



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

UTILIZAÇÃO DAS TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS E TERMOGRAFIA PARA AVALIAÇÃO DE TCS EM OPERAÇÃO - EXPERIÊNCIA DE FURNAS

IVAIR DE MATOS DIAS (*)
ELETROBRAS FURNAS

ALESSANDRO FREIRE NUNES
ELETROBRAS FURNAS

HAMILTON BATISTA DE OLIVEIRA
ELETROBRAS FURNAS

GABRIEL TREVIZANI ALVES
ELETROBRAS FURNAS

RESUMO

O trabalho objetiva apresentar os resultados dos ensaios de detecção de descargas parciais (DP) em Transformador de Corrente (TC) em campo. Os ensaios foram realizados através de técnica não convencional e ensaios complementares de termografia. Posteriormente serão realizadas medições através do método elétrico convencional, via acoplamento capacitivo, em laboratório. A comparação dos resultados, campo e laboratório, significará um importante passo para compreensão e comprovação da técnica não invasiva de detecção de DP através da utilização do *High Frequency Current Transformer* (HFCT). Será destacado a oportunidade futura de dissecar o TC e poder avaliar internamente as possíveis anormalidades, concebendo o enriquecimento da equipe de ensaios, manutenção e engenharia.

PALAVRAS-CHAVE

Descargas parciais, Transformadores de Instrumentos, TC de Alta Frequência, Termografia

1.0 INTRODUÇÃO

Conforme o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2030), no Brasil pós pandemia, a economia e oferta de energia devem crescer em torno de 3% ao ano até 2030, indicando com isso investimentos da ordem de R\$ 365 bilhões na transmissão de energia, geração centralizada e distribuída. Associe a essa perspectiva as regulamentações do setor onde o tempo que o equipamento fica indisponível para o sistema, com intervenções forçadas ou planejadas, pode significar perdas de receita.

A aprimoração e concatenação das técnicas e metodologias de ensaios elétricos nos equipamentos do Sistema Interligado Nacional (SIN) se faz cada vez mais primordial, muito em função do custo financeiro evitado e principalmente pelo envelhecimento e fim de vida útil regulatório dos equipamentos.

O Transformador de Corrente (TC) é o equipamento elétrico que permite aos instrumentos de medição e proteção funcionarem adequadamente sem que seja necessário possuírem correntes nominais de acordo com a corrente de carga do circuito ao qual estão ligados. Na sua forma mais simples eles possuem um primário, geralmente de poucas espiras, e um secundário, no qual a corrente nominal transformada é, na maioria dos casos, igual a 5A.

A detecção, acompanhamento e análise de descargas parciais são aspectos importantes para assegurar o perfeito funcionamento do equipamento e garantir a qualidade do seu isolamento, evitando assim desligamentos intempestivos em função de falha no dielétrico. Um dos meios de avaliar tal degradação é através de ensaios de descargas parciais.

As Descargas Parciais (DP) são eventos de descarga elétrica que não liga completamente os eletrodos de um sistema de isolamento sob alta tensão, conforme Figura 1. Geralmente a DP ocorre nos locais de defeitos, como delaminações, cavidades, articulações ou vazios no sistema de isolamento de componentes de alta tensão, tais como transformadores de Corrente, transformadores de potência e buchas condensivas [1].

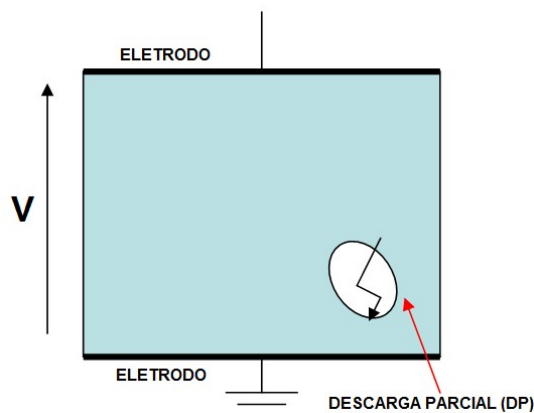


FIGURA 1 – Representação de DP no dielétrico

2.0 METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO UTILIZADAS

Nas atividades em campo foram empregadas 2 técnicas distintas e complementares: Detecção de DP através da utilização de sensor indutivo instalado no cabo de aterramento do TC e a termografia, com foco em aquecimento de origem interna ao equipamento.

Como técnica de comprovação dos resultados obtidos em campo, foi utilizada a medição de DP através do método elétrico convencional em laboratório.

2.1 Detecção de descargas parciais pelo método elétrico não convencional

O ensaio elétrico não convencional, através de sensor indutivo, é baseado no acoplamento dos pulsos de corrente de alta frequência oriundos dos sinais de descargas parciais que podem ser detectados através de um transformador de corrente especial (transdutor), instalado no condutor de aterramento do equipamento sob ensaio. Os ensaios são realizados sem a necessidade de abertura do circuito de medição.

O HFCT (*High Frequency Current Transformer*) consiste de uma bobina com núcleo ferromagnético, tipo janela com núcleo articulado e que apresenta largura de banda com elevados valores de frequência, garantindo assim uma eficiente detecção de sinais de descargas parciais. O HFCT é conectado através de cabo coaxial ao instrumento de processamento (osciloscópio), conforme Figura 2.

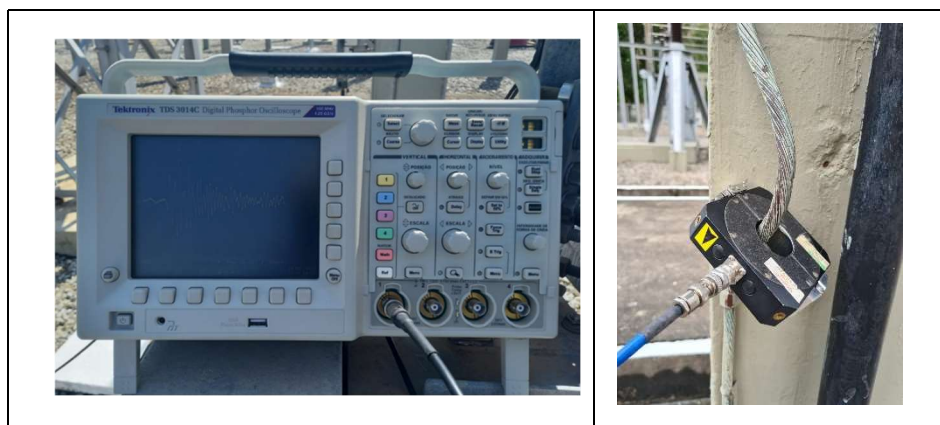


FIGURA 2 – Osciloscópio e TC de alta frequência

Os sinais elétricos de alta frequência, frente de onda lenta e decaimento bastante amortecido e oscilante, são interpretados como oriundos de interferência eletromagnética externa, não indicando a presença de DP no equipamento sob ensaio, conforme Figura 3.

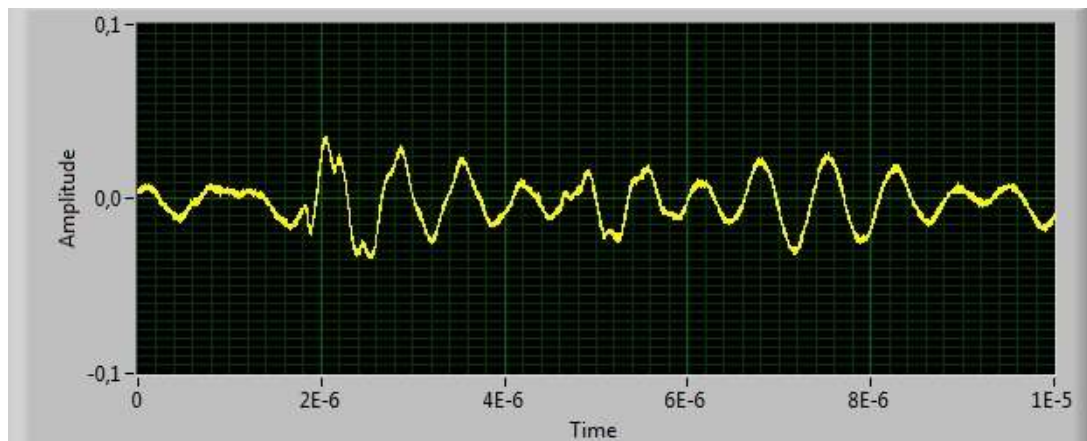


FIGURA 3 - Sinal elétrico característico de ruído

Entretanto, sinais com frente de onda rápida e decaimento quase instantâneo são característicos de DP, sinalizando para equipamentos com possíveis anomalias dielétricas em sua parte ativa, conforme Figura 4.

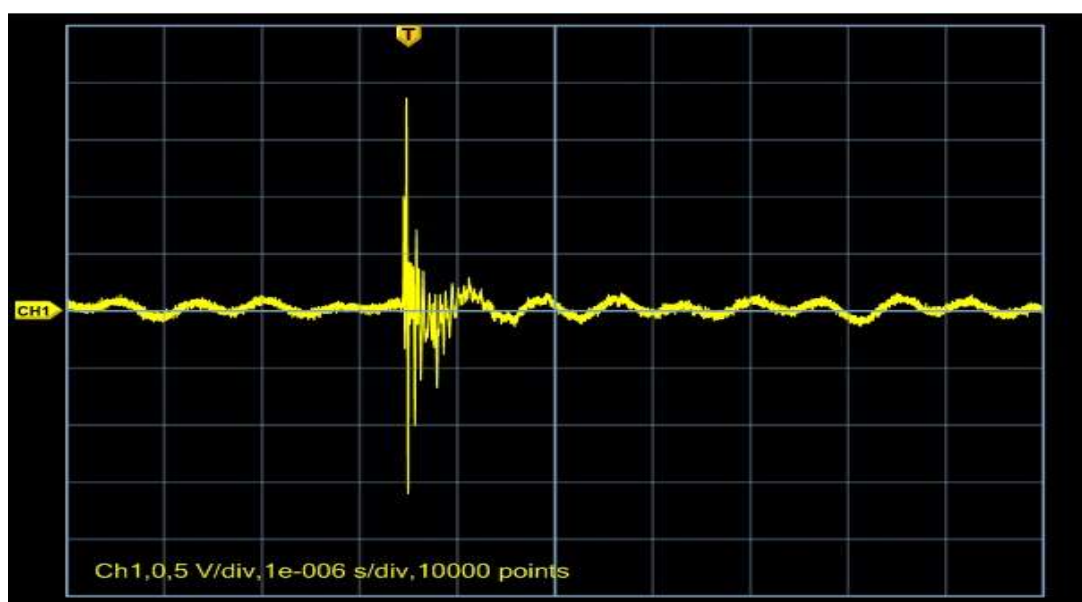


FIGURA 4 - Sinal elétrico característico de DP

Vale salientar que esta técnica não permite quantificar os níveis de DP nos equipamentos sob ensaio, sendo sua principal finalidade a detecção.

A quantificação dos níveis de DP, em pico-coulombs (pC), pode ser realizada através da execução de ensaios específicos em laboratório, seguindo os procedimentos normalizados e com a utilização de acoplamento capacitivo.

2.2 Termografia infravermelha

É uma técnica de inspeção preditiva que possibilita a medição de temperatura e a formação de imagens térmicas (termogramas) de um componente ou equipamento a partir da radiação infravermelha emitida pelos objetos. É uma técnica de inspeção não destrutiva, não afetando as características do alvo a ser medido e que permite a rápida visualização de ponto de anomalia térmica (PAT) que venha a surgir, seja de origem interna ou de visada direta. Em ensaios em transformadores de corrente são realizadas três medições de temperatura ao redor de cada TC, defasadas de 120° entre si, conforme Figura 5.



FIGURA 5 – Vista superior do esquema para inspeção circular em TC

O gradiente de temperatura (ΔT) do equipamento é calculado levando-se em consideração a parte de maior temperatura do corpo do TC em relação ao outro TC de mesma característica e do mesmo vão.

2.3 Medição de Descargas Parciais pelo método elétrico convencional

Esse método baseia-se, conforme o circuito da Figura 6 e de acordo com a norma IEC 60270, na detecção de uma queda de tensão sobre uma impedância conhecida Z , em decorrência de pulsos de corrente. As medições normalmente são realizadas em valores de carga aparente, com valores da ordem de picocoulombs (pC). Para a quantificação faz-se necessária a realização de calibração do circuito.

O circuito é formado, basicamente, pela fonte de tensão alternada U , a impedância Z para filtragem de ruídos originários da fonte, o objeto sob teste C_a , o capacitor de acoplamento C_k , impedância de medição Z_{mi} e o instrumento de medição IM.

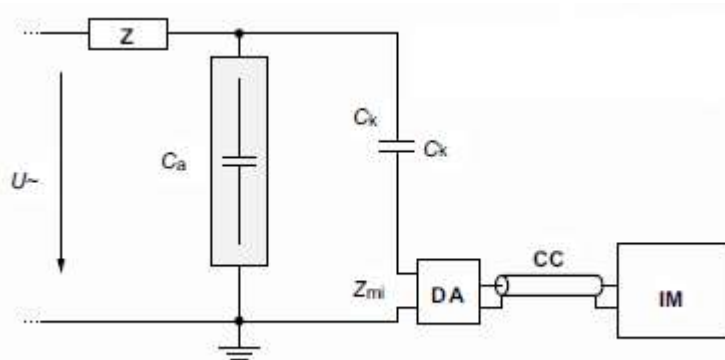


FIGURA 6 - Circuito de medição de DP adaptado IEC 60270

3.0 Estudo de caso

Devido a ocorrências de falhas severas em Transformadores de Corrente nos últimos anos, com explosões e danos a equipamentos adjacentes, FURNAS tem adotado a metodologia de técnicas conjugadas para a avaliação de seus ativos de transmissão em operação, sendo realizados ensaios em campo de detecção de descargas parciais através do método HFCT e utilização da termografia como técnica complementar no processo de detecção de pontos de anomalia térmica (PAT) de origem interna ao equipamento. Transformadores de Corrente que apresentam sinais característicos de DP em campo são ranqueados e através de desligamentos programados serão substituídos, quando possível.

Os equipamentos retirados do sistema são enviados ao laboratório de Alta Tensão de FURNAS para que sejam submetidos a ensaios de medição de descargas parciais, através do método elétrico convencional, visando avaliar o início das atividades, bem como o seu valor medido em pC.

3.1 Ensaio em Campo

No final de 2020, com foco em aumentar a segurança e disponibilidade de operação dos Transformadores de Corrente, dos equipamentos adjacentes e da subestação como um todo, foram executados ensaios de descargas parciais através do método não convencional, utilizando o HFCT e o osciloscópio, em 10 subestações do Rio de Janeiro/RJ.

Mais de 600 TCs foram ensaiados e os resultados foram fundamentais para auxiliar a equipe de engenharia de Furnas no processo de tomada de decisões.

Os ensaios são realizados individualmente em cada um dos TCs, normalmente conectados a linha de transmissão, banco de capacitores, barramentos e etc.

A Figura 7 nos mostra o ensaio em realização em uma das fases do equipamento.



FIGURA 7 - Ensaio de DP pelo método HFCT

Para os equipamentos que não estão energizados, muito em função de restrição operativa ou condição sistêmica, um documento específico é emitido visando energização e posterior ensaio.

Na Figura 8 verifica-se o sinal característico encontrado no TC, objeto desse estudo, em uma das subestações avaliadas.

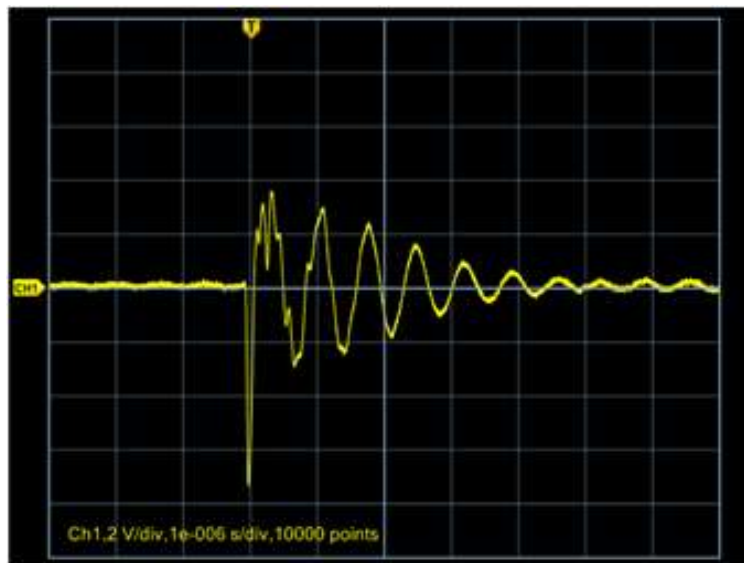


FIGURA 8 - Sinal característico de DP encontrado no TC sob ensaio

Quando sinais característicos de DP são encontrados em uma das fases, outros 2 TCs de alta frequência são utilizados, realizando a medição nas 3 fases do equipamento e utilizando 3 canais de entrada no osciloscópio.

Nesse momento a análise do tempo de chegada e amplitude do sinal se tornam fundamentais para a análise e descarte de possíveis reflexos do sinal de uma fase na outra.

A etapa complementar da atividade é a inspeção dos transformadores de corrente através da termografia, com foco principal em anomalias de origem interna. Diferentemente de uma inspeção em visada direta, como por exemplo em conexões externas, terminações e emendas, onde elevadas temperaturas podem ser detectadas, os defeitos de origem interna geralmente apresentam pequenas diferenças de temperatura que podem indicar graves problemas no equipamento, conforme Figura 9 do TC inspecionado outrora e com sinal de DP.

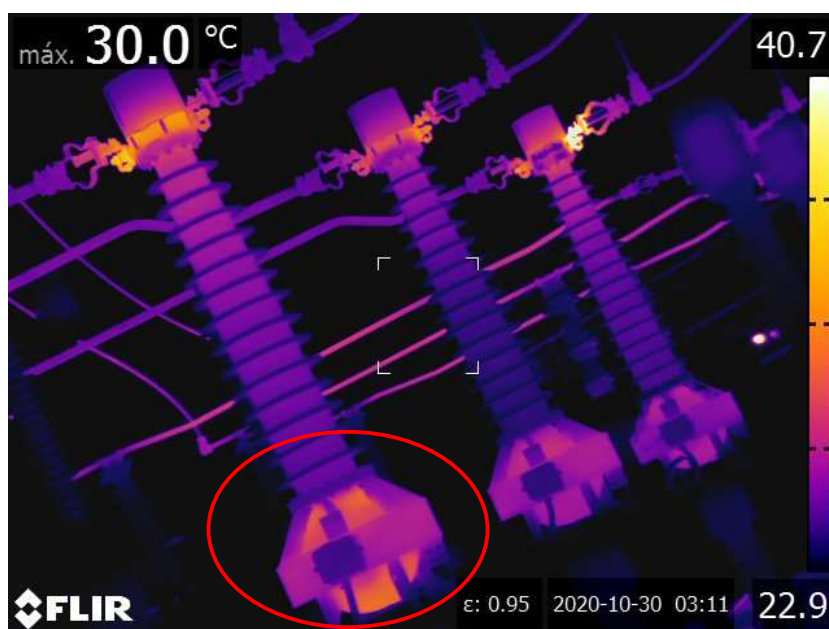


FIGURA 9 – Termograma do TC com DP e temperatura elevada na parte ativa

Após os ensaios de DP e termografia acusarem presença de anomalia no TC, o equipamento foi retirado do sistema e enviado ao laboratório para novos ensaios visando complementar as técnicas utilizada em campo e quantificar os

níveis de DP. Em função da idade dos TCs e do seu final de vida útil, decidiu-se pela troca das 3 fases. A Figura 10 mostra o ensaio termográfico após a substituição.



FIGURA 10 - Termograma dos 3 novos TCs instalados

3.2 Ensaio em Laboratório

Após a retirada do equipamento e envio para o laboratório de Alta Tensão de Furnas, localizado em São José da Barra/MG, o TC ficou na posição vertical por 7 dias, visando acomodação do conjunto óleo isolante e parte ativa. O circuito de ensaio, conforme Figura 11, foi montado de acordo com a norma IEC 60270 para medição de descargas parciais pelo método elétrico convencional.

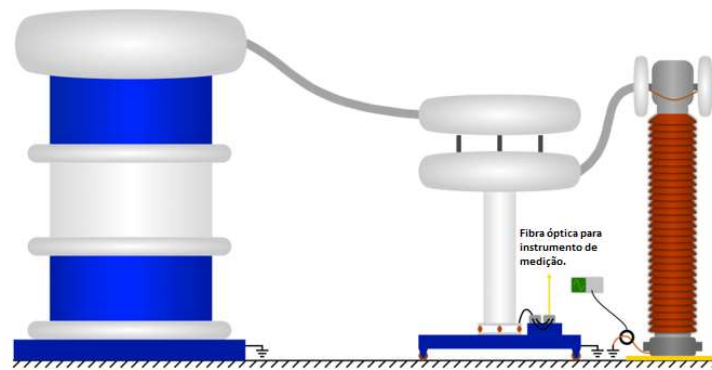


FIGURA 11 - Circuito do ensaio de DP no TC retirado do SIN

A medição de DP, para verificar a qualidade do isolamento, é realizada após o ensaio de tensão suportável à frequência industrial. A tensão aplicada foi elevada a 80% da tensão de ensaio especificada ($275\text{kV} \times 0,8 = 220\text{kV}$), conforme Tabela 1, permanecendo nessa condição por 1 minuto.

TABELA 1 – Nível de isolamento para o TC de 145kV_adaptação ABNT NBR 6856

Tensão máxima do equipamento U_m (kV)	Tensão suportável nominal à frequência industrial durante 1 min (kV)
145	230
	275

Após este tempo, a tensão foi reduzida gradativamente até atingir a tensão para medição de DP ($1,2 \cdot 145 = 174$ kV). A tensão para medição bem como o valor limite admissível de descargas parciais estão definidos na Tabela 2.

TABELA 2 – Tensões para ensaio e valor limite admissível de DP para TC com isolamento líquido _ adaptação ABNT NBR 6856

Tipo de aterramento do sistema	Tensão de DP (eficaz) kV	Valor admissível de DP pC	
		Isolamento imerso em líquido	Isolamento sólido
Sistema com neutro aterrado (fator de falta à terra $\leq 1,4$)	U_m $1,2 U_m / \sqrt{3}$	10 5	50 20
Sistema isolado ou com neutro não efetivamente aterrado (fator de falta à terra $> 1,4$)	$1,2 U_m$ $1,2 U_m / \sqrt{3}$	10 5	50 20

NOTA 1 Se o tipo de aterramento não for definido, convém que sejam utilizados valores de sistema isolado ou não aterrados

NOTA 2 O nível de DP permissível é também válido para frequências diferentes da nominal.

O resultado do ensaio apresentou nível de DP acima do estabelecido pela norma, com amplitude de 55 pC, conforme Figura 12.

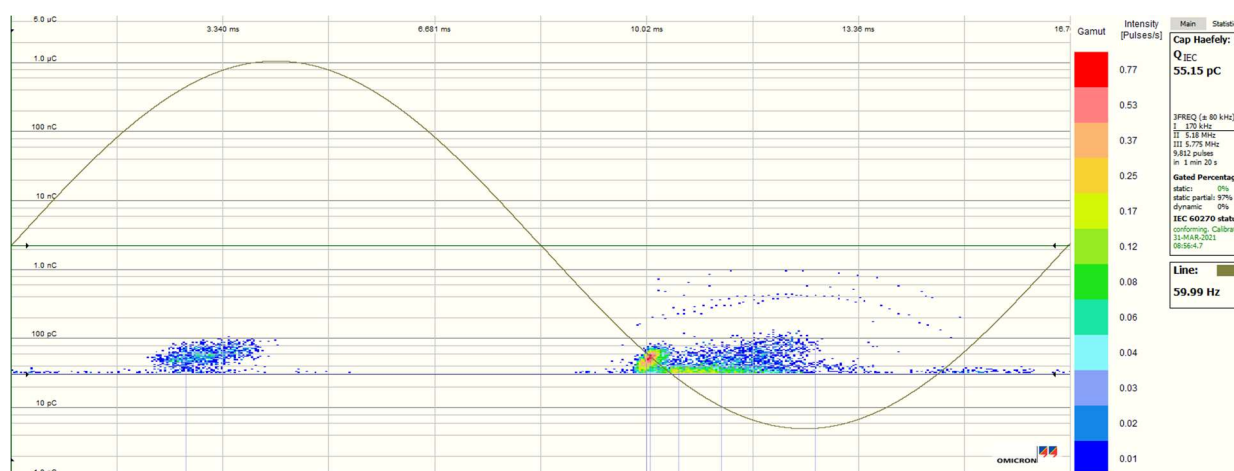


FIGURA 12 - Medição do sinal de DP no TC retirado do SIN

4.0 CONCLUSÕES

A medição de descargas parciais através do método não convencional, com utilização do TC de alta frequência e osciloscópio, juntamente com a termografia infravermelha são técnicas não invasivas e que se adequam ao cenário de restrições à desligamentos em função de parcela variável e até mesmo, por recomendações do ONS, a readequação dos períodos programados de manutenção devido à crise hídrica nacional em 2021.

A detecção de DP em campo através do HFCT se mostrou efetiva quando confrontada com a medição convencional em laboratório com ambiente controlado e com quantificação dos valores das descargas parciais. Para os ensaios em campo, a detecção e análise dos sinais requer grande experiência do profissional envolvido para diferenciar o que é um sinal característico de DP, ruído e reflexos de sinal de uma fase na outra. Para amenizar tal dificuldade e

auxiliar os profissionais de ensaios, Furnas está em processo de aquisição de software dedicado para análise e qualificação, através de SVM e árvore de decisão, dos sinais encontrados nos ensaios.

Os ensaios no laboratório foram uma ferramenta importante para quantificar e solidificar os resultados encontrados em campo. Outros transformadores de corrente foram retirados do sistema e após os ensaios em laboratório foi possível ratificar os resultados dos ensaios de campo.

A termografia, em função principalmente da pequena variação de temperatura entre os equipamentos, requer um período maior de testes e ensaios para chegar a resultados mais conclusivos. O TC retirado apresentou discrepância de temperatura em sua parte ativa localizada no tanque inferior, modelo Hair-Pin, e será dissecado futuramente para melhor entender a anormalidade e verificar se as descargas parciais detectadas e medidas estão associadas ao ligeiro aquecimento apresentado na sua parte ativa, conforme visto na termografia.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Illias, H.; Yuan, T.S.; Bakar A.H.A.; Mokhlis, H.; 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)
- (2) Azevedo, C.H.B.; Marques, A.P.; Ribeiro, C.J.; XX SNPTEE (Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica) - Requisitos e procedimentos para a melhoria na detecção descargas parciais pelo método de emissão acústica
- (3) Azevedo, C.H.B.; Metodologia para a eficácia da detecção de descargas parciais por emissão acústica como técnica preditiva de manutenção em transformadores de potência imersos em óleo isolante (Programa de pós-graduação Universidade Federal de Goiás - 2009)
- (4) Filho, G.L.; Carneiro, J.C.; XVII SENDI 2008 (Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica)
- (5) Santos, L.T.B.; Delgado, R.S.; Santos, L.E.D.; Júnior, H.P.A.; XXV SNPTEE (Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica) – Medição de Descargas Parciais em Transformadores de Instrumentos e Para Raios no Campo: Ferramentas Preditivas de Diagnóstico para uma possível gestão de ativos.
- (6) Nobrega, L.A.M.M.; Parametrização de HFCT para Medição de Descargas Parciais em Para-raios de ZnO (Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Campina Grande - 2016)
- (7) Nascimento, D.A.; Estudo da Utilização de Acoplamento Indutivo em Ensaios de Descargas Parciais em Transformadores para Instrumentos. (Trabalho de conclusão de Curso na Universidade do Oeste de Santa Catarina - 2015)
- (8) Dias, I.M.; Nunes, A.F.; Oliveira, H.B.; IX WORKSPOT (Workshop Internacional sobre Transformadores de Potência, Equipamentos de Transmissão e Distribuição, Subestações, Materiais e Tecnologias Emergentes)
- (9) ABNT NBR-IEC 60270:2015 - Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão - Medição de descargas parciais
- (10) ABNT NBR-6856:2015 – Transformador de Corrente – Especificação e ensaios.
- (11) Filho, J.M; Manual de Equipamentos Elétricos; Terceira Edição; 2005

DADOS BIOGRÁFICOS



IVAIR DE MATOS DIAS - Engenheiro Eletricista formado pela Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG (2006). Ingressou em Furnas no ano de 2000, atuando como Operador de Usina Hidroelétrica. No ano de 2010 foi transferido para o Departamento de Ensaios e Suporte à Manutenção (DES.O), atuando na área de metrologia até o ano de 2016 e posteriormente passando a atuar na execução/análise de ensaios especiais em equipamentos de transmissão. Dentre estes destaca-se a aplicação da técnica de Medição de Descargas Parciais e Emissão Acústica na identificação/avaliação de falhas incipientes em Transformadores de Potência, Transformadores para Instrumentos, Reatores e Subestações Blindadas (GIS).



Hamilton Batista de Oliveira - Engenheiro Eletricista formado pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC/MG (2002), possui pós graduação em Manutenção de Sistemas Elétricos pela Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI (2011) e MBA em Gestão Empresarial pela Fundação Getúlio Vargas - FGV (2020). Trabalhou na TOSHIBA DO BRASIL S/A, na área de ensaios elétricos em transformadores e reatores (1995 a 2004). Desde 2004 trabalha em FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS, onde atuou como engenheiro especialista na área de ensaios elétricos em equipamentos de transmissão (2004 a 2013). Atualmente gerencia a Divisão de Ensaio e Apoio à Manutenção em FURNAS.



ALESSANDRO FREIRE NUNES. Engenheiro Eletricista formado pelo Centro Universitário Claretiano - CEUCLAR (2018), pós graduado em Sistemas de Potência pela Universidade Educa Mais - UNIMAIS (2021). Ingressou em Furnas Centrais Elétricas no ano de 2000, atuando como operador de sistemas elétricos. No ano de 2011 foi transferido para Departamento de Ensaio e Suporte à Manutenção (DES.O), atuando de forma direta na execução/análise de ensaios especiais em equipamentos de transmissão. Dentre estes destaca-se a aplicação da técnica de Medição de Descargas Parciais e Emissão Acústica na identificação/avaliação de falhas incipientes em Transformadores de Potência e Reatores e Subestações Blindadas (GIS).



GABRIEL TREVIZANI ALVES. Graduado em Eletrônica e Eletrotécnica. Ingressou em Furnas no ano de 2010 no Departamento de Ensaio e Suporte à Manutenção (DES.O). Atua de forma direta na execução/análise de ensaios especiais em equipamentos de transmissão, entre eles destaca-se a aplicação da técnica de Medição de Descargas Parciais e Emissão Acústica na identificação/avaliação de falhas incipientes em Transformadores de Potência e Reatores e Subestações Blindadas(GIS).