



**GRUPO - VIII**

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

**ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA PARA DIAGNÓSTICO DE FALHA EM**  
**TRANSFORMADOR DE CORRENTE**

**Nelson Veloso Vieira**  
**COPEL GERAÇÃO E TRANSMISSÃO S.A**

**RESUMO**

Este trabalho analisa o comportamento do sistema isolante papel/óleo de um transformador de corrente, através da técnica da espectrometria dielétrica no domínio da frequência, submetido a uma simulação de trilhamento elétrico superficial em seu tubo capacitivo, por meio da inserção de alguns curto-circuitos intencionais entre suas camadas isolantes. Com a análise dos dados, foi possível identificar alterações significativas nos espectros do fator de dissipação, capacitâncias reais e imaginárias, evidenciando a aplicabilidade da técnica na detecção de falhas envolvendo degradação por trilhamento superficial severa no isolamento sólido.

**PALAVRAS-CHAVE**

Transformador de corrente, Espectrometria dielétrica, Capacitâncias Complexas, Trilhamento superficial, Isolantes

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A maioria dos equipamentos elétricos é normalmente recebida pelos compradores somente com avaliação dos ensaios de aceitação, desconsiderando-se quase completamente quaisquer aspectos de envelhecimento. Todavia, na ocorrência de uma falha, após um curto período de tempo de operação, normalmente o diagnóstico consistirá em debitar as causas às sobretensões imprevistas ou algo pontual. Estudos baseados nas características da rede elétrica podem ser realizados, porém raramente são obtidas respostas válidas para a origem da falha. Contudo, somente após várias falhas e com o passar do tempo, ou seja, transcorrido o prazo de garantia, a degradação do meio isolante começa a ser considerado. Todavia, técnicas já consagradas em transformadores de potência, como a análise dos gases dissolvidos no óleo isolante, têm sua aplicação limitada ao baixo volume de óleo utilizado em um transformador de corrente (TC). Mediante esta característica, técnicas de investigação do estado dos equipamentos não invasivas, como por exemplo, a espectrometria no domínio da frequência e no domínio tempo, vêm se destacando, à determinação da real condição de operação destes equipamentos.

**2.0 - DESENVOLVIMENTO**

O desenvolvimento deste trabalho, compreendeu as seguintes etapas:

- Etapa 1 – Desmonte parcial e inspeção interna do TC para determinação das características construtivas adotadas;
- Etapa 2 – Ensaio para caracterização inicial do TC;
- Etapa 3 – Processo de inserção da falha sugerida;
- Etapa 4 – Preparativos e execução dos ensaios de verificação da condição inicial e pós-intervenções;
- Etapa 5 – Caracterização do teor de água dissolvida no OMI;
- Etapa 6 – Análise dos resultados.

Visando a qualidade da execução e resultados dos ensaios foi necessário adotar ações e medidas de controle de algumas variáveis que poderiam influenciar os resultados deste trabalho, sendo estas:

- Remoção das impurezas presentes no TC, principalmente na porcelana (poeira, resíduo de óleo e demais contaminantes), através de limpeza externa com pano umedecido em água e posterior limpeza com álcool isopropílico antes da execução dos ensaios elétricos;
- Controle da temperatura em 20°C e umidade relativa do ambiente inferior a 50%, através de condicionadores de ar e desumidificador;
- Remoção mecânica, com auxílio de escova de aço, dos pontos de oxidação presentes nos terminais primários e secundários para garantir um melhor contato elétrico entre os terminais e os conectores do instrumento de ensaio;
- Acondicionamento do OMI, reservatório estanque, garantindo o mínimo de contaminação com umidade;
- Enchimento pela válvula de esgotamento, situada na parte inferior do TC minimizando a formação de bolhas;
- Repouso de duas horas do OMI após o processo de remontagem do TC, antes dos ensaios elétricos, a fim de garantir uma boa impregnação entre o sistema papel/óleo isolante.

### 2.1 Etapa 1 - Desmonte parcial e inspeção interna do TC para determinação das características construtivas adotadas

Para um melhor entendimento do comportamento do isolante dielétrico do TC foi realizado um desmonte parcial para explorar suas características internas e assim definir a melhor técnica para a inserção das falhas sugeridas neste trabalho. Este processo consistiu na retirada do OMI e, posteriormente, de conectores, reservatório de expansão, bucha de porcelana, tanque e demais componentes.

### 2.2 Etapa 2 – Ensaio para caracterização inicial do TC

Ensaio executado após conclusão do processo de inspeção interna do TC, com o intuito de se obter um espectro inicial do dielétrico do mesmo. A configuração dos ensaios foi elaborada com o intuito de obter as capacitancias entre os terminais de alta tensão e a massa conforme FIGURA 1.

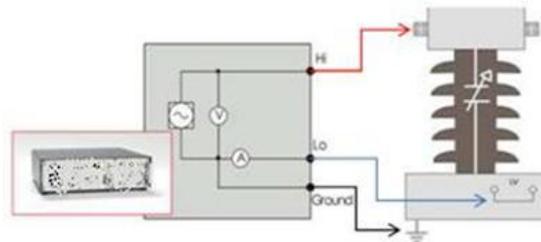


FIGURA 1 - Configuração adotada para a execução do ensaio

### 2.3 Etapa 3 - Processo de inserção da falha sugerida

Após análise do sistema de dielétrico, optou-se em inserir curtos-circuitos intencionais entre algumas camadas semicondutoras, com o intuito de criar um defeito no sistema isolante do TC e assim simular uma degradação progressiva do meio isolante. A forma de distribuição e localização pode ser identificada na Figura 2.



FIGURA 2 - Detalhe das espiras para futura conexão dos curtos

Concluída esta etapa, o passo seguinte foi a inserção de um condutor de cobre com seção de  $0,3\text{mm}^2$  entre os pontos de teste para simular o trilhamento elétrico superficial através de um curto-circuito. Inicialmente este curto-circuito foi inserido entre os pontos P1 e P2, sendo este procedimento denominado como P12. Posteriormente, com a evolução dos estudos foi acrescentado um curto-circuito entre os pontos P1, P2 e P3 – aqui identificado como P13 – e posteriormente entre os pontos P1, P2, P3 e P4 – denominado P14. Ressalta-se que os curtos-circuitos são acumulativos, ou seja, são inseridos em sequência com o intuito de aumentar a região sobre influência destes. A Figura 3 ilustra o procedimento.

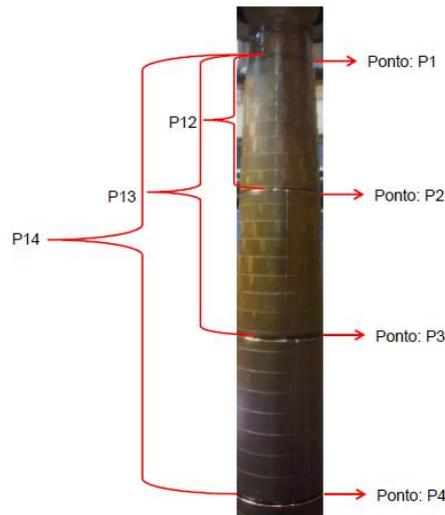


FIGURA 3 - Pontos de curtos-circuitos P12, P13 e P14

#### 2.4 Etapa 4 - Preparativos e execução dos ensaios de verificação da condição inicial e pós-intervenções

Inicialmente, foi realizado um curto-circuito nos terminais dos enrolamentos secundários do TC, conforme Figura 4, para uniformizar as capacitâncias e evitar o surgimento de tensões elevadas. Salienta-se que este processo também foi executado nos terminais de alta tensão (P1 e P2).



FIGURA 4 - Curto-circuito dos terminais secundários do TC

Ao total foram executados oito ensaios no TC, divididos em 2 grupos de 4 ensaios:

- 1º Grupo – Ensaios de caracterização dos resultados das falhas;
- 2º Grupo – Ensaios de averiguação da repetitividade dos resultados com a retirada dos curtos-circuitos internos do TC.

Os ensaios realizados para caracterização dos resultados das falhas foram:

- P0 – Executado após conclusão da etapa de inspeção interna do TC e antes da inserção das espiras condutoras;
- P12 – Ensaio executado após a conclusão do processo de inserção do curto-circuito denominado P12;
- P13 – Ensaio executado após a conclusão do processo de inserção do curto-circuito denominado P13;
- P14 – Ensaio executado após a conclusão do processo de inserção do curto-circuito denominado P14.

Os ensaios de averiguação da repetibilidade dos resultados foram:

- P'14 – Executado após o intervalo de aproximadamente 120 horas de repouso após a conclusão do ensaio elétrico da etapa P14;
- P'13 – Ensaio executado após a conclusão do processo de retirada do curto-circuito denominado P14;
- P'12 – Ensaio executado após a conclusão do processo de retirada do curto-circuito denominado P13;
- P'0 – Ensaio executado após a conclusão do processo de retirada do curto-circuito denominado P12.

Ressalta-se que todos os ensaios, exceto P'14, foram executados com intervalo de duas horas de repouso após enchimento com óleo e conclusão da remontagem do TC.

## 2.5 Etapa 5 - Caracterização do teor de água dissolvida no óleo mineral isolante (OMI)

Após a conclusão de cada processo e remontagem foi realizada uma amostragem do OMI para a caracterização do teor de água dissolvida no mesmo. Este procedimento seguiu as recomendações da NBR 8840:2013. A Figura 5 demonstra exemplo dos frascos utilizados para a coleta das amostras de óleo mineral.



FIGURA 5 - Amostra de frascos utilizados para coleta de óleo

## 2.6 Etapa 6 - Análise dos resultados

O TC, objeto deste estudo, foi submetido a ensaios de espectrometria no domínio da frequência na faixa de 1 mHz a 1 kHz, a fim de analisar seu comportamento frente a simulações de trilhamento elétrico na superfície do seu tubo capacitivo, responsável pelo confinamento do campo elétrico do TC.

Inicialmente, foi realizado o ensaio, aqui denominado de P0, para caracterização da espectrometria para posterior comparação com os demais espectros, devido à inexistência de histórico do TC. Os gráficos das Figuras 6, 7 e 8 representam os espectros das medições do fator de dissipação ( $\tan\delta$ ), capacitância real e capacitância imaginária, respectivamente.

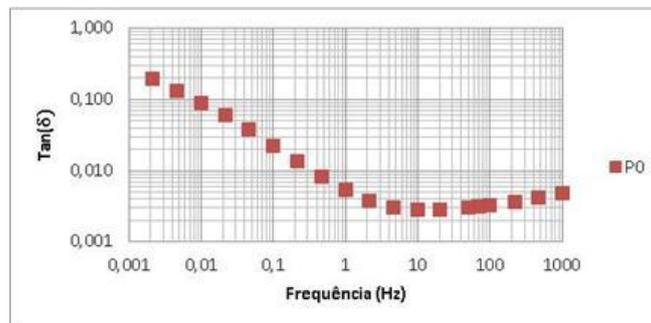


FIGURA 6 - Espectro do fator de dissipação, obtido no ensaio de caracterização (P0)

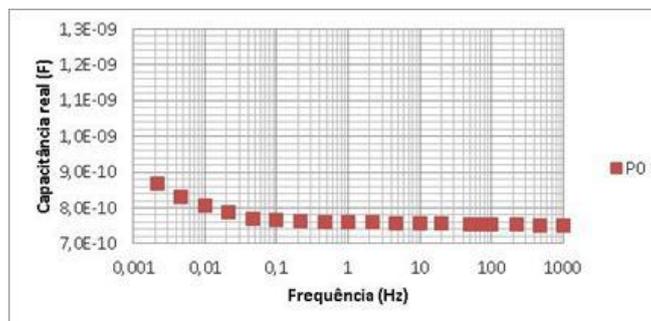


FIGURA 7 - Espectro da capacitância real, obtido no ensaio de caracterização (P0)

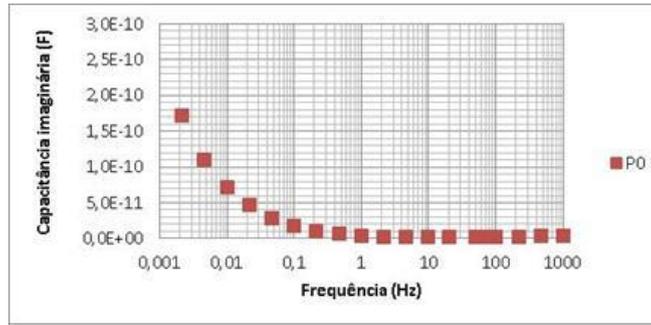


FIGURA 8 - Espectro da capacitância imaginária, obtido no ensaio de caracterização (P0)

Após a caracterização inicial, realizaram-se os ensaios respectivos a cada processo de inserção dos curtos-circuitos entre as camadas do tubo capacitivo, para verificação do comportamento do dielétrico frente a este novo cenário. Os resultados foram agrupados em gráficos contendo os espectros do fator de dissipação, capacitância real e imaginária, conforme as Figuras 9, 10 e 11 respectivamente.

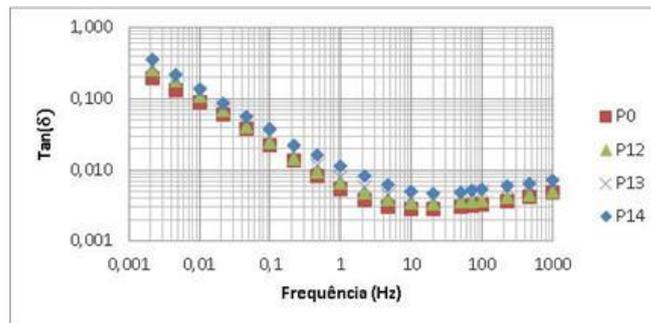


FIGURA 9 - Espectros do fator de dissipação após a inserção das falhas

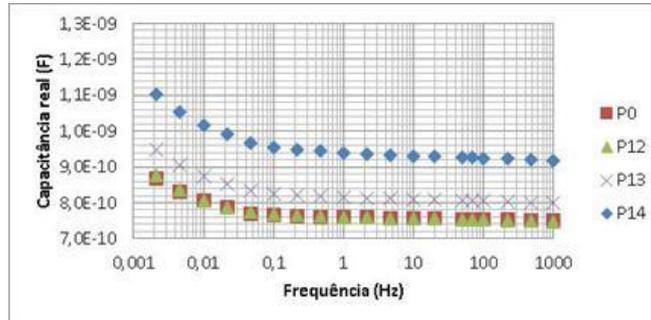


FIGURA 10 - Espectros das capacitâncias reais após a inserção das falhas

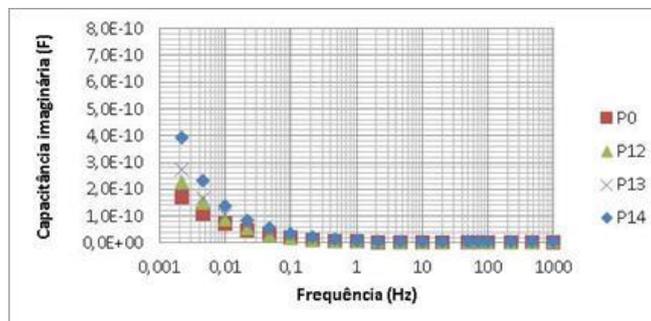


FIGURA 11 - Espectros das capacitâncias imaginárias após a inserção das falhas

Analisando o gráfico da Figura 10, que apresenta os espectros das capacitâncias reais obtidas nos ensaios, nota-se que este incremento é praticamente proporcional em todas frequências de ensaio. Este aumento é resultado da

alteração da capacitância geométrica do sistema isolante devido ao curto-circuito entre as camadas capacitivas do dielétrico, que de uma forma simplificada pode ser caracterizada por uma associação de capacitores em série, conforme esquema da Figura 12, onde ao se introduzir um curto entre as camadas, a capacitância equivalente resultante tende a aumentar.

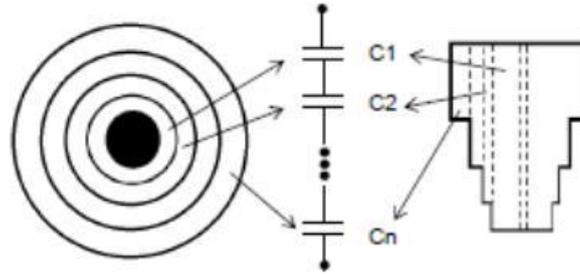


FIGURA 12 - Modelo simplificado dielétrico sistema condensivo do TC

Analisando o gráfico da Figura 11, observa-se que as capacitâncias imaginárias têm seu valor reduzido com o aumento da frequência. Este comportamento é explicado pela Equação 01 (1), onde em regimes de baixas frequências a condutividade do material tem grande influência no resultado da capacitância complexa. Nota-se que em baixas frequências, conforme ocorre o incremento da região sob influência dos curtos-circuitos, os espectros também seguem esta tendência de elevação devido ao aumento da condutividade superficial do tubo capacitivo ocasionado pela presença do curto-circuito.

$$\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon'(\omega) - j \left\{ \epsilon''(\omega) + \frac{\sigma_0}{\omega} \right\} = \epsilon_0 \left\{ 1 + \chi'(\omega) - j \left[ \chi''(\omega) + \frac{\sigma_0}{\epsilon_0 \omega} \right] \right\} \quad (1)$$

Na Figura 9, que apresenta os espectros dos fatores de dissipação de cada ensaio, nota-se que ocorreu o incremento na amplitude dos espectros das falhas ensaiadas. Ao analisar inicialmente as alterações nas amplitudes, suspeitou-se que havia sido contaminado o dielétrico sólido com água, pois os espectros tiveram incremento nas regiões típicas utilizadas como diagnóstico de umidade no dielétrico, conforme demonstrado na Figura 14. Esta suspeita deu-se após comparação com o modelo típico Figura 13 utilizado para avaliação da condição do dielétrico conforme (2), onde alterações no espectro do fator de dissipação em determinadas regiões indicam um diagnóstico de umidade.

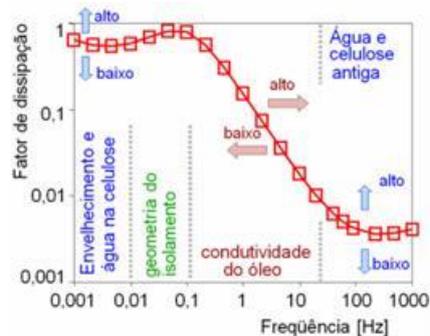


FIGURA 13 - Interpretação para os dados de domínio da frequência com a discriminação entre as influências de vários fenômenos físicos

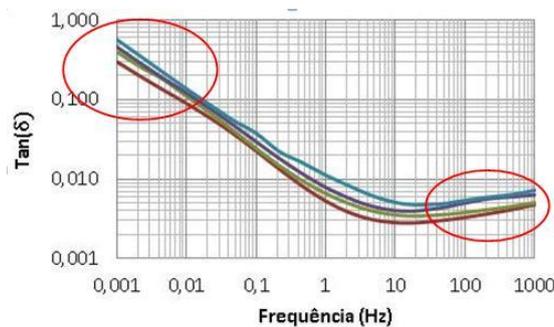


FIGURA 14 - Regiões com alterações nos espectros do fator de dissipação

Os autores (3) trazem em seu trabalho uma análise do comportamento do dielétrico de um TC contaminado com índices de 1%, 2% e 3% de umidade no papel isolante, resultando no gráfico apresentado na FIGURA 38.

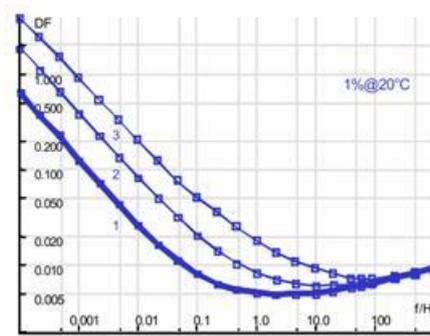


FIGURA 15 - Resposta do dielétrico de um TC, com 1%, 2% e 3% de teor de umidade a 20°C

O gráfico da Figura 14, em comparação aos das Figuras 13 e 15, apresenta características distintas, não sendo conclusivo o diagnóstico de umidade. Ensaios no OMI foram realizados para verificar se houve acréscimo da umidade, porém as amostras apresentaram valores de teor de água estáveis, concluindo-se que os efeitos da umidade não foram significativos neste estudo. O efeito da temperatura também foi cogitado, porém o transformador foi mantido em ambiente com temperatura controlada, descartando esta hipótese.

Optou-se, então, por realizar novos ensaios, retirando os curtos-circuitos gradativamente, para averiguar se as mudanças nos gráficos não foram causadas pela impregnação de umidade no dielétrico e se existe a repetitividade dos resultados

As Figuras 16, 17 e 18, apresentam os gráficos obtidos nestes ensaios. Nota-se que, conforme os curtos-circuitos eram subtraídos, o sistema apresentou comportamento similar aos ensaios de inserção dos curtos, caracterizando que as alterações nas respostas do dielétrico foram causadas pelo processo de curto-circuito.

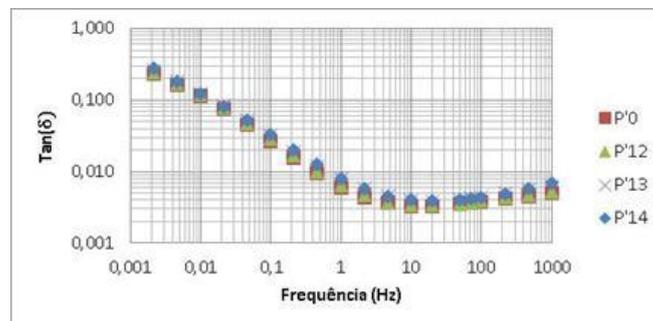


FIGURA 16 - Espectros do fator de dissipação após a retirada das falhas

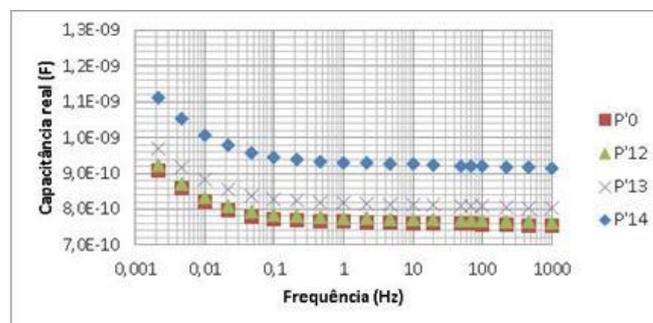


FIGURA 17 - Espectros das capacitâncias reais após a retirada das falhas

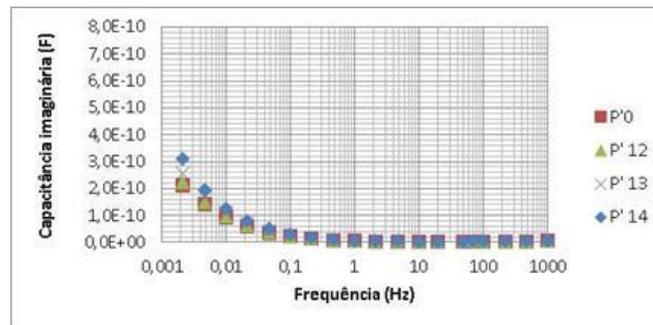


FIGURA 18 - Espectros das capacitâncias imaginárias após a retirada das falhas

Os autores (4), descrevem em seu trabalho que os subprodutos oriundos das descargas parciais são propensos a resultar em zonas de dielétrico do óleo-papel com diferentes propriedades elétricas, visto que os efeitos destas descargas ao longo do tempo geram regiões mais degradadas que as demais e com isto estas áreas apresentam uma condutividade superior às demais, resultando em uma alteração nos parâmetros RC do material e, como consequência, um possível aumento no fator de dissipação.

Através da comparação entre as medições realizadas, observaram-se variações nas amplitudes dos espectros à medida que se aumentou o número de camadas sob influência dos curtos-circuitos. Em resumo, conforme se aumenta o efeito do trilhamento superficial, ocorre o deslocamento na amplitude dos espectros, principalmente no espectro da capacitância real.

### 3.0 - CONCLUSÃO

Com a utilização da técnica da análise do espectro da frequência foi possível observar a resposta do dielétrico do TC frente às variações do efeito da simulação do trilhamento superficial. Observaram-se mudanças nos valores do fator de dissipação, porém a mudança mais significativa foi no espectro da capacitância real.

O espectro da capacitância real apresentou elevada variação conforme a evolução da simulação do trilhamento superficial, de forma proporcional e em toda a extensão do espectro da frequência. O fator de dissipação teve um ligeiro incremento durante a evolução da falha, devido às alterações na condutividade e na geometria do dielétrico. Em resumo, a técnica de análise da espectrometria dielétrica representou uma ferramenta útil na análise da falha sugerida neste trabalho.

### 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) JONSCHER, A. K. Dielectric relaxation in solids. , v. 57, 1999.

(2) KOCH, M.; KRUEGER, M.; GIACCHETTA, L.; PAULINO, M. E. C. Diagnostico em campo para determinação de umidade em transformadores. XIII ERIAC – DÉCIMO TERCER ENCUENTRO REGIONAL IBERO AMERICANO DE CIGRÉ. v. 57, p.1–8, 2009.

(3) RAETZKE, S.; KOCH, M.; KRUEGER, M.; TALIB, A. Condition assessment of instrument transformers using dielectric response analysis. CIGRE session 2012. 2012.

(4) KIIZA, R. C.; NIASAR, M. G.; NIKJOO, R.; WANG, X.; EDIN, H. The Effect of Partial Discharge By-products on the Dielectric Frequency Response of Oil-Paper Insulation Comprising of a Small Cavity. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 22, n. 5, p. 2923–2930, 2015.

## 5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Nelson Veloso Vieira nasceu em Rio Branco do Sul-PR, Brasil em 1983. No ano de 2004 formou-se Técnico em eletrotécnica (FUNDACEN), graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Tuiuti do Paraná (UTP) em 2011, obteve o título de Mestre em Sistemas Energéticos - Convencionais e Alternativos no ano de 2016. Trabalha na Copel Geração e Transmissão S.A. desde 2005, onde atuou nas áreas de treinamento e desenvolvimento, manutenção eletromecânica de subestações e atualmente na Engenharia de Manutenção de Equipamentos de Subestações.