

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

Medição de Descargas Parciais em Transformadores de Instrumentos e Para Raios no Campo: Ferramentas Preditivas de Diagnóstico para uma possível gestão de ativos

LEONARDO TORRES BISPO DOS SANTOS (1); RÔMULO DOS SANTOS DELGADO (2); LUIZ EDUARDO DIAS SANTOS (3); HELIO DE PAIVA AMORIM JÚNIOR (4);
CEPEL(1);

RESUMO

A medição de Descargas Parciais corresponde a um ensaio normalizado pela IEC 60270, cuja finalidade é a avaliação da isolação dos equipamentos e ocorre em geral em imperfeições da isolação ou em regiões da onde haja intensificação de campo elétrico. Entretanto, quando feita em campo, onde o nível de ruído é elevado, passa a ser identificada com dificuldade, pois a perda de sensibilidade é significativa. Neste sentido, pretende-se apresentar no trabalho a experiência do Cepel de diversas medições em Para-raios e transformadores para instrumentos, em diferentes subestações, propondo a medição como uma ferramenta preditiva de diagnóstico aos gestores de manutenção.

PALAVRAS-CHAVE

Transformadores de Instrumentos, Para Raios, Descargas Parciais, Manutenção Preditiva, Técnicas não Invasivas

1.0 - INTRODUÇÃO

A medição de Descargas Parciais (DP) corresponde a uma metodologia de medição normalizada pela IEC 60270 e avalia basicamente fragilidades dielétricas em diversos sistemas isolantes existentes nos equipamentos elétricos de potência quando submetidos à diversos gradientes de tensão e portanto campos elétricos que podem ser intensificados ou não em uma dada região específica da isolação. Suas principais variáveis identificadas nos ensaios normalizados correspondem à amplitude da atividade de DP quantificada em pC (PicoCoulombs), a taxa de repetição com a que a atividade de DP ocorre em um ciclo de potência, podendo ser diferenciada por uma escala de cores onde a taxa de repetição é maior quão mais rubra é a coloração e a sua fase de ocorrência em graus, mediante um sinal de sincronismo, formando assim o gráfico PRPD (*Phase Resolved Partial Discharge*) que caracteriza de forma completa o fenômeno. A Figura 1 apresenta o gráfico típico de PRPD de um equipamento.

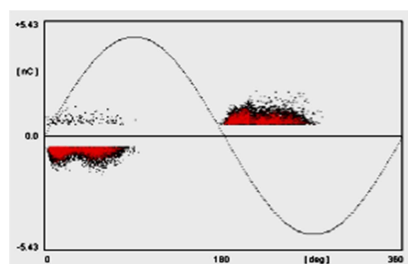


FIGURA 1 – Gráfico PRPD obtido em uma medição normalizada de DP

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

Geralmente os ensaios normalizados de DP são realizados em ambientes laboratoriais com níveis de ruído controlados e de baixa amplitude, com instrumentos calibrados, além de equipamentos de alta tensão de alto desempenho, de forma a garantir que o fenômeno registrado é proveniente somente da fragilidade dielétrica da isolamento do equipamento avaliado e não gerado por uma fonte externa de ruído. Entretanto, com o avanço das ferramentas de processamento digital de sinais e dos próprios hardwares de medição, a medição de DP se desenvolveu no âmbito dos métodos não normalizados e de campo. Muitos estudos e sensores já foram testados, onde todos buscam uma boa sensibilidade em termos de relação sinal-ruído, dispondo de sistemas de filtragem e de ferramentas de processamento de sinal em múltiplas faixas de frequência. Uma das vantagens dos métodos de medição não normalizados é o caráter preditivo e que pode fornecer subsídios aos gestores de ativos para a avaliação das condições operativas de muitos equipamentos a custos reduzidos e de forma muitas vezes não invasiva, onde não há a necessidade de desligamentos.

Neste sentido, o trabalho pretende apresentar a experiência de um grupo de trabalho do Cepel, formado a través de um projeto institucional de pesquisa que propôs a medição de descargas parciais no campo como uma opção preditiva de diagnóstico em pára-raios e transformadores para instrumentos, em diferentes subestações do setor elétrico nacional. A proposta de medição consiste basicamente na instalação de três tipos de sensores no campo nestes ativos, conforme a viabilidade técnica e uma análise crítica de sensibilidade dos mesmos.

Um dos sensores são os TCs de alta frequência (HFCT - *High Frequency Current Transformers*), instalados na cordoalha de aterramento destes equipamentos. Além do HFCT, outros sensores também foram testados em laboratório e utilizados em medições no campo, na tentativa de correlacionar mais de uma metodologia de diagnóstico à possíveis padrões de DP nos equipamentos, sendo eles os sensores acústicos piezoelétricos quando tecnicamente é possível a sua instalação e os sensores UHF (*Ultra High Frequency*) para a captação da radiação eletromagnética proveniente das atividades de descarga, mesmo em um ambiente ruidoso como as subestações.

Para uma avaliação crítica das metodologias, será apresentado neste trabalho as potencialidades e dificuldades de cada uma na identificação de descargas parciais no campo, além dos casos comprovados posteriormente em inspeções realizadas em equipamentos retirados de operação. Desta forma, a utilização de ferramentas de tratamento do sinal e a convergência de mais de uma metodologia de medição, podem fornecer aos gestores de manutenção subsídios importantes na definição de possíveis critérios de priorização em intervenções futuras sobre tais equipamentos nas subestações.

2.0 - METODOLOGIAS DE DIAGNÓSTICO PARA MEDIÇÃO DE DP NO CAMPO

As metodologias de diagnóstico não normalizadas aplicadas no projeto de pesquisa no qual se baseia este trabalho correspondem basicamente às três metodologias, diferenciadas pelo tipo de elemento sensor, sua banda de frequência e o sistema de aquisição, porém todas podem apresentar os sinais no domínio do tempo e serem correlacionadas mediante a ocorrência de DP. Cabe ressaltar que a medição em campo não quantifica as possíveis atividades de descargas parciais em picoCoulombs, porém é qualitativa quando se compara os resultados obtidos em um grupo de ativos nas diversas subestações em que é empregada e pode representar uma ferramenta inicial de seleção de ativos para ações de intervenção e retirada de operação. As metodologias a serem apresentadas são:

- a. O Método Eletromagnético utilizando HFCT;
- b. A Metodologia Acústica com sensores ressonantes piezoelétricos;
- c. O Método UHF através de antenas eternas.

2.1 O Método Eletromagnético com HFCT

O método eletromagnético empregado na detecção de DP no campo em TIs e Para-Raios utiliza um sistema de aquisição em banda larga em conjunto com um transformador de corrente em alta frequência (*High Frequency Current Transformer* - HFCT) como elemento sensor e eventualmente uma bobina de *Rogowski* para a obtenção do sinal de sincronismo em 60 Hz da própria instalação conforme apresenta a Figura 2. Este sistema dispõe de

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

ferramentas de processamento de sinal que fazem a “clusterização” dos sinais captados no campo e os agrupa em faixas de frequência para que se possa fazer de forma mais fácil a separação do ruído da atividade de descarga parcial. Além deste recurso de processamento de sinais, o sinal proveniente do HFCT também pode ser enviado a um osciloscópio para que o sinal possa ser avaliado no domínio do tempo.

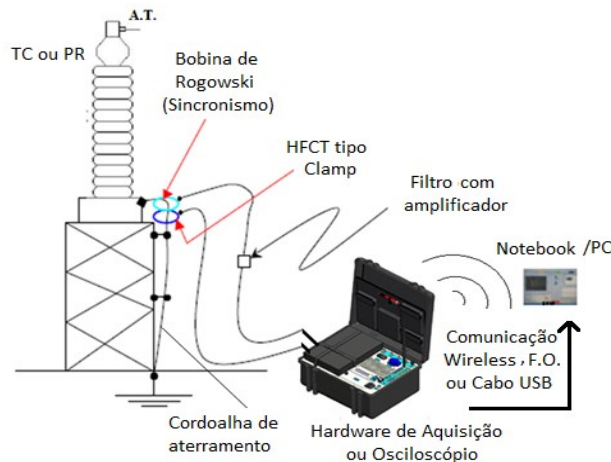


FIGURA 2 – Arranjo de Medição de DP no Campo pelo Método Eletromagnético com HFCT

Apesar do hardware de aquisição também possuir um módulo de emulação da IEC 60270 para medições laboratoriais, as medições no campo geralmente são feitas em miliVolts (mV) e alguns filtros de hardware podem ser adotados para eliminação de ruído em determinadas faixas de frequências de forma prévia. Além disso, o sistema de medição se comunica com um computador através de software via fibra óptica, wireless ou via cabo USB. Os HFCT são sensores de corrente que possuem internamente um elemento shunt de forma que o sinal já saia na forma de tensão, onde sua faixa de operação plana varia de 1 MHz à 80 MHz. Tal metodologia pode ser aplicada em todos os TIs e em Para-Raios.

2.2 O Método Acústico com Sensores Pizoelétricos Ressonantes

O método acústico empregado na avaliação de TIs no campo utiliza basicamente sensores piezoelétricos ressonantes posicionados sobre o tanque dos equipamentos, onde geralmente se encontram a unidade eletromagnética ou a parte ativa em TPIs e TPCs e no caso de TCs do tipo “dead tank ou hair-pin type”, sendo, portanto não realizada em TCs do tipo invertido ou “top core” em função da parte ativa estar próxima do potencial de alta tensão. Cabe ressaltar que em para raios também não se aplica a referida metodologia pelos mesmos motivos de impossibilidade construtiva em relação ao posicionamento de sensores no corpo de porcelana do para-raios em operação.

A metodologia acústica consiste basicamente na aquisição de sinais provenientes de ondas de pressão mecânicas geradas com as atividades de DP internas ao equipamento. Os sensores acústicos do tipo piezoelétricos, convertem essas ondas de pressão em sinais elétricos e por serem ressonantes, a faixa de frequência do sensor utilizado para as medições de campo no trabalho (R15I) está entre 50 e 400 kHz e frequência de ressonante em 150kHz. Tais faixas já estão fora da faixa de frequência audível e imune ao ruído ambiente externo.

Nesta metodologia, inicialmente captamos o ruído de fundo com o sensor acústico para obtermos o padrão de normalidade e posteriormente posicionamos o sensor sobre o tanque ou a estrutura metálica do equipamento iniciando assim a aquisição dos sinais provenientes de alguma possível anormalidade interna, sendo ela um problema de natureza mecânica ou elétrica. Portanto a metodologia acústica se utiliza de parâmetros iniciais durante a calibração ou verificação de sensibilidade do sensor e os toma como uma referência de normalidade.

Em alguns casos, dependendo do ativo, além desta comparação básica com um nível de referência, é possível qualificar um determinado tipo de defeito através da comparação dos gráficos obtidos previamente em ensaios laboratoriais, sendo muito útil portanto, na localização e qualificação de defeitos. No caso específico de TIs e Para-raios, por serem equipamentos de menor tamanho e volume se comparado aos transformadores e potência, o fato

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

de identificar algum padrão de anormalidade já é de grande valia para o gestor de manutenção, aliado ao fato de ser uma medição não invasiva portanto, não necessita de desligamentos.

Em relação à instrumentação adotada, utilizou-se analisadores acústicos de isolamento com plataformas gráficas já dedicadas para avaliar possíveis falhas dielétricas através de três modos de medição específicos ou mesmo obter o sinal acústico no domínio do tempo para a avaliação em um osciloscópio. A Figura 3 apresenta um esquema básico da aplicação da metodologia em TIs no campo.

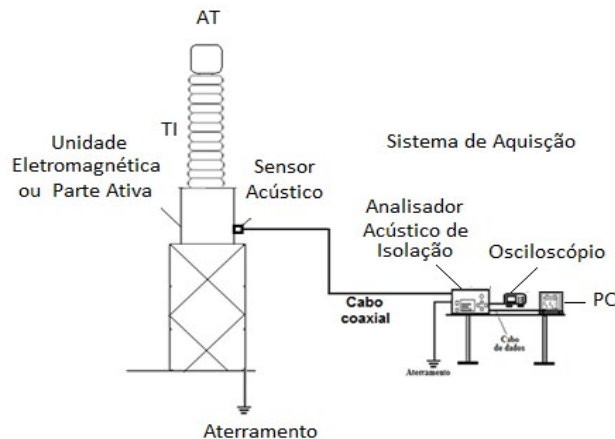


FIGURA 3 – Arranjo Básico de Medição de DP no Campo pelo Método Acústico em TIs

2.3 Medição com Sensores UHF

O fenômeno de descargas parciais ao ocorrer em equipamentos elétricos pode se manifestar de diversas formas e com os mais variados tipos de efeitos físicos. Como a emissão de luz, calor, reações químicas dependendo do meio em que ela ocorra ou na forma de radiação eletromagnética em altas frequências.

No âmbito do projeto, pesquisas e testes foram realizados com o objetivo de se captar a radiação eletromagnética liberada com a ocorrência de DP nos equipamentos nas subestações. Em relação à esta nova proposta, a análise foi feita através de sensores UHF externos e tal procedimento teve como objetivo principal a verificação da consistência da técnica em captar estas radiações eletromagnéticas provenientes de possíveis descargas parciais internas nos equipamentos em operação, mesmo tratando-se de ambientes ruidosos como as subestações.

A metodologia consiste em inicialmente obter o espectro de "ruído de fundo" da subestação com o sensor posicionado para o ar e em um ponto específico da mesma onde serão identificadas as possíveis frequências de radio, controle aeronáutico, possíveis radares próximos da SE, telefonia celular entre outras fontes, para compor o chamado "espectro de referência" UHF da subestação. Posteriormente, realiza-se a comparação desse espectro com o espectro obtido com o sensor próximo à cada equipamento avaliado através da sobreposição das curvas.

Outra proposta consiste no cálculo da DEE (Densidade Espectral de Energia) sendo esta a área sobre a curva relativa ao espectro de frequência obtido e calculada tanto para o nível de referencia obtido na SE como para o espectro obtido próximo a cada equipamento. O elemento sensor consiste basicamente de uma antena UHF móvel que capta sinais em uma ampla faixa de frequências (de 50 MHz a 1 GHz) e uma instrumentação dedicada que gera o gráfico do espectro UHF ou mesmo um analisador de espectro, onde os gráficos possam ser obtidos e comparados. Da mesma forma que nos métodos eletromagnético e acústico, o sinal UHF também pode ser obtido no domínio do tempo em um osciloscópio. A Figura 4 apresenta um típico "espectro de referência" de ruído de fundo obtido em subestações utilizado na análise comparativa dos sinais e identificação de defeitos.

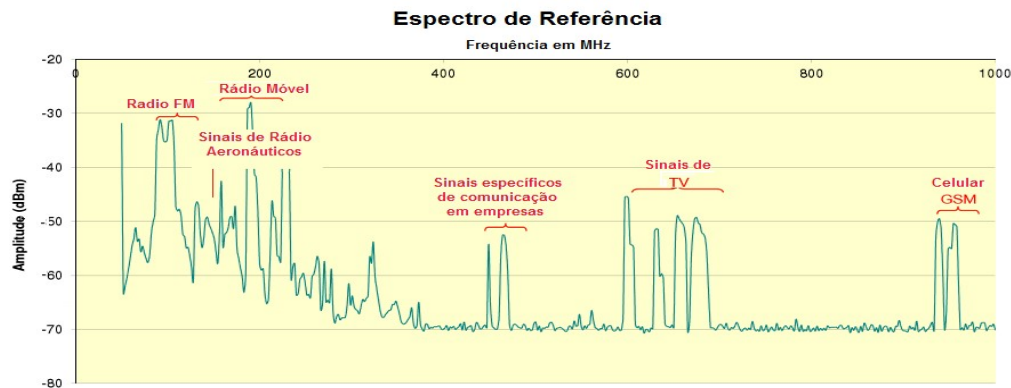


FIGURA 4 – Exemplo de Espectro de Referência Obtido em Subestações pelo Método UHF

Estudos com nessa metodologia mostram que mesmo sendo as subestações ambientes com elevado nível de ruído, radiações eletromagnéticas provenientes de atividades de DP, apesar de serem sinais normalmente de baixa energia, costumam se manifestar em regiões de frequência mais elevada e podem ser identificadas através da comparação entre as curvas do espectro de referência da SE e do sinal obtido com o sensor próximo ao equipamento a ser avaliado. A Figura 5 apresenta um estudo de caso de uma atividade de DP interna identificada no campo em um TC, retirado de operação e com DP de 75 pC medida pelo método normalizado em laboratório.

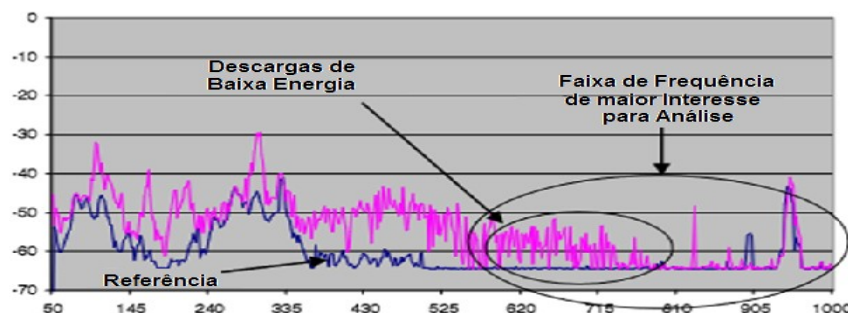


FIGURA 5 – Espectro de Referência da SE em Azul e o Espectro Obtido com o Sensor Próximo à um Equipamento Retirado de Operação

3.0 - DESENVOLVIMENTO DAS METODOLOGIAS DE DIAGNÓSTICO PARA APLICAÇÃO NO CAMPO

O desenvolvimento do projeto institucional foi estruturado basicamente em três etapas para a verificação das técnicas preditivas propostas e que foram avaliadas no decorrer do seu período, sendo elas:

- Etapas de avaliação laboratorial, definindo as metodologias, instrumentações e os elementos sensores que poderiam ser usados em campo;
- Etapas de medições de campo, onde as metodologias foram aplicadas em ativos do setor elétrico.
- Etapas de inspeção de ativos para o fechamento de ciclos de diagnósticos formulados pelas metodologias preditivas empregadas.

3.1 Ensaio Laboratoriais Para Definição das Metodologias a Serem Aplicadas em TIs e Para-Raios no Campo

Inicialmente alguns equipamentos foram enviados para o Cepel para que testes laboratoriais preliminares fossem realizados para comprovar o potencial de diagnóstico das metodologias propostas. Posteriormente, outros testes foram realizados em laboratório para avaliar a sensibilidade dos sensores em cada ativo. Desta forma, foram

realizados ao longo do projeto testes laboratoriais com várias instrumentações e sensores para definir como as metodologias seriam aplicadas no campo. Posteriormente, foram definidas as seguintes premissas e conclusões:

- TCs do tipo Top Core ou de núcleo invertido, só poderiam ser avaliados pelo método eletromagnético, pois não seria possível a instalação de sensores acústicos próximo às regiões de potencial elevado, já os TCs do tipo núcleo "Hair pin" poderiam ser também avaliados pela metodologia por serem dotados de tanque na parte inferior. A Figura 6 ilustra os dois tipos de projetos mencionados;
- TPCs por serem dotados de coluna capacitiva dentro da estrutura de porcelana e unidade eletromagnética dentro da parte inferior aterrada em alumínio, conforme a Figura 7, poderiam ser objeto das metodologias acústica e eletromagnética com HFCTs e UHF com sensores instalados próximos à base no campo;
- Os Transformadores de Potencial Indutivos ou TPIs seguiram a mesma lógica dos TCs e como sua aplicação em geral se estende até 138 kV, foram pouco avaliados ao longo do projeto de pesquisa;
- Os Para-raios foram analisados somente pelo método eletromagnético também pelo mesmo motivo dos TCs do tipo invertido;
- O método UHF ao longo do projeto pôde ser utilizado em todos os ativos pois era adaptado no pedestal de todos os equipamentos e próximo à base, onde os equipamentos são aterrados. Por ser não invasivo, o método apresentou grande potencial na avaliação de ativos em campo, entretanto torna-se necessário a adaptação de ferramentas de processamento digital de sinais para constatar a sua eficácia na avaliação de defeitos dielétricos em TIs e pára-raios no campo em ambientes com elevado nível de ruído, uma vez que a captação da radiação eletromagnética é feita pelo ar e em frequências entre MHz e 1 GHz.
- O método eletromagnético utilizando HFCTs na cordoalha de aterramento dos apresentou boa sensibilidade nas medições laboratoriais e são aplicáveis à todos os TIs e Para-raios no campo;

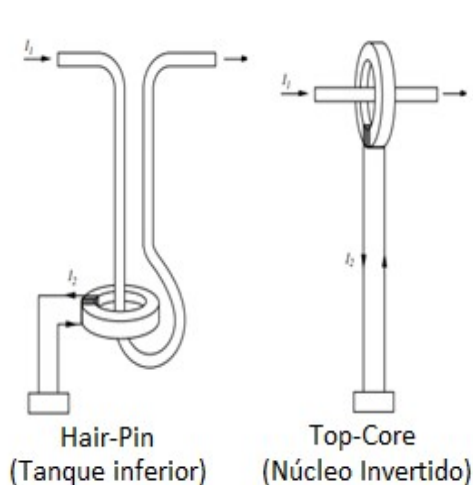


FIGURA 6 – Diferenças construtivas entre TCs do tipo "Hair pin" e do Tipo "Top Core" ou Núcleo Invertido

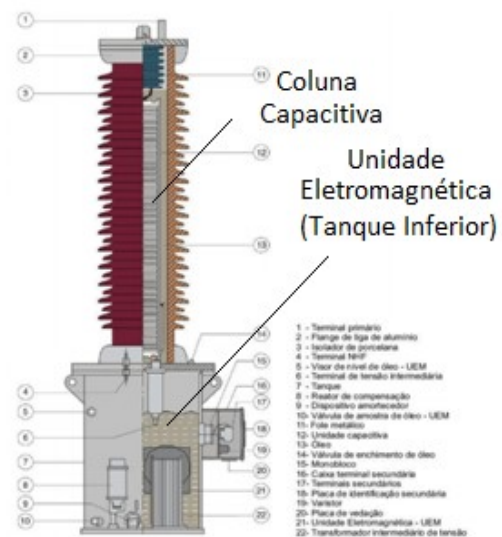


FIGURA 7 – Partes Principais de um Transformador de Potencial Capacitivo

Os experimentos laboratoriais com o método UHF indicaram boa sensibilidade, por ser um ambiente com ruído controlado. As Figuras de 8 a 11 apresentam a sensibilidade das metodologias acústica, UHF e com o HFCT através de uma simulação de descarga parcial no interior de um transformador de distribuição com isolamento papel óleo e a comparação com o método acústico em laboratório.

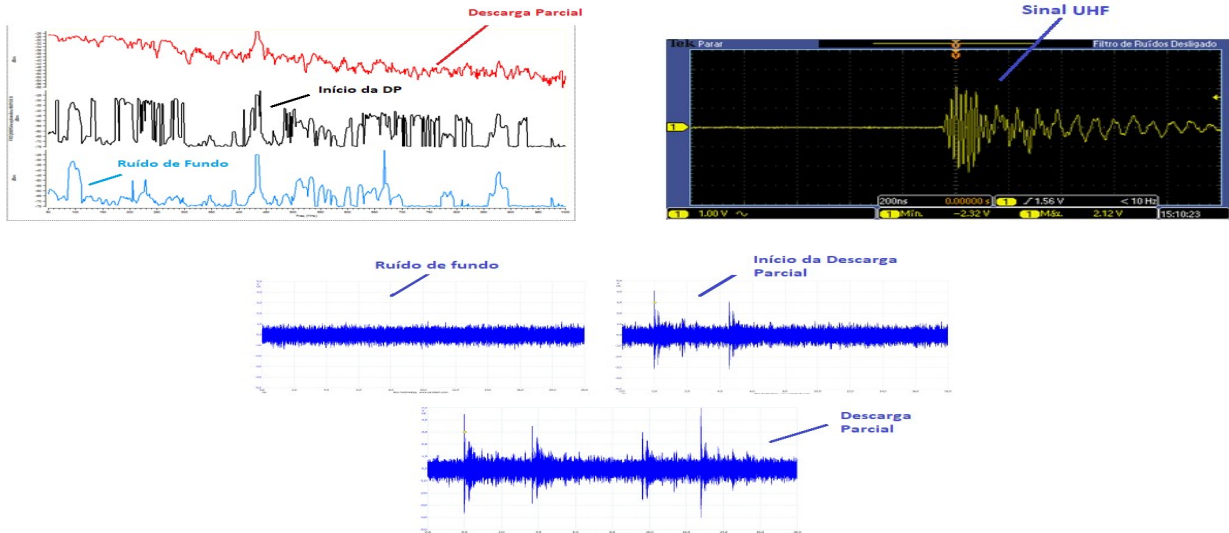


Figura 8 – Sinais UHF no domínio da frequência e no domínio do tempo correlacionados à sinais acústicos no domínio do tempo para verificação de sensibilidade dos sensores à DPs. Análise Laboratorial.

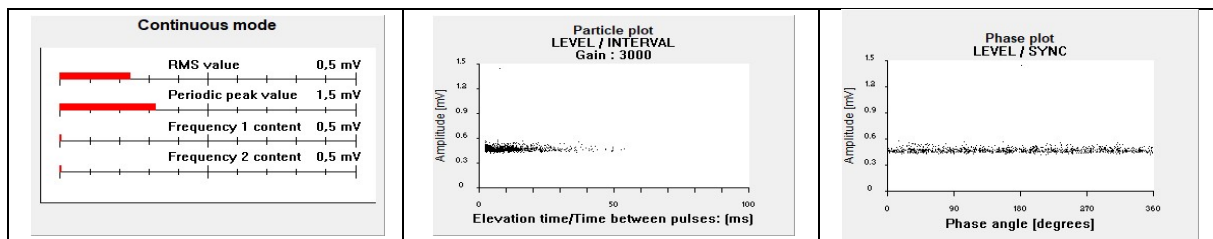


Figura 9 - Ruído de Fundo pelo método acústico. Gráficos em modo contínuo, de pulso e de fase

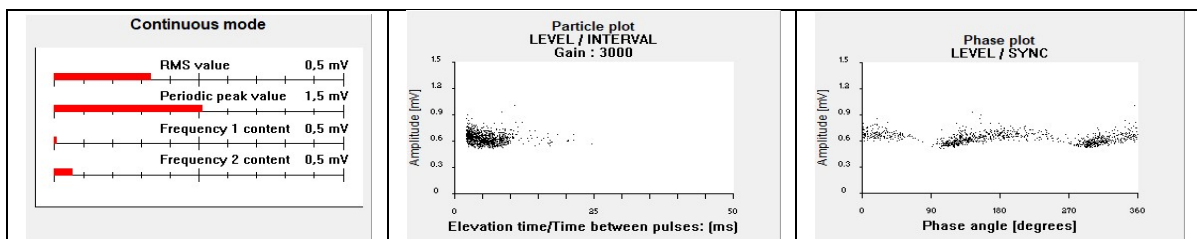


Figura 10 - Incipiência da DP pelo método acústico. Alteração do padrão de ruído de fundo

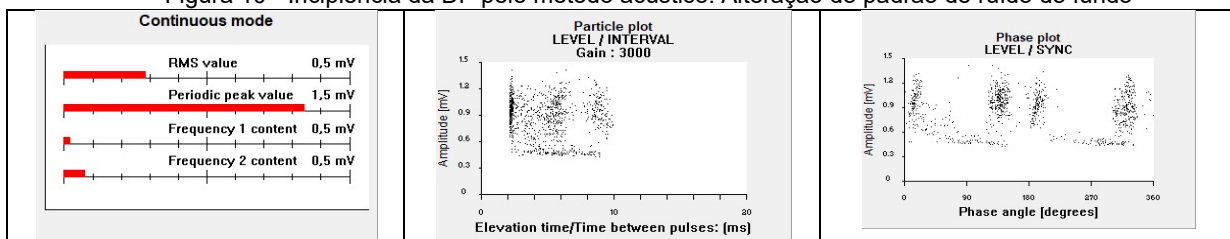


Figura 11 – Atividades de DP pelo método acústico. Análise laboratorial

3.2 Estatística dos Ensaios de Campo

As medições de campo ocorreram em sua maior parte nas subestações de empresas de Transmissão e foram divididas em duas grandes regionais: Regional do Pará e Maranhão, e posteriormente na Regional do Tocantins. Dentre os equipamentos avaliados pelas metodologias preditivas no projeto, a Tabela 1 apresenta uma síntese do levantamento de ativos avaliados por regional.

Tabela 1 - Estatística Global de Equipamentos Avaliados no Campo no Projeto Institucional

Etapa 1 - Regional do Pará e Maranhão		Etapa 2 - Regional do Tocantins	
Equipamento	Quantitativo	Equipamento	Quantitativo
TPC	45	TPC	35
TPI	2	TPI	-
TC	48	TC	60
PR	17	PR	12
Total	112	Total	107
Total Geral de Ativos Avaliados no Projeto		219	

4.0 - INSPEÇÕES E CONCLUSÕES SOBRE OS MÉTODOS PREDITIVOS DE MEDIÇÃO DE DP NO CAMPO

Ao longo do projeto dois equipamentos foram retirados pelas técnicas preditivas, sendo os dois referentes à TPCs de 230 kV, onde uma unidade pertencia à regional do Pará e a outra unidade no Tocantins. Nos dois casos houveram perícias nas suas respectivas regionais onde foram constatadas falhas na unidade eletromagnética, seja por descargas na caixa de ligações, ou por carbonização na isolação da parte ativa do TPC. As Figuras 13 e 14 apresentam as inspeções realizadas comprovando a efetividade das medições de campo, onde as três metodologias apresentaram um indicativo de defeito na unidade eletromagnética de ambos os TPCs.



Figura 13 – Sinais de centelha e descarga na caixa de HF do TPC de 230 kV



Figura 14 – Carbonização encontrada após dissecação da unidade eletromagnética de um TPC de 230 kV

Falhas na coluna capacitiva são mais difíceis de serem detectadas pela metodologia acústica em função do posicionamento do sensor ser no tanque inferior onde geralmente se encontram a parte ativa (núcleo e enrolamentos). Desta forma a atenuação do sinal acústico proveniente de uma descarga é muito grande, pois os flanges entre as colunas capacitivas e entre a coluna capacitiva e o tanque inferior atenuam muito a captação de sinais acústicos. Tal constatação não invalida as técnicas para este tipo de defeito, entretanto observa-se que o método eletromagnético com os HFCTs pode ser mais sensível à atividades de descarga nestes casos.

O método eletromagnético utilizando HFCTs na cordoalha de aterramento dos ativos e o método acústico através do posicionamento de sensores acústicos piezoelétricos as sobre estruturas metálicas quando possível, se apresentaram como boas ferramentas preditivas de diagnóstico para os gestores de manutenção no campo, pois são sensores fáceis de instalar e com modos de aquisição aplicáveis ao campo por serem métodos de medição não invasivos, ou seja, não necessitam do desligamento do ativo. Considerando que o projeto apresentou novas metodologias de diagnóstico aplicáveis no campo e sendo estas plenamente viáveis economicamente em termos de aplicação pelas empresas do setor elétrico, acredita-se que como demonstraram os testes laboratoriais e as

medições de campo deste trabalho, tais metodologias possam ser empregadas de acordo com a sensibilidade de cada sensor empregado e se estabeleçam como ferramenta preditiva de diagnóstico nas empresas.

Ressalta-ser que, como todas as metodologias adotadas no projeto são não invasivas, diante do cenário recente do setor elétrico com restrições operativas à desligamentos decorrentes da parcela variável, tal fato já justifica todo o esforço da pesquisa, logística e mobilização das empresas em prol da adoção de tais ferramentas de apoio à decisão, tão úteis para a gestão de ativos nas empresas do setor, migrando da manutenção preventiva para a manutenção preditiva e baseada na condição.

O Cepel e os autores agradecem a participação da Eletronorte no projeto de pesquisa, por atuar nas etapas laboratoriais, de campo e na realização das inspeções para validação das metodologias de diagnóstico empregadas.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Relatório Técnico Final do Projeto da Carteira PI. Avaliação de Transformadores de Instrumentos e Para-Raios no Campo. Relatório Técnico DLE 13825/18;
- (2) State of the Art of Instrument Transformers. Study Committee A3; October 2009;
- (3) IEC 60270, High Voltage Test Techniques – Partial discharge Measurements; Third edition, 2000;
- (4) Final report of the 2004 – 2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment; Part 4 – Instrument Transformers; Working Group A3.06; Cigré, October, 2012;
- (5) Partial Discharge Measurements; Uwe Riechert; SC D1; September 2015;
- (6) Instrument Transformers, Application Guide; ABB Instrument Transformers; Sweden, Ludvika, 2015;
- (7) Inspeção RFI em Linha em subestação. Doble Transinor Norway; November 2010.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Leonardo Torres Bispo dos Santos – Nascido no Rio de Janeiro, em 16 de Fevereiro, 1977. Concluiu o Mestrado em Engenharia Elétrica em 2009 na Pontifícia Universidade Católica – PUC - Rio, e graduado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal Fluminense em 2001. Sua experiência profissional inclui a antiga Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro – CERJ, atual ENEL, MPE – Montagens e Projetos Especiais e o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, empresa do Sistema Eletrobrás no qual trabalha desde 2002. Sua principal área de interesse inclui pesquisas e trabalhos relacionados ao Diagnóstico de Equipamentos Elétricos de Potência e a Aplicação de Inteligência Artificial em Sistemas de Apoio à Decisão. Trabalha atualmente no CEPEL como pesquisador da Diretoria de Laboratórios e Pesquisa Experimental no Rio de Janeiro e desenvolve trabalhos relacionados ao diagnóstico de equipamentos elétricos de potência no campo como a Metodologia Acústica na identificação de defeitos em Subestações Isoladas a Gás SF₆, a Análise de Gases Dissolvidos em Óleos Isolantes e a medição de Descargas Parciais em ativos no campo.