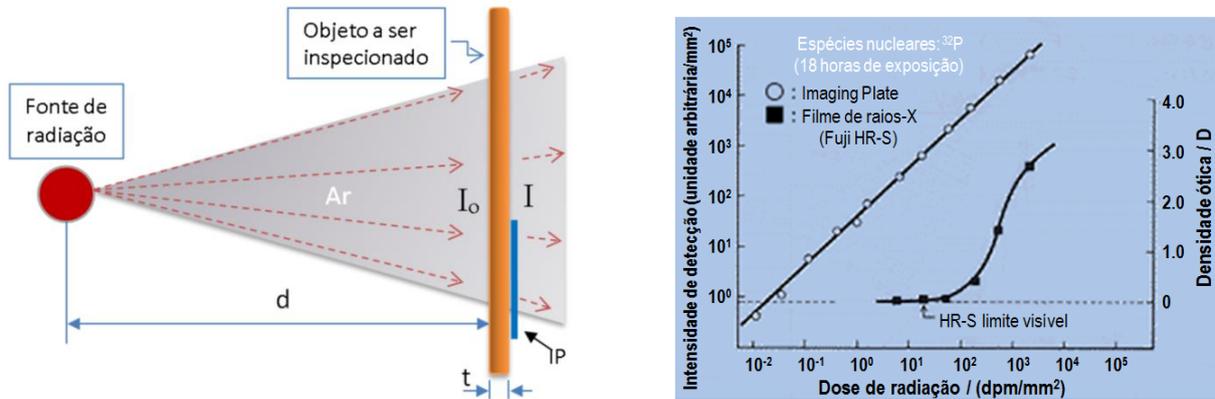


Figura 1. Esquema do arranjo radiográfico por método de absorção à esquerda. No lado direito, a figura mostra a excepcional sensibilidade do Imaging Plate (IP) em relação ao filme de raios-X. Com até três ordens superior em termos de sensibilidade e a linearidade (faixa dinâmica) (fonte: Fuji Film). A abcissa corresponde a doses de radiação emitidas por uma amostra padrão de ^{32}P (radiação beta de energia $E = 1,7 \text{ MeV}$).

Quando a radiação ionizante incide no objeto, uma parte atravessa, mas a outra parte é absorvida. A relação entre as intensidades de radiação transmitida (I) e incidente (I_0) é dada pela equação (2) e, quando a radiação ionizante gerada na fonte propaga-se pelo ar, sabe-se que a sua intensidade por área diminui de acordo a lei do inverso de distância de Newton.

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{Z}{\rho}\right) \mu \rho} \quad (2)$$

Onde "t" é a espessura do objeto e " μ/ρ " é coeficiente de atenuação mássica, que depende da densidade " ρ ", do número atômico "Z" do material e do comprimento de ondas " λ " da radiação.

3.0 - MATERIAIS E MÉTODO

Para o desenvolvimento de um sistema de inspeção de isoladores poliméricos por radiografia digital computadorizado de alta resolução espacial, seguintes etapas foram realizadas:

1. Simulação numérica computacional de radiografia realística dos isoladores poliméricos utilizando um software comercial dedicado "CIVA-RT" para determinar os parâmetros radiográficos .
2. Desenvolvimento de projeto conceitual de um sistema de radiografia digital adequado com especialistas em radiografia industrial e linha energizada que possibilitasse a realização de ensaios radiográficos de isoladores poliméricos em campo em linhas de transmissão de 500 kV energizadas.
3. Construção e testes do protótipo de radiografia digital em laboratórios de radiografia industrial e de alta tensão e validar o sistema de inspeção de isoladores poliméricos em campo em linhas de transmissão de 500 kV energizada.
4. Elaboração dos planos de proteção radiológica geral e específica, manual de operação do sistema de radiografia digital em linha energizada de 500 kV, Programa Executivo (PEX), Análise Preliminar de Risco (APR).

Para testar a potencialidade do sistema de radiografia digital computadorizado para detectar defeitos ocultos e críticos, inicialmente, 15 isoladores poliméricos novos, que foram aprovados nos testes de conformidade da empresa, foram inspecionados no Laboratório de Ensaios Não Destrutivos do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE – Universidade Federal de Pernambuco. O sistema de radiografia digital utilizado para radiografar isoladores poliméricos novos foi constituído por uma fonte portátil de raios-X de 120 kV modelo CP120B da empresa ICM (*Industrial Control Machines S.A.*), detector de imagem Imaging Plate (IP), tipo azul

SR (Super Resolution) de 12,5 cm x 43 cm da empresa Perkin-Elmer, e um leitor de IP, modelo *Cyclone*, também da empresa Perkin-Elmer, e a digitalização via ADC foi de 16-bits de tonalidade de cinza. Radiografia foi realizada com a potência de 90 kV x 1 mA com tempo de exposição de 10 segundos posicionada a uma distância de 60 cm do IP. Devido ao comprimento dos isoladores, de aproximadamente 4 metros, e o IP é de 43 cm de comprimento, a radiografia foi dividida em 10 seções (figuras 2) de igual comprimento longitudinal.



Figura 2 - Foto da torre em "V" No. 211-1 com isoladores poliméricos em "I". Esquema para exposição de Imaging Plate para radiografar toda extensão do isolador polimérico de 500 kV, que possui aproximadamente 4 m de comprimento.

Levando em consideração somente as aletas maiores para a contagem. Para o desenvolvimento de um protótipo de um sistema de radiografia digital de alta resolução espacial para a inspeção dos isoladores de compósito em linhas de transmissão de 500 kV energizada, um leitor de Imaging Plate de maior resolução existente na atualidade, resolução espacial certificada de 20 μm pelo BAM (Federal Institute for Materials and Testing), Berlin, Alemanha, foi adquirido, modelo HD-NDT 35 CR, da Durr, Alemanha. Para recuperar a imagem latente no IP utilizou-se um leitor a laser (*escâner*). Não há necessidade de uso de câmara escura e tampouco de produtos químicos tais como revelador, fixador como requer o filme de raios-X convencional. Procedimento detalhado pode ser encontrado, por exemplo, na norma da ASTM E2007-10 (reaprovado em 2016) [20].

4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, são apresentados os principais resultados obtidos no desenvolvimento de um sistema de radiografia digital de alta resolução visando inspecionar os isoladores poliméricos em campo em linha de transmissão de 500 kV energizadas.

A partir de cada isolador polimérico novo, foram obtidas 20 imagens radiográficas, sendo 10 radiografias na posição zero e outras 10 radiografias a 90 graus. No total, a partir de 15 isoladores, foram obtidas 300 radiografias. A figura 3 mostra as imagens radiográficas digitais dos isoladores poliméricos novos e a quantidade de pixels que cada imagem contém. Uma imagem radiográfica contém 30.357.320 pixels (10.136 x 2.995) e dez imagens justapostas contêm 303.573.200 pixels.

Através de análise das imagens radiográficas, pode-se detectar defeitos críticos nos isoladores poliméricos novos, que passaram imperceptivelmente nos testes de conformidade. Assim sendo, pode-se afirmar que a radiografia digital é uma ferramenta de inspeção bastante eficaz para auxiliar na detecção de defeitos críticos em isoladores poliméricos novos antes de serem instalados nas linhas de transmissão. Por outro lado, devido a grande quantidade de aletas, 129, e espaçamento limitado entre as aletas, a inspeção visual a olho nu para detectar depressões, humanamente é praticamente impossível.

A radiografia da esquerda da figura 4 apresenta uma imagem radiográfica de um isolador de compósito novo, mas apresenta uma possível falha, como está demarcada com um círculo vermelho, que é uma fissura no material que recobre o bastão de isolador de compósito, a qual está disposta perpendicularmente ao eixo do isolador. A foto da direita da figura 4 é uma fotografia do mesmo local onde há uma falha. Pelo fato do isolador polimérico de 500 kV

possuir aproximadamente 4 m de comprimento e geometria complexa, as regiões entre as aletas é de difícil inspeção visual devido a grande quantidade de aletas ao longo do isolador e espaço limitado. Assim sendo, ao longo do desenvolvimento do presente trabalho, notou-se a importância de realizar análise radiográfica utilizando monitores de alta resolução e de forma colaborativa.

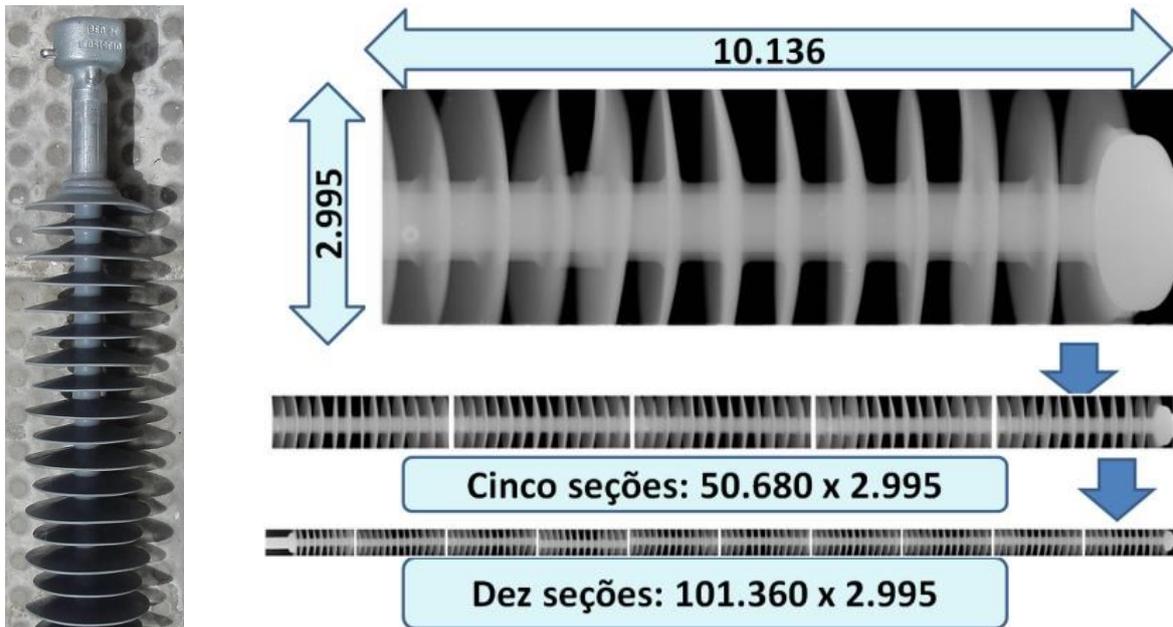


Figura 3. Na foto à esquerda mostra uma secção do isolador polimérico de 500 kV. À direita, as imagens radiográficas e quantidade de píxeis para uma radiografia, cinco radiografias justapostas e dez radiografias justapostas, as quais foram obtidas com a fonte de raios-X posicionada a 60 cm do IP utilizando Imaging Plate de 43 cm x 12,5 cm.

Portanto, surgiu a necessidade de utilizar multi-monitores para melhorar a inspeção dos isoladores poliméricos devido a grande quantidade de píxeis por imagem radiográfica. Para avaliar a possibilidade de análise colaborativa, realizou-se testes de visualização em sistemas de multi-monitores da Universidade de Quioto, Japão, especializado em desenvolvimento de sistemas de visualização com multi-monitores [21,22].

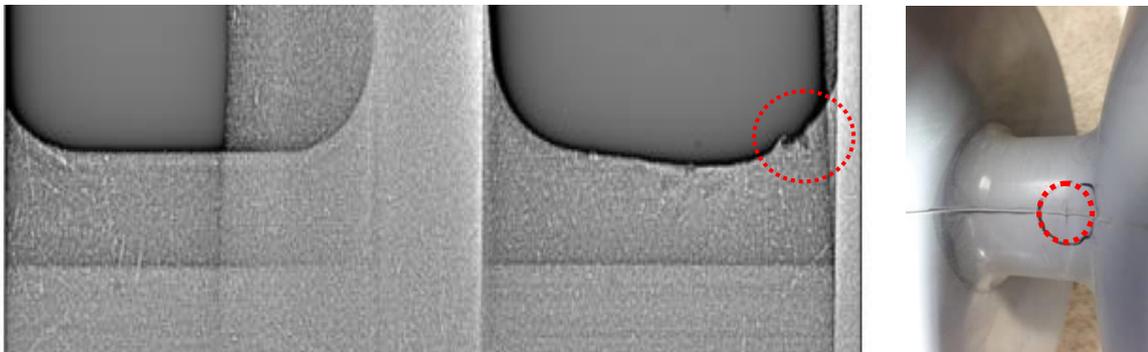


Figura 4. Análise da imagem radiográfica após processamento de imagem digital, nota-se um defeito na superfície do material que recobre o bastão de compósito. Após esta detecção, a foto à direita mostra uma fissura longitudinal ao eixo do isolador, que trata-se de um defeito crítico na superfície do isolador polimérico não detectado no teste de conformidade mas detectado na análise por imagem radiográfica.

Para o desenvolvimento de um sistema de radiografia digital de alta resolução espacial para testes *in-situ*, isto é, em linha de transmissão de 500 kV energizada, inicialmente, estudo de um sistema radiográfico foi realizado utilizando simulador numérico para determinar parâmetros radiográficos. A simulação numérica de radiografia do isolador polimérico foi realizada variando a distância da fonte de raios-X de 60 cm a 400 cm. A figura 5 mostra um esquema de simulação numérica quando a fonte de raios-X é posicionada a 400 cm do Imaging Plate. Nesta posição, nota-se que o feixe de raios-X consegue cobrir toda extensão do isolador polimérico. Em princípio, fixando-se a fonte de raios-X na posição intermediária e a 400 cm do IP, expando o Imaging Plate possibilitaria e obter imagem radiográfica ao longo do isolador. Entretanto, as simulações da figura 5 mostram os resultados de simulação numérica quando a fonte de raios-X é posicionada a 60 cm, 250 cm e 400 cm. A 60 cm, nota-se que as aletas das extremidades superpõe-se dificultando a inspeção da região entre as aletas. Por outro lado, quando é

fonte de raios-X é posicionada a 400 cm, a imagem radiografia da posição central do isolador polimérico as aletas não se superpõem. Por outro lado, as regiões extremas do isolador polimérico, junto à fase e junto à terra, as aletas se superpõem, dificultando de sobremaneira as análises das superfícies. Para validar os parâmetros radiográficos de simulação numérica, testes radiográficos foram realizados no laboratório de radiografia industrial da UFPE. A fonte de raios-X foi posicionada a 506 cm do Imaging Plate, 120 kV x 1 mA e 300 s, e os resultados estão mostradas na figura 6.

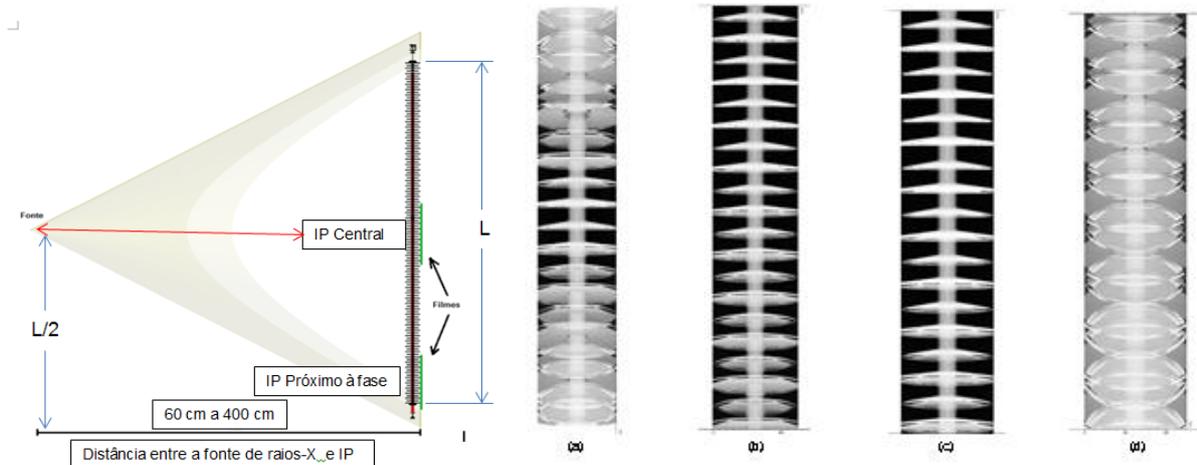


Figura 5. Simulação numérica de radiografia do isolador polimérico de 500 kV: (a) a 60 cm de IP central, (b) a 250 cm de IP central, (c) 400 cm de IP central e (d) 400 cm de IP próximo à fase, de acordo com o esquema acima. Radiografia simulada da parte inferior do isolador polimérico quando a fonte de raios-X foi posicionada a 40 cm do Imaging Plate e na altura intermediária. O resultado mostra que as aletas se superpõem dificultando a análise.

Imagens radiográficas de alta resolução foram obtidas e nas elipses de cor vermelha estão destacadas imagens de geometria triangular. As radiografias à esquerda na figura 6 foram processadas com software de processamento de radiografia digital industrial conhecido como Isee!, feito pelo BAM, Alemanha, e a imagem processada se encontra à direita na Figura 6. Na mesma figura 6, foi esclarecido as imagens de geometria triangular.

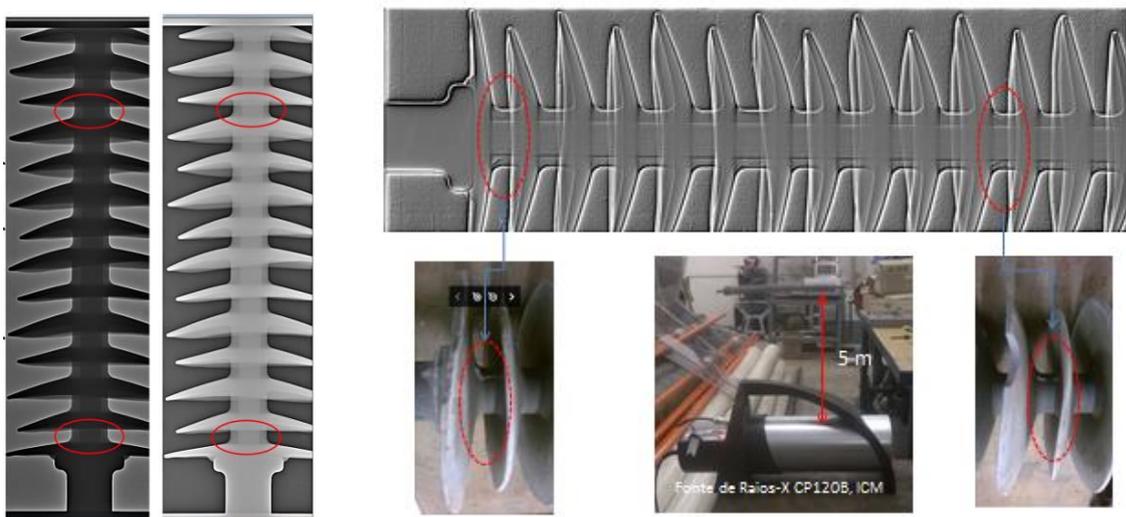


Figura 6. Radiografia (negativa e positiva) de alta resolução como foi obtida do isolador polimérico posicionado a 506 cm da fonte de raios-X no Laboratório de Radiografia Industrial. Imagens de geometria triangular detectadas nas radiografias do isolador polimérico de 500 kV, através de uma análise minuciosa, verificou-se que são rebarbas devido ao processo de injeção do material a base de silicone que recobre o bastão GFRP.

Após a validação dos parâmetros radiográficos no laboratório de radiografia, que possibilitou a obter imagens radiográficas de alta resolução espacial do isolador polimérico, os testes prosseguiram no laboratório de alta tensão da Universidade Federal de Campina Grande (LAT/UFPG). A figura 7 mostra um dos protótipos em teste no LAT/UFPG aplicando tensão até 640 kV.

Antes de realizar testes em linhas de transmissão energizada, testes operacionais do protótipo foram realizados na linha de transmissão desenergizada do Centro de Treinamento no distrito de Garanhuns/PE. Os detalhes sobre estes testes encontram-se no trabalho a ser apresentado no Congresso do CITENEL 2017. As primeiras imagens radiográficas aparecem totalmente desfocadas porque houve efeito do vento que forçou a estrutura do protótipo

juntamente com a fonte de raios-X a movimentar-se durante a exposição. Com objetivo de minimizar o efeito do vento, quando um protótipo mais robusto foi utilizado para obter as imagens radiográficas, o movimento relativo devido ao forte de vento não ocorreu mais e uma imagem radiográfica de qualidade foi obtida.



Figura 7. Teste laboratorial do sistema de radiografia digital aplicando alta tensão de 550 kV. À direita, imagem radiográfica da parte central do isolador e ampliando a parte circundada em vermelha, mostra que a radiografia detectou uma falha interna no isolador polimérico do tipo de descolamento do material que reveste e protege o bastão de compósito.

Assim, testes radiográficos foram realizados em campo na torre em “V” estaiada mostrada na figura 2, da linha de transmissão de 500 kV energizada de Sobral-Fortaleza nos isoladores poliméricos dispostos em “1”.

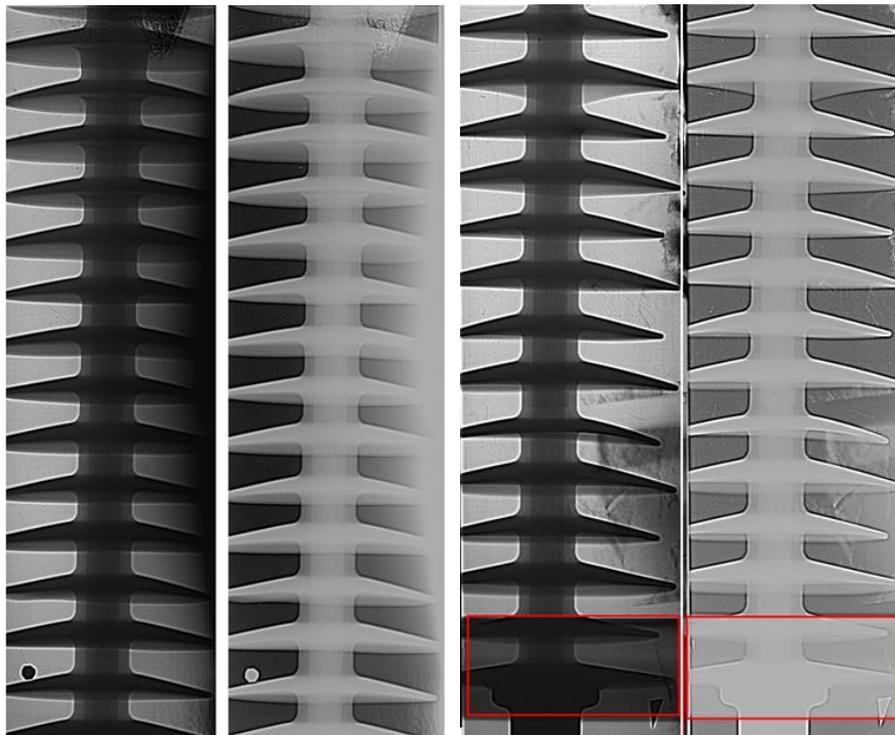


Figura 8. Imagens radiográficas no modo positivo e negativo de alta qualidade do isolador polimérico obtidas junto a torre da linha de 500 kV energizada e sem processamento de imagem. À Esquerda, imagens radiográficas da parte central, e da parte mais baixa próxima aos cabos condutores (direita). A região circundada em linha vermelha mostra o efeito do anel de equalização fixada próxima à fase.

Um total de 38 imagens radiográficas foram obtidas na linha de transmissão energizada e com sucesso, sem interferência de campo elétrico e do forte vento, que ventava com velocidade de aproximadamente a 40 km/h. A Figura 8 mostra as imagens radiografias de alta qualidade como foram obtidas mas nenhum defeito foi detectado.

5.0 - CONCLUSÕES

No presente trabalho, visando detectar falhas ocultas e críticas nos isoladores poliméricos em linha de transmissão de 500 kV energizada no campo, que podem levar ao rompimento do bastão de compósito de GFRP e como consequência a queda dos cabos condutores ao chão, mas que são difíceis de serem detectados com os métodos tradicionais em campo, um sistema de radiografia digital computadorizado imune ao campo elétrico foi desenvolvido para inspecionar a integridade estrutural dos isoladores poliméricos *in-situ* através de imagens radiográficas de alta qualidade e resolução espacial mesmo na presença de forte vento.

O sistema de inspeção radiográfica digital foi operado em linha de transmissão energizada de maneira adequada quando o efeito do vento foi controlado através do projeto de construção robusto do sistema. Os resultados dos testes em campo validaram as expectativas iniciais de forma a indicar que o uso da gaiola de Faraday evitou a interferência eletromagnética do intenso campo elétrico sobre a fonte de raios-X operada à bateria, que possui internamente dispositivos eletrônicos para controle de emissão de raios-X. Portanto, com o sistema de inspeção radiográfica desenvolvido no presente projeto e testado em linha de transmissão energizada de 500 kV em campo, pode-se iniciar imediatamente a inspeção dos isoladores poliméricos no campo.

Os resultados almejados foram plenamente alcançados comprovando que a análise radiográfica de isoladores possibilita que as empresas de transmissão e outros usuários possam se beneficiar de uma análise eficaz na determinação de falhas que venham a causar fraturas frágeis do compósito dos isoladores.

Com respeito aos isoladores novos, pelo fato dos isolador polimérico de 500kV possuir comprimento de aproximadamente de 4 metros e 129 aletas, a inspeção visual das regiões entre as aletas é de alta dificuldade de inspeção visual e humanamente impraticável. Verificou-se que radiografia é um método apropriado para a verificação minuciosa da integridade estrutural da camada de silicone que protege o compósito.

6.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores A.H.S, E.J.S.Jr, G.J.V.X e H.F. agradecem à STN pelo apoio financeiro através do Programa P&D ANEEL, o qual foi fundamental para o desenvolvimento do presente projeto.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GORUR, R.S., "Utilities share their insulator field experience", *Transmission&Distribution World*, <http://tdworld.com/overhead-transmission/utilities-share-their-insulator-field-experience>, acessado em 29 de janeiro de 2017.
- [2] DOMINGUES, E. da S., "Improved Condition Monitoring of Composite Insulators", A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering and Physical Sciences, 2012.
- [3] SCHMUCK, F., TOURREIL, C., "Brittle Fractures of Composite Insulators an Investigation of their Occurrence and Failure Mechanisms and a Risk Assessment", CIGRE WG 22-03.
- [4] PAIVA, O.L.S., SIMOES FILHO, M., "Reviewing 10 years of operating experience with composite insulators at CHESF", apresentado no World Congress & Exhibition on Insulators, Arresters & Bushings, Creta, Grecia, 2009.
- [5] *Insulators for overhead lines – Composite suspension and tension insulators for a.c. systems with a nominal voltage greater than 1000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria*, IEC 61109:2008.
- [6] YUAN, C., XIE, C., LI, L., Fuzeng Zhang and Stanislaw M. Gubanski, "Ultrasonic Phased Array Detection of Internal Defects in Composite Insulators", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 23, No. 1; February 2016.
- [7] TOURRIEL, C., PARGAMIN, L., THEVENET, G., PRAT, S., "Brittle fracture of composite insulators: why and how they occur", *Power Engineering Society Summer Meeting*, 2000. IEEE. pp. 2569-2574, August, 2002.
- [8] KUHL, M., "FRP Rods for Brittle Fracture Resistant Composite Insulators", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 8 No. 2, April 2001.
- [9] BURNHAM, J. T., BAKER, T., BERNSTORF, A., TOURREIL, C., GEORGE, J., GORUR, R., HARTINGS, R., HILL, B., JAGTIANI, A., MCQUARRIE, T., MITCHELL, D., RUFF, D., SCHNEIDER, H., SHAFFNER, D., YU, J., VARNER, J., "IEEE Task Force Report: Brittle Fracture in Nonceramic Insulators", *IEEE Transactions on Power Delivery*, V. 17, n. 3, July 2002.
- [10] KAMO, K., NAKANISHI, T., HAYASHI, Y., MATSUOKA, R., "Reproducing tests of brittle fractures of polymer insulators", *Proceedings of The 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Xi'an jiaotong University, Xi'an, China, June 21-26, 2000.
- [11] AMEMIYA, Y., MIYAHARA, J., "Imaging plate illuminates many fields," *Nature*, vol. 336(3), pp. 89-90, Nov. 1988.
- [12] ROWLANDS, J.A., "The physics of computed radiography", *Phys. Med. Biol.* 47, pp. R123-R166, 2002.
- [13] SHINOHARA, A. H., SANTANA, D. M. F., OLIVEIRA, P. P. J. C., SILVA, R. J. G., MAGALHAES, O. H., SILVEIRA, C. G., KHOURY, H. J., WAVRIK, J. F. A., BRANCO, F. M. A. C., LEITE, M. A., GALINDO, T. C., "Defects Detection in Electrical Insulators and Breaker for High Voltage by Low Cost Computed Radiography

- Systems”, In: DIR 2007 - International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography, 2007, Lion. Papers of DIR 2007, 2007.
- [14] SILVA, P. P. J. C. G. P. O., “Inspeção da degradação nos isoladores de compósito de linhas de transmissão através de ensaios não destrutivos”, Dissertação de Mestrado, Dept. Eng. Mec, Universidade Federal de Pernambuco, 2009.
- [15] SILVA, P. P. J. C. G. P. O., SHINOHARA, A. H., PACHECO, A. P., CASTRO FILHO, Z. P., MONTEIRO, S. L., “In-Service Aged Composite Insulators at Transmission Line Investigated by the Micro-Computerized Tomography”, Materials Transactions, v. 53, p. 617-620, 2012.
- [16] MENDONÇA, P.L., “Diagnóstico de falhas elétricas e mecânica em isoladores de compósito de classe de tensão de 69 kV através de radiografia computadorizada”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), Univ. Federal de Pernambuco, 2013.
- [17] CASTRO JUNIOR, Z. P., SHINOHARA, A. H., “Detectabilidade e análise dimensional de falhas no revestimento polimérico de isoladores de compósito por radiografia computadorizada”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), Univ. Federal de Pernambuco, 2009.
- [18] HALMASHAW, R., “Industrial Radiology – Theory and Practice”, Non-destructive Evaluation – series, Second edition, Chapman&Hall, 1995. Página 127.
- [19] EWERT, U., “New Trends in Industrial Radiography”, NDT.net, vol. 7, n. 2, pp. 1-5, fev. 2002.
- [20] *ASTM Standard Guide for Computed Radiography*, ASTM E2007-10 (Reapproved 2016), Dez. 2016.
- [21] NONAKA, J., SILVA JUNIOR, E. J., ESTIMA, D. A. C., SHINOHARA, A. H., PEREIRA, M., BRITTO, P. R. R., LOTT NETO, H. B. D. T., FONTAN, M. A. de B., SAKAMOTO, N., KOYAMADA, K., “LCD-Based Multi-Monitors System to Improve Inspection of Large and Complex Equipments by Visualization of High Resolution Computed Radiography – Part 1: Composite Insulators for 500 kV”, In: Rio Oil & Gas Expo and Conference, IBP2013_12, 2012.
- [22] NONAKA, J., SILVA JUNIOR, E. J., ESTIMA, D. A. C., SHINOHARA, A. H., PEREIRA, M., BRITTO, P.R.R., LOTT NETO, H. B. D. T., FONTAN, M. A. de B., “COTS Multi-Display System for High-Resolution Radiographic Inspection of Large Equipment Case Study: Composite Insulators for 500 kV Transmission Lines”, In: JBSMSE, 2013.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Henrique Baptista DufflesTeixeira Lott Neto, nasceu no Rio de Janeiro/RJ em 1957. Formado em engenharia mecânica pela USU-RJ, pós-graduado pela UFRJ/RJ. Trabalha na STN desde 2004 e é responsável pelo PCM – Planejamento e Controle da Manutenção.



Márcio Augusto de Buarque Fontan, nasceu no Maceió/AL em 1947. Formado em engenharia civil pela UFPE-PE. Trabalha na STN desde 2003 e exerce o cargo de Diretor Técnica.



Paulo Roberto Ranzan Britto, nasceu em Recife/PE em 1979. Formado em engenharia elétrica pela UPE – Universidade de Pernambuco em 2012. Atualmente trabalha na STN como Engenheiro Eletricista.



Armando Hideki Shinohara, nasceu em Bauru/SP em 1962. Atualmente, é professor titular do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE, Recife-PE. Doutor em Engenharia pela Universidade de Tohoku, Japão, em 1994; aduado em Engenharia Mecânica pela UNICAMP em 1986.



Edmilson José da Silva Júnior, nasceu em Escada/PE em 1989. Formado em técnico mecânico pelo SENAI/PE em 2007. Formado em engenharia mecânica pela UFPE em 2014. Atualmente, é engenheiro mecânico da Usina Ipojuca, Ipojuca/PE.



Gustavo José de Vasconcelos Xavier, nasceu em Recife/PE em 1953. Formado em engenharia elétrica pela UPE - Universidade de Pernambuco em 1975. Trabalhou na CHESF – Companhia Hidrelétrica do São Francisco de 1976 a 2014. Foi professor de física e medidas elétricas da Escola de Engenharia da UPE.



Hissae Fujiwara, nasceu em Bonito/PE em 1984. Formada em área de saúde pela UFPE em 2011. Atua como colaboradora pesquisadora em projetos de pesquisa na área de radiografia digital para setor elétrico, na área de formação de recursos humanos em tecnologia de construção naval desde setembro de 2011.