



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

CB/GSE/02

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO -VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO – GSE

LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM SUBESTAÇÕES ISOLADAS A GÁS PELO MÉTODO DAS ONDAS VIAJANTES FORA DA REGIÃO DE COBERTURA DAS ANTENAS UHF

A. T. CARVALHO
CEPEL
Brasil

H. J. A. MARTINS(*)
CEPEL
Brasil

H. P.A. JÚNIOR
CEPEL
Brasil

D. SOUZA
CEPEL
Brasil

L. TORRES
CEPEL
Brasil

R. DELGADO
CEPEL
Brasil

R. C. MENEZES
CEPEL
Brasil

RESUMO

O monitoramento de descargas parciais (DP) em subestações isoladas a gás (gas insulated substation - GIS) é uma ferramenta de grande utilidade para a avaliação e o diagnóstico destes equipamentos. Praticamente todas as GIS produzidas atualmente são fornecidas, senão com o sistema de monitoramento de DP em UHF já integrado, pelo menos com os sensores disponíveis no equipamento.

Este artigo apresenta um caso de sucesso no qual a localização dos defeitos apresentou desafios particularmente difíceis: contornar a baixa relação sinal-ruído sem o auxílio de amplificadores ou filtros de UHF através de técnicas de processamento digital de sinais, e localizar com precisão defeitos fora da região de cobertura dos sensores.

PALAVRAS-CHAVE

Descarga Parcial, Subestação Isolada a Gás, Localização, Tempos de Propagação, Processamento Digital de Sinais, Sensor Externo, Ondas Viajantes.

1.0 - INTRODUÇÃO

Subestações Isoladas a Gás SF₆ foram introduzidas no sistema elétrico na década de 60, e desde então sua utilização tem se expandido constantemente. Suas dimensões compactas tornam as GIS especialmente atrativas em regiões urbanas, onde são indesejáveis o alto custo por m² construído e o impacto visual de grandes instalações. No entanto, mais de 45 anos de experiência mostram que algumas faltas nesses equipamentos ocorrem devido a defeitos na isolamento, os quais podem ser detectados em seu estado primário através da medição de descargas parciais (DP).

Os sistemas de monitoramento de DP fazem a detecção de pulsos em ultra-alta frequência e apresentam como resultados histogramas bidimensionais caracterizando a ocorrência dos pulsos de DP em função de suas amplitudes e do seu instante de ocorrência. Em CA, o instante dos pulsos é usualmente registrado em função do ciclo da tensão aplicada, produzindo padrões PRPD (phase resolved partial discharge). Em CC, alguns padrões similares ao PRPD têm sido propostos, representando estatisticamente os desvios de amplitude e o intervalo entre pulsos na forma de histogramas bidimensionais. Em ambos os casos, os padrões de DP são utilizados na identificação do tipo de defeito na isolamento.

Após a sua detecção, frequentemente é necessária uma análise mais detalhada das DP para localização do defeito de modo que medidas cabíveis de manutenção corretiva possam ser aplicadas. Essa análise frequentemente inclui

(*) Av. Horácio de Macedo, n° 354 – sala 01 - Bloco D – CEP 21.941-911 – Rio de Janeiro, – Brasil
Tel: (+55 21) 2598 6351 – Fax: (+55 21) 2270 4189 – Email: helvio@cepel.br

a detecção de DP pelo método acústico, ou a triangulação de sinais de UHF para localização do defeito a partir dos tempos de propagação dos pulsos de DP.

Para localização dos pulsos pelo método das ondas viajantes (time of flight), é necessário adquirir simultaneamente dois sinais de DP provenientes dos sensores UHF com digitalizadores de alta velocidade. Devido à baixa relação sinal-ruído, amplificadores e filtros de UHF são frequentemente necessários. Além do mais, a técnica permite a localização de defeitos somente caso estes estejam entre os dois sensores medidos.

2.0 - LOCALIZAÇÃO DE DP PELO MÉTODO DAS ONDAS VIAJANTES

Sendo o SF₆ um gás eletronegativo, o processo de descarga nesse meio é diferente do que geralmente ocorre no ar, sendo os tempos de subida dos pulsos de DP substancialmente menores. Ao passo em que no gás N₂ os pulsos de DP usualmente possuem tempos de subida da ordem de 1 ns, no SF₆ esses tempos podem chegar a 100 ps. Dessa forma, a largura de banda dos sinais de DP se estende até a ordem de GHz [1]. Por esse motivo, sinais de DP em GIS são geralmente monitorados por sistemas na banda de ultra-alta frequência (UHF), entre 300 MHz e 3 GHz.

Os sensores de DP em UHF são antenas integradas à GIS. Devido a atenuações e reflexões dos sinais de DP em uma GIS, o monitoramento de uma GIS requer uma densa rede de sensores distribuídos ao longo de toda a instalação. Os sinais de DP se propagam desde sua origem até as antenas à velocidade da luz, e são registrados pelos sistemas de medição.

Os sistemas de monitoramento de DP usualmente fazem uma detecção de pico convertendo os sinais de UHF para a banda de MF ou HF. Digitalizados, esses pulsos são armazenados em histogramas bidimensionais para análise de padrões e inferência de possíveis causas e defeitos. Em CA, o instante dos pulsos é usualmente registrado em função do ciclo da tensão aplicada, produzindo padrões PRPD (phase resolved partial discharge). Em CC, alguns padrões similares ao PRPD têm sido propostos, representando estatisticamente os desvios de amplitude e o intervalo entre pulsos na forma de histogramas bidimensionais. Em ambos os casos, os padrões de DP são utilizados na identificação do tipo de defeito na isolação.

Para a localização de defeitos pelo método das ondas viajantes, entretanto, os sinais devem ser adquiridos diretamente das antenas ou sensores UHF, antes dos módulos de conversão de frequência, utilizando um digitalizador de alta velocidade. Um osciloscópio com uma taxa de amostragem mínima de 5 GS/s é recomendado. Devido à baixa relação sinal ruído, frequentemente são necessários filtros e amplificadores de UHF para identificação dos pulsos no domínio do tempo. A Figura 1 mostra o aparato utilizado para a aquisição da forma de onda dos pulsos de DP para localização de defeitos pelo método das ondas viajantes.

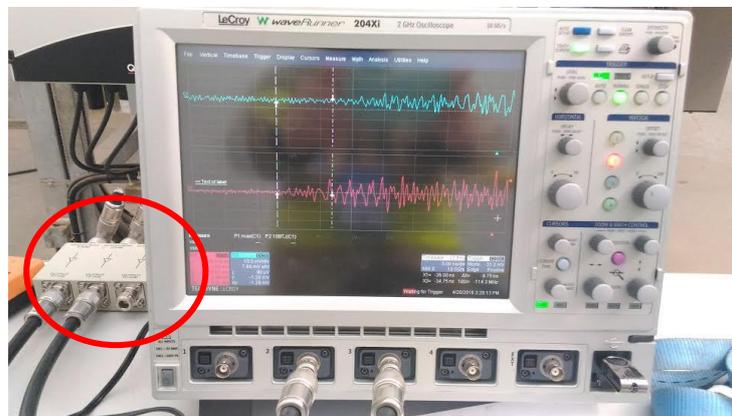


Figura 1 – Osciloscópio de alta velocidade utilizado para localização de DP em uma GIS pelo método das ondas viajantes. Em destaque, filtros e amplificadores de UHF utilizados no processo.

Os sinais de DP devem ser adquiridos de duas antenas entre as quais o defeito supostamente deve estar, de acordo com a Figura 2. Medidas precisas das dimensões da GIS e da localização dos sensores são necessárias a priori para a aplicação adequada do método. A geometria da GIS permite ainda tratar o problema da localização de DP como sendo unidimensional apresentando bons resultados.

A determinação do intervalo entre os pulsos detectados pelas duas antenas deve ser feita de forma precisa, visto que cada 1 ns de intervalo entre pulsos corresponde a uma distância de 30 cm na localização do defeito. Dada a dificuldade em estabelecer visualmente o início da frente de onda dos pulsos (vide Figura 1), o cálculo do intervalo entre pulsos depende em grande parte da experiência do executor do ensaio.

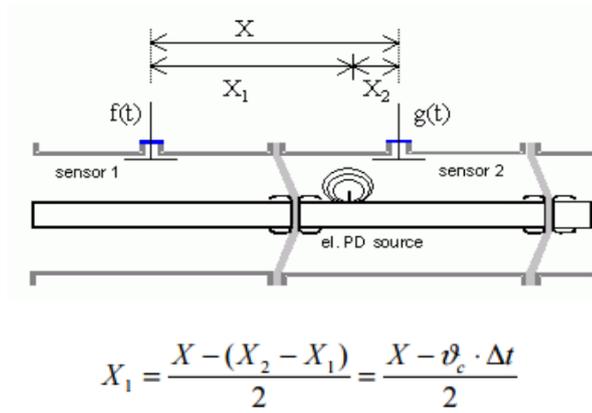


Figura 2 – Diagrama ilustrativo do posicionamento das antenas e equação para o cálculo da distância entre a primeira antena e o local do defeito onde se origina o sinal de DP [2]. $V_c = 0,3$ m/ns é a velocidade de propagação dos pulsos.

3.0 - ESTUDO DE CASOS

O presente estudo de caso ilustra uma situação em que sinais de DP foram detectados pelo sistema de monitoramento em uma GIS com três fases por compartimento. Os sinais foram detectados por uma Antena de UHF localizada próxima à entrada dos cabos na GIS (vide Figura 3).

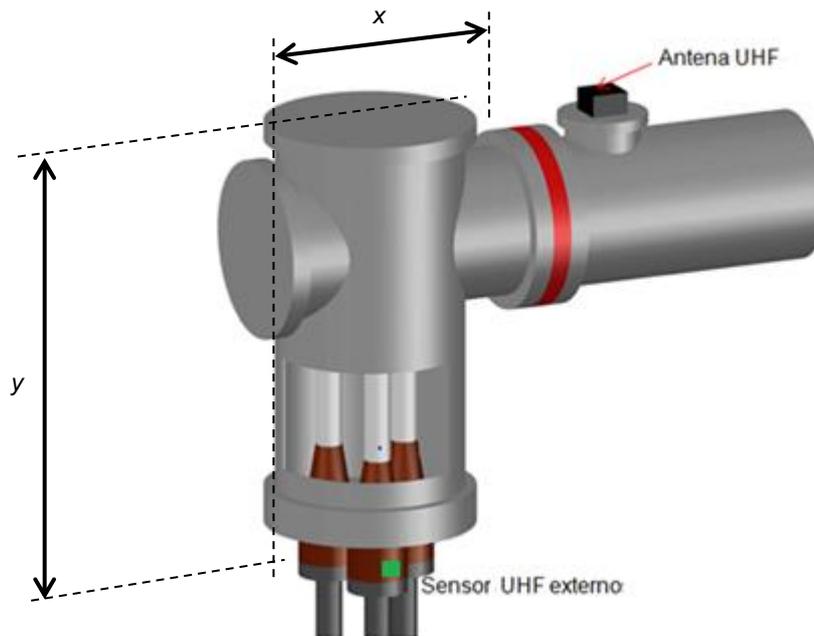


Figura 3 – Trecho da GIS com a Antena UHF que detectou sinais de DP nas proximidades do compartimento de entrada dos cabos de alta tensão. A marcação verde indica o posicionamento do sensor externo: $y = 1.138$ mm e $x = 950$ mm, perfazendo a distância entre sensores $X = 2,08$ m.

Após a detecção inicial, uma medição mais precisa foi realizada com o objetivo de localizar a origem das DP. No entanto, dois problemas foram verificados:

1. A origem do sinal de DP estava antes do primeiro sensor de UHF da GIS, impossibilitando a localização utilizando somente os sensores disponíveis na instalação.

2. Havia uma baixa relação sinal ruído, dificultando a identificação da frente de onda dos pulsos em UHF. Associado a isto, havia indisponibilidade de filtros e amplificadores analógicos na banda de UHF que pudessem auxiliar nessa detecção.

Para localizar o defeito, dois artifícios foram utilizados para contornar estas dificuldades: a utilização de um sensor de UHF externo acoplado à GIS, e o recurso a algoritmos de processamento de sinais para detectar computacionalmente a frente de onda dos pulsos em meio ao ruído de fundo.

3.1 Utilização de um Sensor Externo de DP-UHF

A localização da origem das DP pela diferença nos tempos de propagação é possível quando o defeito se encontra entre as antenas de UHF conforme mostra a Figura 2. Caso o defeito esteja além do trecho compreendido entre as antenas, a equação indicada na Figura 2 resulta igual a zero, caso a origem esteja antes da antena f , ou igual a X , caso a origem esteja após a antena g . No caso apresentado, havia grande probabilidade do defeito estar localizado no compartimento de entrada dos cabos de alta tensão, e, portanto, antes da primeira Antena de UHF disponível.

Para fazer a localização do sinal, após a verificação de que não havia blindagem completa nas buchas de entrada dos cabos, foi instalado um sensor UHF externo na superfície externa das buchas, conforme indicado na Figura 3. O sensor corresponde a uma antena capaz de detectar sinais UHF, própria para o posicionamento em superfícies poliméricas, como os espaçadores aparentes encontrados em SIG, janelas de inspeção de vidro ou acrílico ou em materiais isolantes em geral.

O sensor UHF foi fixado com uma correia na entrada dos cabos. Sua posição foi precisamente medida e a distância entre sensores foi considerada $X = 2,08$ m. Em seguida foi realizada a medição dos sinais com osciloscópio.



Figura 4 – Sensor externo de UHF acoplado à GIS para localização das DP.

3.2 Medição

Para a medição dos pulsos foi utilizado um osciloscópio Tektronix TDS 3054-B com taxa de aquisição de 5 GS/s, equivalente à resolução temporal de 200 ps.

O tempo de propagação nos cabos das antenas ao osciloscópio foi previamente calculado injetando um sinal de um calibrador de DP simultaneamente na extremidade dos dois cabos. Desse modo foi feita uma calibração para compensar diferenças no tamanho dos cabos de medição. Duzentas aquisições foram feitas e a média das diferenças foi considerada. A Figura 5 mostra a aquisição de um pulso do calibrador de DP conduzido aos 4 canais do osciloscópio através de 4 cabos diferentes para calibração dos tempos de propagação.

A calibração dos tempos de propagação nos cabos de medição revelou uma diferença média de 1,88 ns entre os sinais da Antena de UHF e o sensor de UHF externo, equivalente a 9,41 amostras. Considerando o arredondamento para o número inteiro mais próximo, o sinal de um dos cabos foi adiantado em 9 amostras para compensação do tempo de propagação.

Em seguida 120 sinais de DP foram aqisitados com taxa de amostragem de 5 GS/s em registros com 2 μ s de duração. O sinal do sensor externo foi conectado ao Ch1 do osciloscópio, e o sinal da Antena UHF foi conectado ao Ch2. O osciloscópio foi configurado com impedância entrada de 50 Ohms e todos os registros foram disparados pelo pulso medido na Antena de UHF.

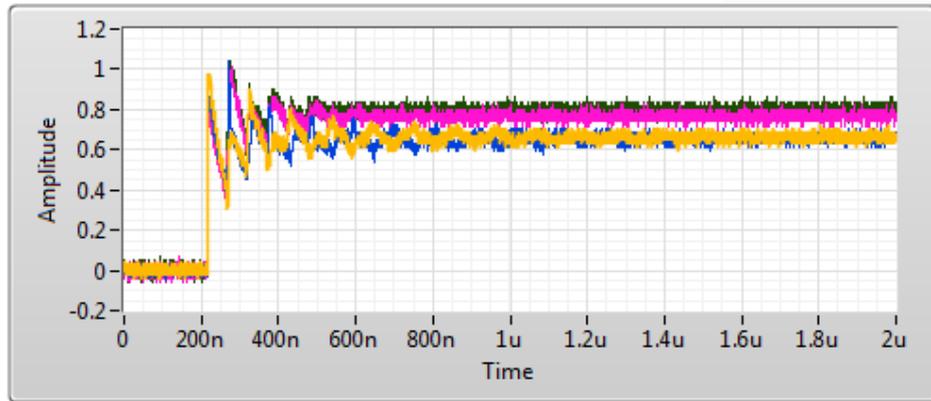


Figura 5 – Aquisição de pulsos do calibrador de DP para correção dos tempos de propagação nos cabos de medição entre as Antenas de UHF e o osciloscópio.

3.3 Processamento dos Sinais

Foram tomadas 120 medições com aquisições disparadas pela Antena UHF. Cada forma de onda foi pré-processada com remoção de DC-offset, normalização em amplitude e correção da defasagem dos cabos em número de amostras.

Como os pulsos de DP variam em amplitude, somente o trigger por detecção de nível não foi suficiente para garantir o alinhamento de todos os sinais na mesma base de tempo. Para alinharmos todas as 120 medições na mesma base de tempo, alinhamos o instante do trigger de modo a maximizar a correlação entre a forma de onda do Ch2 e a média das formas de onda do Ch2 previamente alinhadas.

Finalmente, foi calculada a média de todos os sinais alinhados para os canais Ch1 e Ch2. Os sinais foram tomados em módulo. Para o cálculo do seu tempo de chegada foi considerado o instante em que a forma de onda normalizada ultrapassou o nível de 20% da amplitude normalizada conforme a Figura 6.

A diferença de tempo de propagação calculada entre a Antena UHF e o sensor externo de UHF foi de 3,59 ns.

3.4 Localização

Considerando a velocidade de propagação $V_c = 0,30$ m/ns e tomando a equação mostrada na Figura 2, calculamos:

$$X1 = (2,08 \text{ m} - 0,30 \text{ m/ns} * 3,59 \text{ ns}) / 2 = 0,50 \text{ m}$$

indicando que a origem do sinal estava aproximadamente meio metro acima da posição do sensor UHF externo, no compartimento de entrada dos cabos, conforme mostrado na Figura 7.

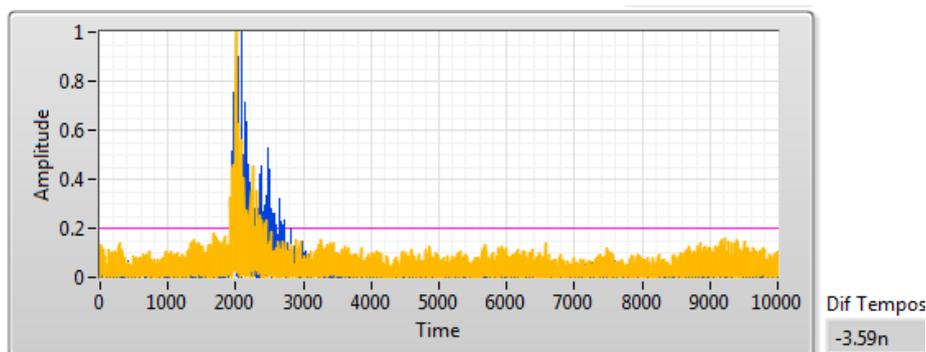


Figura 6 – Pulsos medidos no sensor UHF externos e Antena UHF, filtrados, normalizados e em módulo para o cálculo da diferença dos tempos de propagação.

3.4.2 Identificação da fase defeituosa

Embora a região do possível defeito tivesse sido determinada, necessitava-se também identificar a fase de ocorrência do mesmo, o que facilitaria sobremaneira a inspeção posterior. Por ser um equipamento com as três fases no interior de um único invólucro, a interação entre as fases dificultou esta tarefa.

A maneira encontrada para se identificar a fase na qual as atividades de descargas parciais tinham sua origem foi medir o tempo de trânsito dos pulsos de descargas parciais, simultaneamente, a cada duas fases, conforme Tabela 1. Conforme mostrado na Figura 7, com a comparação da diferença de tempos de propagação entre as fases, aquela que tivesse o menor tempo de propagação seria a fase procurada, visto que para as fases sãs o tempo de trânsito seria maior, pois, além do tempo gasto no percurso galvânico é necessário considerar o tempo do percurso devido ao acoplamento entre as fases.

Tabela 1 – Combinação para identificação da fase defeituosa

	A	B	C
A	—	Δ_{AB}	Δ_{AC}
B	Δ_{BA}	—	Δ_{BC}
C	Δ_{CA}	Δ_{CB}	—

Onde, $\Delta_{AB}=\Delta_{BA}$; $\Delta_{AC}=\Delta_{CA}$; $\Delta_{BC}=\Delta_{CB}$

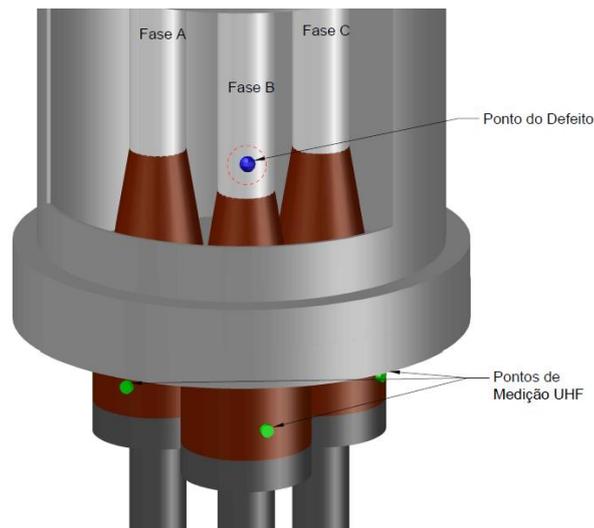


Figura 7 – Localização do ponto do defeito de acordo com a metodologia proposta.

4.0 - RESULTADOS

Com a identificação da região de origem das descargas parciais, foi realizada ainda uma videoscopia, a qual confirmou o resultado das medições. Posteriormente o compartimento de entrada dos cabos foi desmontado, e identificou-se como origem das atividades de descargas parciais, conforme mostrado na Figura 8, um dos três parafusos de fixação da capa de alumínio de um dos extensores dos cabos de alta tensão. O parafuso foi fixado de forma inadequada (enjambado), de modo que parte do mesmo se estendia além da região da capa de alumínio, criando uma protuberância, conseqüente concentração do campo elétrico, e descargas parciais. A ponta formada pelo parafuso representava um comprometimento na isolamento da GIS, representando um ponto de fragilidade da instalação.

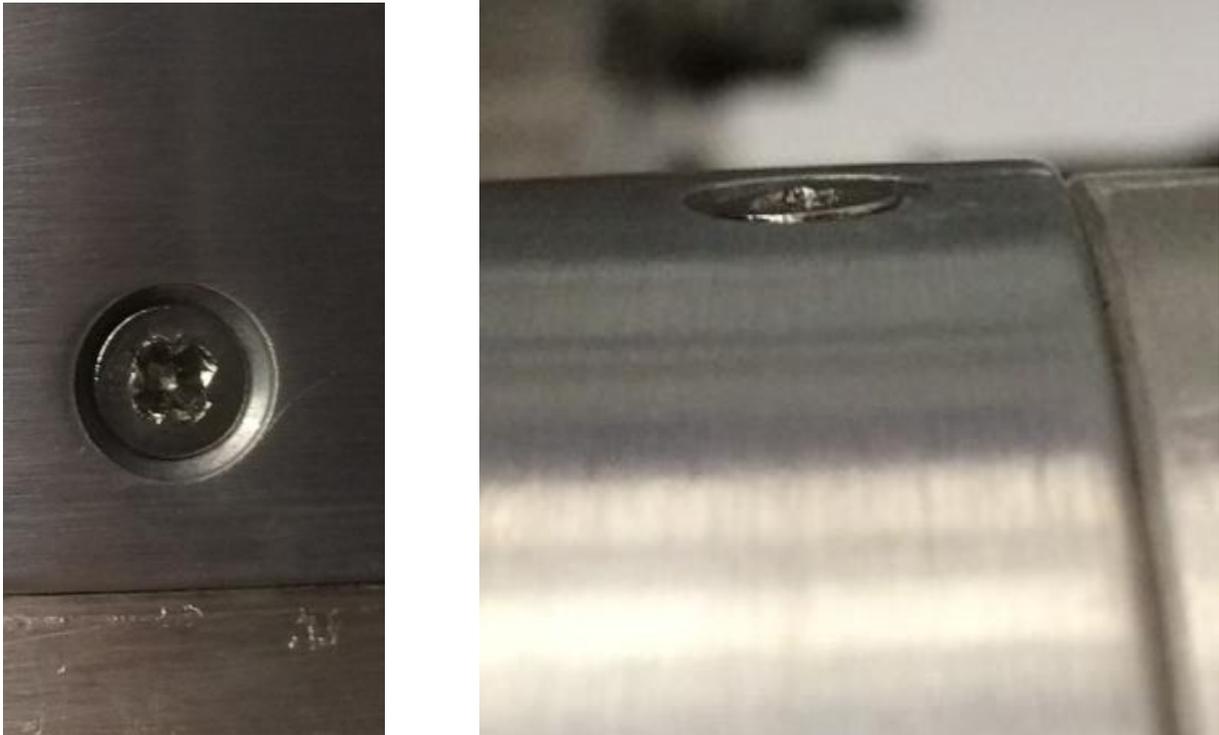


Figura 8 – Após abertura do compartimento, confirmada a montagem inadequada de um dos parafusos. Parte superior do parafuso se estendia além da região da capa de alumínio, criando uma protuberância e consequente concentração de campo elétrico.

Outra situação, mostrada na Figura 9, refere-se ao ponto de conexão do cabo a bucha de passagem. Exatamente nessa região, em outro compartimento, região ainda mais externa que àquela do extensor, portanto, fora do alcance das antenas de UHF, identificou-se que alguns tentos do cabo haviam se desprendido do condutor da bucha de passagem. Essa situação, provavelmente, agravada a partir da inserção de cargas, com consequente circulação de corrente e vibrações naturais do equipamento, dava um falso diagnóstico de descargas parciais. Isto se deveu ao fato de que com a vibração natural da GIS, os tentos ora tocavam no condutor, ora não, fazendo com que pequenos arcos fossem gerados.



Figura 9 – Conexão do condutor do cabo ao condutor da bucha de passagem

Após as devidas correções, foram realizadas as últimas inspeções e remontagem com auxílio de videoscopia. A GIS foi reenergizada, não havendo mais indicativo de atividades de descargas parciais nessas regiões.

5.0 – CONCLUSÃO

A localização de DP em GIS pelo método das ondas viajantes é uma ferramenta eficaz para auxiliar e direcionar os esforços das equipes de manutenção. No entanto, em certos casos, torna-se difícil aplicar a metodologia devido à

baixa relação sinal-ruído e especialmente quando o defeito está fora da região de localização coberta pelos sensores instalados. Nesse artigo foi apresentado um caso de sucesso de localização de defeitos em uma GIS onde as dificuldades supracitadas foram sanadas utilizando algoritmos de processamento de sinais e sensores de DP-UHF externos adicionais.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gross, Detlev W., Soeller, Merkus; Commissioning and Operation of large GIS Partial Discharge Monitoring Systems. SCD1 Colloquium, Rio de Janeiro - Brazil, September 13-18, 2015.
- [2] Hoek, Stefan M., Partial discharge (PD) locating in gas-insulated switchgear (GIS), Institute of Power Transmission and High-Voltage Technology, University of Stuttgart, Germany.
- [3] Jin Jun. Noise Reduction and Source Recognition of PD Signals in GIS. Ph. D. Thesis, National University of Singapore, 2005.
- [4] Cigré Brochure 654 - UHF Partial Discharge Detection System for GIS: Application Guide for Sensitivity Verification. Working Bodies: WG D1.25 - SC: D1 - Year: 2016

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Helvio Azevedo Martins - Nascido em Nova Friburgo - RJ. Graduado em Engenharia Elétrica (sistemas de potência) pela UFRJ, 1979, onde também obteve o grau de Mestre em Engenharia Elétrica (Alta Tensão), 1987; e Doutorado em Engenharia Elétrica em 2007, desenvolvendo tese sobre monitoramento de deslocamentos geométricos de enrolamentos de transformadores de potência utilizando a resposta em frequência associada a algoritmos de inteligência artificial. Sua experiência profissional inclui a ex-PTEL-Projetos e Estudos de Engenharia, onde participou de estudos de planejamento da interligação do sistema elétrico brasileiro e projetos de subestações. No CEPEL desde 1985, atua no desenvolvimento de técnicas de ensaios aplicados na avaliação de equipamentos elétricos de AT. Atualmente desenvolve pesquisas relacionadas a métodos e técnicas para monitoramento, avaliação e diagnóstico de equipamentos elétricos. É autor de diversos trabalhos, nacionais e internacionais, participando ativamente de alguns grupos de trabalho do Cigré.



André Tomaz de Carvalho - Graduado Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2001, recebeu o título de Mestre em Ciências da Universidade de São Paulo em 2005, e o título de Doutor em Ciências pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2014. De 2001 a 2006 atuou como pesquisador colaborador no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL, e em 2006 foi admitido através de concurso público como pesquisador no mesmo centro. Seus principais interesses profissionais são: instrumentação virtual, sistemas embarcados, processamento digital de sinais e diagnóstico preditivo de equipamentos elétricos.

Hélio de Paiva Amorim - Doutor e mestre em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2001 e 1997, respectivamente) e graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Taubaté (1993). Desde 2001 é pesquisador III do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) órgão das Empresas Eletrobrás. Possui experiência na área diagnóstico de equipamentos elétricos, atuando principalmente nos seguintes temas: monitoramento de equipamentos elétricos de alta tensão, medição e análise de descargas parciais, inteligência artificial e confiabilidade.