

Energia Elétrica e Sustentabilidade 2

Jaqueline Oliveira Rezende
(Organizadora)



Atena
Editora

Ano 2018

JAQUELINE OLIVEIRA REZENDE

(Organizadora)

Energia Elétrica e Sustentabilidade

2

Atena Editora
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Natália Sandrini

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

| Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG) | |
|---|---|
| E56 | Energia elétrica e sustentabilidade 2 [recurso eletrônico] / Organizadora Jaqueline Oliveira Rezende. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018. – (Energia Elétrica e Sustentabilidade; v. 2) Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-85107-46-8 DOI 10.22533/at.ed.468180110 1. Desenvolvimento energético – Aspectos ambientais. 2. Desenvolvimento sustentável. 3. Energia elétrica. I. Rezende, Jaqueline Oliveira. CDD 338.4 |
| Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422 | |

O conteúdo do livro e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A sustentabilidade pode ser entendida como a capacidade de o ser humano utilizar os recursos naturais para satisfazer as suas necessidades sem comprometer esses recursos para atender as gerações futuras. Nesse contexto, a sustentabilidade está inter-relacionadas em diversos setores, sendo os principais o social, o ambiental e o econômico. Dessa forma, constitui um dos desafios da sociedade moderna o desenvolvimento sustentável que objetiva preservar o meio ambiente durante a realização de outras atividades.

A energia elétrica representa um dos principais pilares para o progresso econômico de uma nação e, conseqüentemente, para o atendimento de inúmeras necessidades da humanidade. Portanto, esse setor também tem se preocupado com a geração, a transmissão, a distribuição de energia elétrica e a construção de novos empreendimentos, como as usinas hidrelétricas, de maneira a preservar o meio ambiente. Logo, a Engenharia Elétrica tem apresentado significativas pesquisas e resultados de ações pautadas na sustentabilidade.

Neste ebook é possível notar que a relação da Engenharia Elétrica e a Sustentabilidade é de preocupação de diversos profissionais envolvidos nesse setor, sendo esses advindos da academia, das concessionárias de energia elétrica e do governo. Dessa forma, são apresentados trabalhos teóricos e resultados práticos de diferentes formas de aplicação da preservação do meio ambiente na engenharia elétrica.

Inicialmente são apresentados artigos que discorrem sobre o desenvolvimento sustentável e a sustentabilidade ambiental, custos ambientais em empreendimentos de geração de energia elétrica, recuperação ambiental, conservação da fauna, políticas administrativas e direcionamento de resíduos eletrônicos.

Em seguida, são descritos estudos sobre formas de geração de energia elétrica renováveis não convencionais, sendo apresentadas a energia eólica e a energia solar fotovoltaica. Essas formas de geração contribuem para o desenvolvimento sustentável, uma vez que geram energia elétrica utilizando recursos naturais não finitos, o vento na geração eólica e o sol na geração fotovoltaica.

Além disso, neste exemplar são expostos artigos que contemplam diversas áreas da engenharia elétrica, como redes smart grids, sistema de proteção, operação remota de usinas hidrelétricas, inteligência computacional aplicada a usina termelétrica, transformadores de potência, linhas de transmissão, tarifa horária, lâmpadas led, prevenção de acidentes em redes de média tensão e eficiência energética.

Jaqueline Oliveira Rezende

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| PROSPECÇÃO DE PARQUES HIDROKINÉTICOS ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PROJETOS NOS RIOS IGUAÇU E PARANÁ | |
| <i>Marcos Aurélio de Araujo</i> | |
| CAPÍTULO 2 | 10 |
| TROCADOR DE CALOR – INOVAÇÃO NO AQUECIMENTO DE ÁGUA, FUNCIONAMENTO, RESULTADOS E COMPARAÇÃO COM TECNOLOGIAS SEMELHANTES | |
| <i>Odair Deters</i> | |
| <i>Paulo Valdocci Pereira</i> | |
| <i>Valério Monteiro</i> | |
| CAPÍTULO 3 | 23 |
| SISTEMA ÓPTICO CWDM COMO PLATAFORMA DE MONITORAÇÃO DE ATIVOS E DE COMUNICAÇÃO DE DADOS PARA REDES SMART GRIDS | |
| <i>João Batista Rosolem</i> | |
| <i>Danilo César Dini</i> | |
| <i>Claudio Antonio Hortêncio</i> | |
| <i>Eduardo Ferreira da Costa</i> | |
| <i>Rivael Strobel Penze</i> | |
| <i>João Paulo Vicentini Fracarolli</i> | |
| <i>Carlos Alexandre Meireles Nascimento</i> | |
| <i>Vítor Faria Coelho</i> | |
| CAPÍTULO 4 | 37 |
| PORTAL OPERACIONAL DE EQUIPAMENTOS ESPECIAIS DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO - UMA FERRAMENTA PARA GESTÃO DA CONFORMIDADE E DA CONTINUIDADE NO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA | |
| <i>Rafael Cassiolato de Freitas</i> | |
| <i>Sadi Roberto Schiavon</i> | |
| CAPÍTULO 5 | 46 |
| MODERNIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO, CONTROLE E SUPERVISÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE SAMUEL | |
| <i>Davi Carvalho Moreira</i> | |
| <i>Daniel Simões Pires</i> | |
| <i>Danilo Gomes Matias</i> | |
| <i>Heleno Fülber</i> | |
| <i>Bruno Merlin</i> | |
| CAPÍTULO 6 | 62 |
| OPERAÇÃO REMOTA DE USINAS PELO CENTRO DE OPERAÇÃO DA GERAÇÃO DA ELETROBRAS ELETRONORTE | |
| <i>Davi Carvalho Moreira</i> | |
| <i>Daniel Simões Pires</i> | |
| <i>Danilo Gomes Matias</i> | |
| <i>Juliano Cortes de Souza</i> | |
| <i>Leonardo Siqueira Rodrigues</i> | |
| <i>Heleno Fülber</i> | |
| <i>Bruno Merlin</i> | |
| CAPÍTULO 7 | 70 |
| ABORDAGEM DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL APLICADA PARA MODELAGEM PREDITIVA DE EMISSÕES DE NOX E CO DE UMA TURBINA A GÁS DE UMA USINA TERMELÉTRICA DE CICLO COMBINADO | |
| <i>Eduardo Massashi Yamao</i> | |
| <i>Juliano Pierezan</i> | |

João Paulo Silva Gonçalves
Marcos Cesar Gritti
Luís Gustavo Tomal Ribas
Flávio Chiesa
Victor Manuel Lopes dos Santos
Marcos de Freitas
André da Silva Orlandi
Leandro dos Santos Coelho

CAPÍTULO 8 82

CONFIRMAÇÃO DA EFICÁCIA DO ENSAIO DE RESPOSTA DO DIELÉTRICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E BUCHAS CAPACITIVAS COMO TÉCNICA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

Hugo Rafael Freitas Negrão
Fernando de Souza Brasil
Bárbara Medeiros Campos
Maria Emília de Lima Tostes
Jorge Augusto Siqueira Tostes
Paulo Roberto Moutinho de Vilhena

CAPÍTULO 9 96

A EXPERIÊNCIA DA ELETRONORTE NA IMPLANTAÇÃO DA ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA PARA DIAGNÓSTICO DE REATORES E TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Vanessa de Cássia Viana Martins Beltrão

CAPÍTULO 10 113

ANÁLISE DE DESEMPENHO DA LINHA DE TRANSMISSÃO 230 KV DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE RONDÔNIA OPERANDO COM CABOS PARA-RAIOS ISOLADOS E ENERGIZADOS EM MÉDIA TENSÃO

José Ezequiel Ramos
Alexandre Piantini
Ary D'Ajuz
Valdemir Aparecido Pires
Paulo Roberto de Oliveira Borges

CAPÍTULO 11 126

ESTUDO DE APLICAÇÃO DO DISPOSITIVO SVC NA LINHA DE TRANSMISSÃO MESQUITA VIANA II

Alcebíades Rangel Bessa
Lucas Frizera Encarnação
Paulo José Mello Menegáz

CAPÍTULO 12 143

IMPLANTAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEA 230KV CIRCUITO DUPLO DA COPEL

Márcio Tonetti
Ilmar da Silva Moreira
João Nelson Hoffmann

CAPÍTULO 13 153

TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO: ESTUDO POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA E ACOPLAMENTO MAGNÉTICO RESSONANTE

Guilherme Hideki Shibukawa
Eric Eduardo Goveia Pandolfo
Ricardo Andreola
Emerson Charles Martins da Silva

CAPÍTULO 14 168

TARIFAS HORÁRIAS PARA SISTEMA DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO O SINAL LOCACIONAL

Marcio Andrey Roselli
André Meister

*Denis Perez Jannuzzi
Robson Kuhn Yatsu
André Veiga Gimenes
Miguel Edgar Morales Udaeta*

CAPÍTULO 15..... 178

AVALIAÇÃO DAS LÂMPADAS LED NO MERCADO BRASILEIRO (ARTIGO APRESENTADO NO XXIV SNPTEE)

*Alessandra da Costa Barbosa Pires de Souza
Maurício Barreto Lisboa
Willians Felipe de Oliveira Rosa*

CAPÍTULO 16..... 185

AVALIAÇÃO DO MÉTODO INDEPENDENTE DE MEDIÇÃO DE PERTURBAÇÕES RADIADAS – ANEXO B DA CISPR 15 (ARTIGO APRESENTADO NO XXIV SNPTEE)

*Alessandra da Costa Barbosa Pires de Souza
Maurício Barreto Lisboa
Willians Felipe de Oliveira Rosa*

CAPÍTULO 17 193

PADRÕES DE QUALIDADE PARA SERVIÇOS DE PINTURA ANTICORROSIVA APLICADOS AO SETOR ELÉTRICO

*Alberto Pires Ordine
Cristina da Costa Amorim
Marcos Martins de Sá
Elber Vidigal Bendinelli*

CAPÍTULO 18..... 209

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO, PRODUTIVIDADE E CUSTOS DE TECNOLOGIAS DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVA PARA ESTRUTURAS ENTERRADAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

*Cristina da Costa Amorim
Alberto Pires Ordine
Marcos Martins de Sá
Wendell Porto de Oliveira*

CAPÍTULO 19 221

ANÁLISE DE QUASE-ACIDENTES, OCORRIDOS NA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE MÉDIA TENSÃO, COMO MEIO EFICAZ E PROATIVO NA PREVENÇÃO DE ACIDENTES

*Cristiano José Gober
Cresencio Silvio Segura Salas*

CAPÍTULO 20 235

PORTAL R3E COMO FERRAMENTA INDUTORA E DISSEMINADORA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

*Clara Ovídio de Medeiros Rodrigues
Marcelo Bezerra de Melo Tinoco
Aldomar Pedrini
Edison Alves Portela Junior
João Queiroz Krause
Marco Aurélio Ribeiro Gonçalves Moreira
Fernando Pinto Dias Perrone*

CAPÍTULO 21..... 246

HIERARQUIA DAS NECESSIDADES E RESILIÊNCIA NO PAGAMENTO DE SERVIÇOS PÚBLICOS UTILIZADOS: UM ESTUDO DE CASO VOLTADO A ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL

*Ana Lúcia Rodrigues da Silva
Fernando Amaral de Almeida Prado Jr.
Carolina Rodrigues de Almeida Prado*

CAPÍTULO 22 258

PROJETO PILOTO PARCELAMENTO PRÓ-ATIVO DE DÉBITOS DE IRREGULARIDADE

Diego Rivera Mendes

Julio Eloi Hofer

Rafael Luís de Avila

CAPÍTULO 23 267

MODELAGEM ESTRATÉGICA PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ANTECIPAÇÃO DO ATENDIMENTO AO CLIENTE PARA A MELHORIA OPERACIONAL E DE SERVIÇOS

Carlos Alberto Fróes Lima

Anderson Diego Machiaveli

Luciano E. A. Peres

Tales Neves Anarelli

SOBRE A ORGANIZADORA 287

CONFIRMAÇÃO DA EFICÁCIA DO ENSAIO DE RESPOSTA DO DIELÉTRICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E BUCHAS CAPACITIVAS COMO TÉCNICA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

Hugo Rafael Freitas Negrão

Universidade Federal do Pará
Belém – PA

Fernando de Souza Brasil

Eletronorte/Faci Wyden
Belém – PA

Bárbara Medeiros Campos

Eletronorte
Belém – PA

Maria Emília de Lima Tostes

Universidade Federal do Pará
Belém – PA

Jorge Augusto Siqueira Tostes

Eletronorte
Belém – PA

Paulo Roberto Moutinho de Vilhena

Eletronorte
Belém – PA

RESUMO: A umidade desempenha um papel crucial no estado do dielétrico de equipamentos de alta tensão, visto que ela pode acelerar o processo de envelhecimento da isolação, por conseguinte comprometendo assim todo o equipamento.

O presente trabalho aborda algumas das principais técnicas utilizadas na Eletronorte, para avaliação da qualidade da celulose e óleo isolante. As considerações teóricas são acompanhadas pela apresentação

de dois estudos de caso em transformador de potência e bucha capacitiva, onde são abordados resultados de ensaios de Resposta do Dielétrico em conjunto a outros ensaios de rotina realizados nesta empresa.

PALAVRAS-CHAVE: Testes e Ensaios, Resposta do Dielétrico, Umidade, Manutenção Preditiva, Subestação.

ABSTRACT: Humidity plays a crucial role in the state of the high voltage dielectric, since it can accelerate the aging process of the insulation, thus compromising all equipment.

The present work addresses some of the main techniques used in Eletronorte in order to evaluate the quality of the cellulose and the insulating oil. Theoretical considerations are presented together with two case studies on potential transformer and capacitive bushing. This paper presents the Dielectric Response test results with other routine tests, which are performed in that company.

KEYWORDS: Tests, Dielectric Response, Humidity, Predictive Maintenance, Substation.

1 | INTRODUÇÃO

Diante das necessidades do sistema elétrico, as atividades de manutenção tendem a migrar da manutenção preventiva para a

manutenção preditiva. Nesse sentido, técnicas como o monitoramento das condições de operação dos equipamentos, seu diagnóstico preditivo e a manutenção centrada na confiabilidade contribuem fortemente na elaboração de programas de manutenção, capazes de melhorar o desempenho e estender a vida útil dos equipamentos assim geridos.

As condições de umidade do isolamento de transformadores e buchas são um fator essencial no que se trata de vida útil e bom funcionamento do equipamento, visto que a mesma ocasiona efeitos nocivos na integridade do dielétrico, principalmente no que tange ao envelhecimento acelerado. Todavia, mensurar a quantidade de umidade presente no isolamento através de amostras de papel do isolamento, não é prático para o ponto de vista do setor elétrico. Logo, os métodos de ensaios de análise de resposta dielétrica que visam medir os efeitos da umidade nas propriedades elétricas do isolamento têm se tornado um grande aliado da manutenção preditiva. Este trabalho discute as técnicas não-invasivas para aferição de umidade no dielétrico de equipamentos de alta tensão mais utilizadas na Eletrobrás Eletronorte: Espectroscopia no Domínio da Frequência e Corrente de Polarização e Despolarização. O artigo aborda dois estudos de caso envolvendo bucha papel impregnando em resina, do inglês *resin impregnated paper* (RIP), além de transformador de potência.

2 | TÉCNICAS DE MEDIÇÃO

Atualmente, os métodos elétricos disponíveis no mercado para avaliação de umidade do dielétrico de equipamentos de subestação podem operar no domínio do tempo ou frequência, é o caso do método de correntes de polarização e despolarização (*Polarization and Depolarization Currents*, PDC) e espectroscopia no domínio da frequência (*Frequency Domain Spectroscopy*, FDS), respectivamente. O método PDC basicamente afere as correntes de polarização e despolarização do dielétrico como função do tempo, enquanto que o método FDS mede capacitância, C , e fator de perdas, $\tan \delta$, como função da frequência (INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS, 2004).

2.1 Correntes de Polarização e Despolarização (PDC)

O diagnóstico no domínio do tempo compreende principalmente o método de correntes de polarização e despolarização. Inicialmente, a memória dielétrica do objeto a ser ensaiado deve ser descarregada, então, aplica-se um degrau de tensão U_0 , este deve ser livre de qualquer ripple ou ruído, no tempo t_0 . Durante o tempo de aplicação de tensão, a corrente $i(t)$ é medida, a qual advém do processo de polarização com diferentes constantes de tempo correspondentes a diferentes materiais isolantes e à condutividade do objeto em teste. A tensão é então removida no instante t_1 e o equipamento é curto-circuitado imediatamente, possibilitando assim a aferição da corrente de despolarização. A Figura 1 representa os fenômenos de correntes de

polarização e despolarização (JOSHI, 2012).

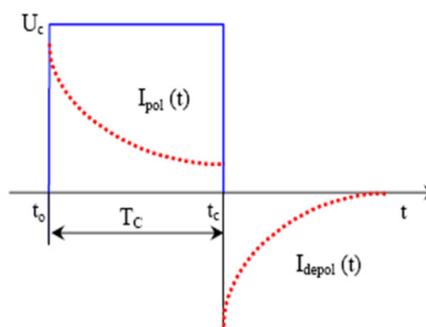


FIGURA 1: Correntes de Polarização e Despolarização (retirado de (JOSHI, 2012).)

O diagnóstico PDC é um método não-destrutivo capaz de fornecer informações confiáveis sobre o estado do dielétrico de equipamentos de alta tensão, tanto sobre o teor de umidade da isolação sólida como as condutividades do óleo e papel. Além disso, fornece um diagnóstico muito rápido e preciso em baixas frequências (JOSHI, 2012).

2.2 Espectroscopia no Domínio da Frequência (FDS)

A espectroscopia no domínio da frequência é um outro método para o estudo do fenômeno de polarização. Trata-se de um teste ac, onde se mede o fator de perdas ($\tan \delta$) e capacitância complexa dos componentes do dielétrico em função da frequência (ACHMAD, 2015). Geralmente, o FDS opera na banda de 1 mHz a 1 kHz, isto é, a medição ocorre em uma faixa de frequências (JOSHI, 2012). Energiza-se o dielétrico com tensão senoidal e mede-se a corrente que passa por ele, a impedância é então calculada:

$$Z^*(\omega) = \frac{U^*(\omega)}{I^*(\omega)} \quad (1)$$

Assumindo que o objeto ensaiado pode ser representado por uma capacitância complexa, têm-se:

$$I^*(\omega) = j\omega C^*(\omega) \cdot U^*(\omega) \quad (2)$$

$$C^*(\omega) = C'(\omega) - jC''(\omega) \quad (3)$$

C' e C'' representam a capacitância complexa, onde a parte real indica a componente capacitiva e a imaginária, as perdas da isolação (WANG, 2010). Pode-se também relacionar capacitância com permissividade complexa ϵ^* :

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega) = \frac{C^*(\omega)}{C_0} \quad (4)$$

Onde C_0 é a capacitância geométrica do dielétrico. Finalmente, calcula-se o fator de perdas por:

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \quad (5)$$

2.3 PDC & FDS

Quando combinados, os testes PDC e FDS reduzem significativamente o tempo de ensaio se comparadas às duas técnicas executadas separadamente, visto que as medidas no domínio do tempo podem ser realizadas em curto tempo, mas são limitadas a escalas baixas de frequências, geralmente abaixo de 1 Hz. Em contraste, o FDS é melhor aplicável para frequências mais altas, pois consome muito tempo quando realizado em baixas frequências. (PAULINO, 2009).

O instrumento utilizado nos ensaios para este artigo concorda os dois métodos para o ensaio de resposta do dielétrico, aquisitando assim os dados no domínio da frequência em um faixa de 5 kHz a 0,1 Hz, enquanto que do domínio do tempo de 0,1 Hz a 100 μ Hz (PAULINO, 2009). Essa instrumentação também transforma os dados no domínio do tempo para frequência para análises mais profundas. A Figura 2 mostra a forma de combinação dos dois ensaios.

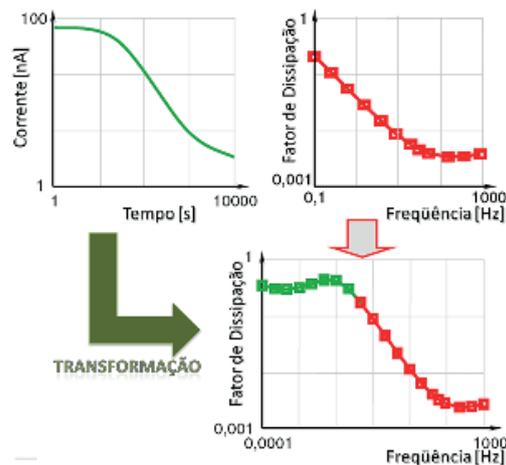


FIGURA 2: Combinação dos métodos PDC e FDS (retirado de (PAULINO, 2009).)

A ensaio de resposta do dielétrico pode reduzir o tempo de duração de uma medida para 25% do tempo de medida original quando comparado ao método FDS, como mostrado na Figura 3. Por exemplo, os dados com medidas de 1 kHz para valores inferiores a 0,1 mHz tipicamente necessitam de cerca de 11 horas para uma medida no domínio frequência, mas com a aplicação do procedimento e equipamento proposto, essa medida dura menos de 3 horas. Os resultados da medida de corrente de polarização e despolarização levará 5,5 h para serem obtidas para o range de 1 s até 10000 s, o que corresponde a 1 Hz a 0,1 mHz. (PAULINO, 2009).

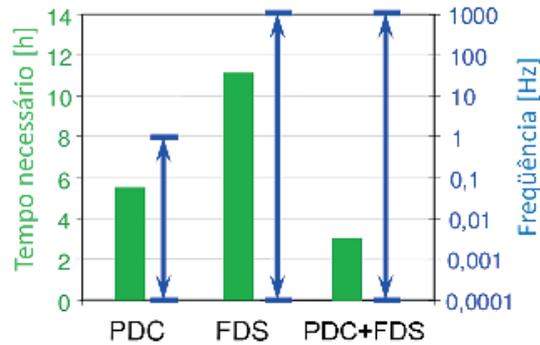


FIGURA 3: Duração do ensaio para diferentes escalas de frequência (adaptado de (PAULINO, 2009))

3 | ESTRUTURA DO DIELÉTRICO E CONEXÕES

3.1 Transformadores de Potência

A Figura 4 demonstra a isolamento elétrica de um transformador de potência. No ensaio de resposta do dielétrico, o instrumento aplica tensão no enrolamento de alta tensão, logo, uma corrente flui no sentido do enrolamento de baixa tensão, voltando assim para o instrumento, como indicado na Figura 5. O instrumento faz aquisição de condutividade do óleo e celulose, e do efeito de polarização interfacial, os quais dependem da geometria e composição do dielétrico (PAULINO, 2010).

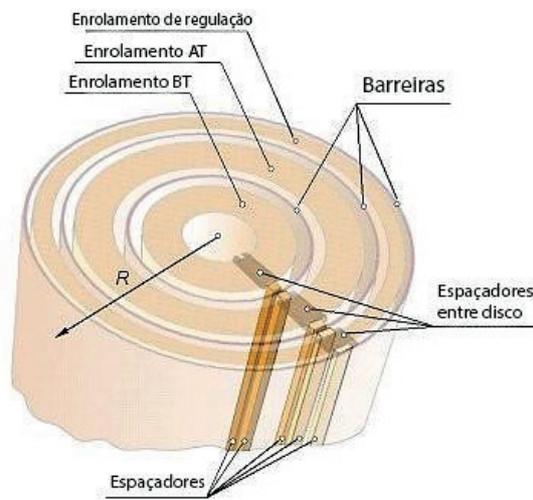


FIGURA 4: Isolação de um transformador de potência (retirado de (PAULINO, 2010))

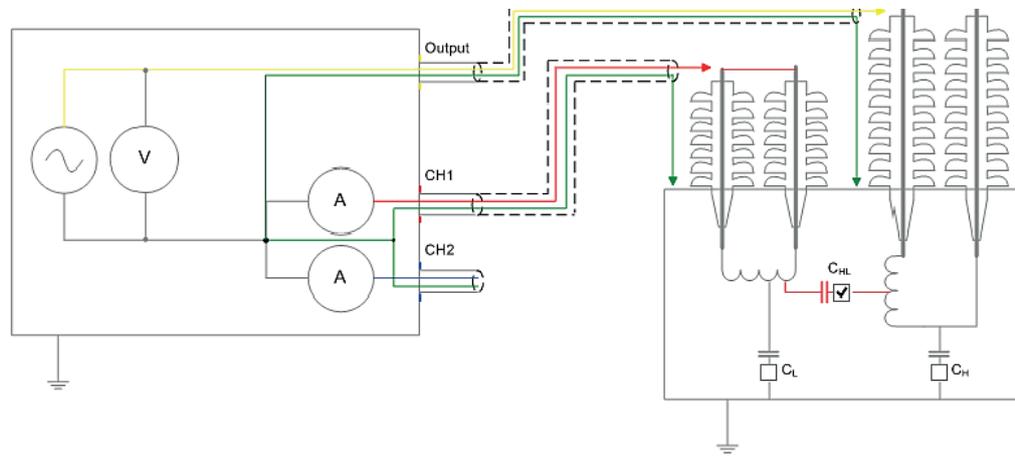


FIGURA 5: Esquema de conexões para ensaio em transformador de dois enrolamentos

3.2 Buchas RIP

As buchas papel impregnando em resina, do inglês “resin impregnated paper” (RIP), são feitas de um núcleo impregnado de resina. O núcleo é envolto em um isolador de porcelana ou silício para uma construção completamente seca. As descargas parciais raramente ocorrem para buchas RIP, mas elas podem causar um aumento da capacitância (OMICRON, 2016). A Figura 6 apresenta um diagrama de construção de buchas, onde é possível visualizar as várias capacitâncias provenientes do papel enrolado ao redor do condutor central. A Figura 7 apresenta o diagrama para conexões do circuito.

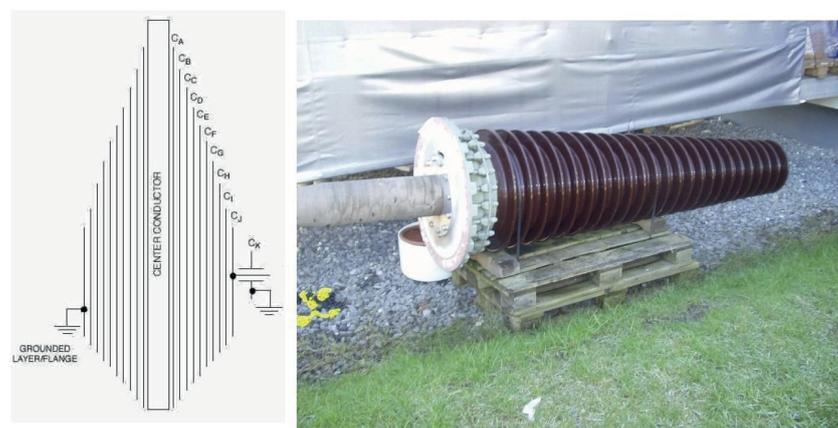


FIGURA 6: Dielétrico de uma bucha RIP à esquerda e exemplo de bucha RIP à direita (retirado de (OMICRON, 2016))

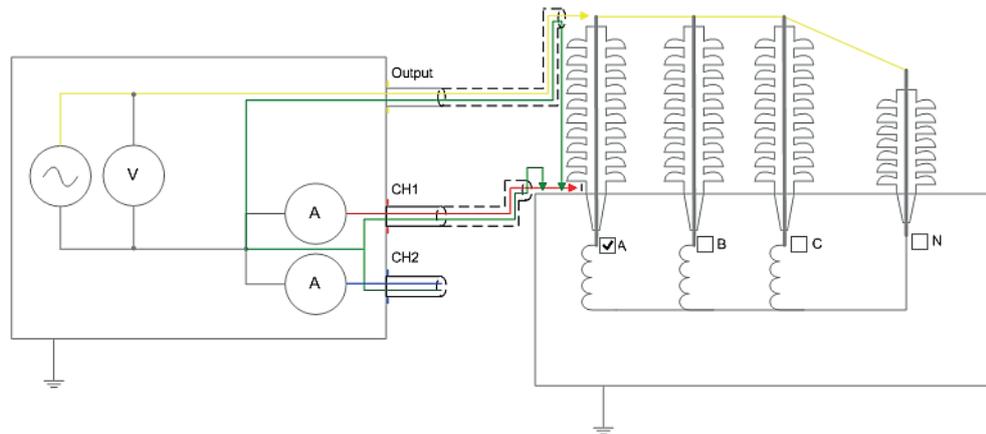


FIGURA 7: Esquema de conexões para ensaio em bucha

4 | ANÁLISE DA RESPOSTA DIELÉTRICA

A umidade influencia diretamente na aferição de grandezas dielétricas, tanto em baixas como altas frequências, como é o caso de: fator de perdas, capacitância e correntes de polarização e despolarização. É sabido que ao se variar a frequência, o fator de perdas apresenta um gráfico em formato de ‘S’ como mostrado na Figura 8 (PAULINO, 2010).

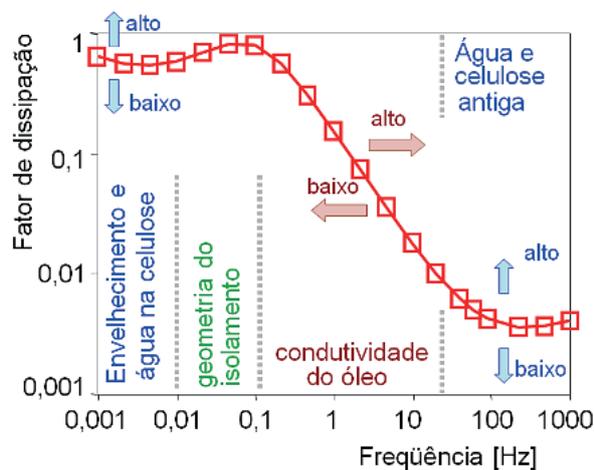


FIGURA 8: Interpretação dielétrica da curva de resposta na frequência (retirado de (PAULINO, 2010).)

A partir da Figura 8, observa-se que a parte do gráfico referentes aos menores valores de frequência, correspondem às condições e propriedades do isolamento sólido do objeto teste. Antes do decaimento contínuo do fator de dissipação são registradas as condições da geometria do isolamento. Essas condições determinam uma elevação à esquerda do registro da condutividade do óleo. A parte central do gráfico, onde há uma rápida variação de valores (rampa para baixo), refe-se à condutividade do óleo (PAULINO, 2010).

5 | MODELO PARA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE

A determinação da umidade baseia-se numa comparação da resposta dielétrica obtida no ensaio com modelos de resposta dielétrica padrão localizadas em um banco de dados do instrumento responsável pelo teste. O banco de dados já mencionado, constitui-se de medições em várias temperaturas, conteúdos de umidade e óleos utilizados para impregnação. Finalmente, o gráfico de saída é rearranjado por meio de um algoritmo (PAULINO, 2010).

Inicialmente, a temperatura do isolamento, proveniente da resposta dielétrica é adquirida, onde então pode-se calcular a permissividade. Para modelagem, é utilizado o modelo XY (Figura 9), este combina valores de permissividade do papel com a permissividade complexa (referente ao óleo). Logo, têm-se o cálculo para a resposta dielétrica do isolamento linear e multicamada, onde X se refere aos valores relativos a barras no óleo e Y aos valores relativos aos espaçadores no óleo. (PAULINO, 2010).

O modelo obtido através das permissividades é então convertido para um modelo capacitivo e posteriormente comparado com a resposta dielétrica obtida. Através deste modelo capacitivo, é possível então mostrar a umidade contida na celulose e a condutibilidade do óleo. O algoritmo mencionado é demonstrado na Figura 9.

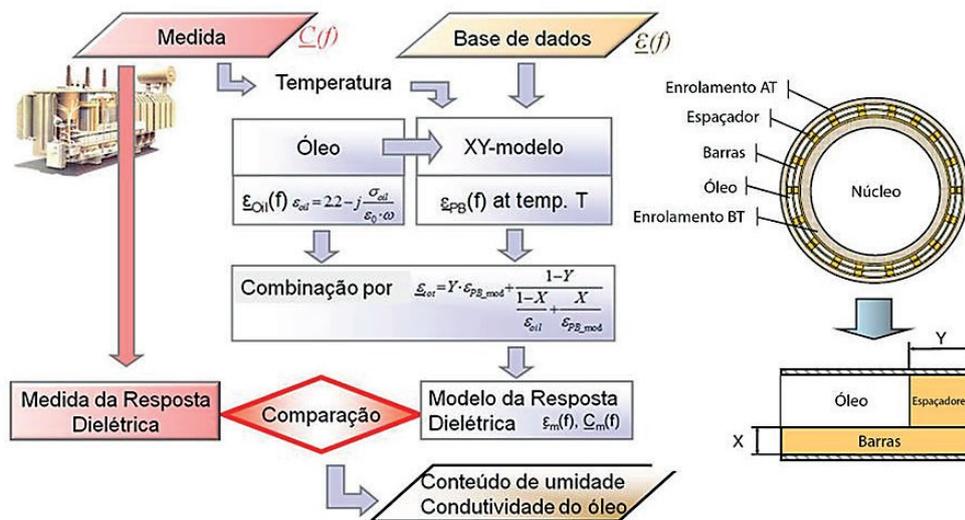


FIGURA 9: Fluxograma do algoritmo à esquerda e representação do isolamento em transformador pelo modelo XY à direita (retirado de (PAULINO, 2010))

6 | ESTUDOS DE CASO

6.1 Transformador de Potência

Este estudo de caso aborda um transformador monofásico 13,8/138 kV, sinistrado, pertencente à uma das máquinas da UHE – Coaracy Nunes, Amapá. O ensaio de resposta do dielétrico foi realizado antes e após uma manutenção no equipamento, a fim de se identificar as condições do equipamento inicialmente, bem como quão sucedida havia sido a manutenção. A manutenção foi realizada, o que incluiu retirada

do óleo para tratamento, uso de bomba de vácuo na estrutura interna do transformador e passagem de corrente no núcleo do mesmo, propiciando certa expulsão de umidade. Serão apresentados os resultados dos ensaios antes e após a manutenção ocorrida no transformador.

6.1.1 Ensaio Anterior à Manutenção

A Figura 10 apresenta o resultado do ensaio de análise de resposta do dielétrico para o isolamento CHL (capacitância entre os terminais de alta tensão e baixa tensão) do transformador em questão.

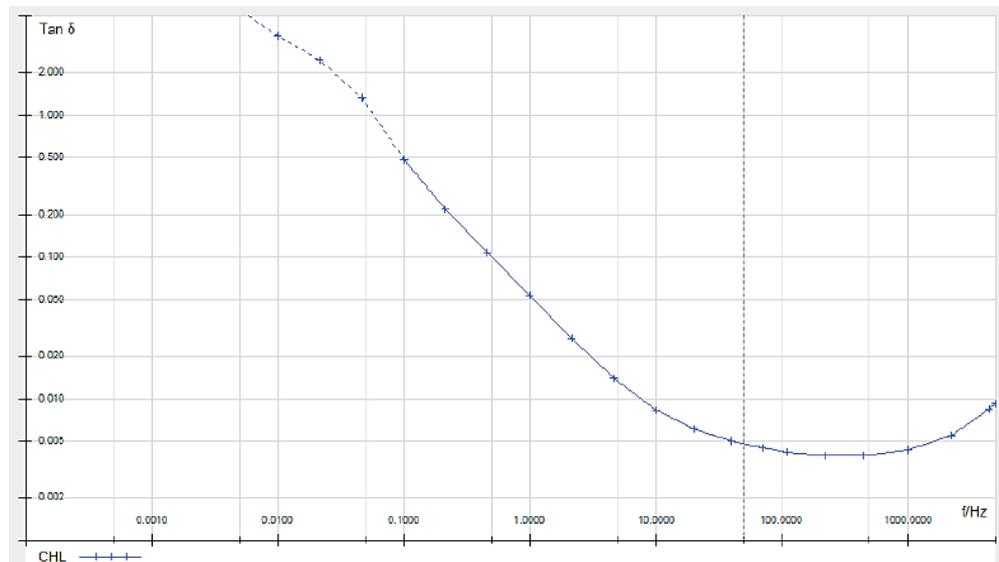


FIGURA 10: Resultado do ensaio de análise de resposta do dielétrico para o isolamento CHL do transformador antes da manutenção

A curva apresenta forma relativamente linear, conforme esperado. Quanto ao diagnóstico do ensaio de análise de resposta do dielétrico do isolamento CHL do transformador, o resultado é apresentado na Figura 11.

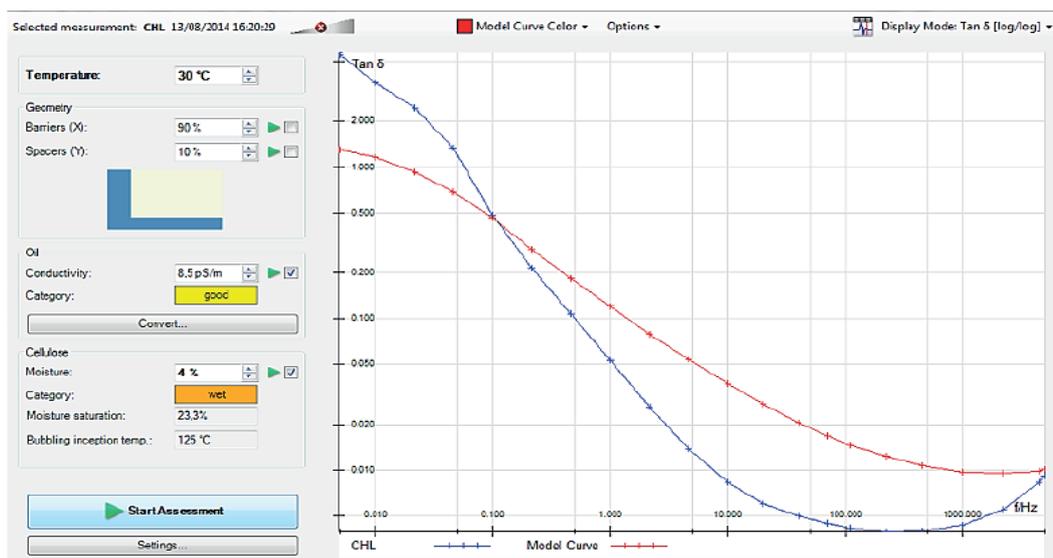


FIGURA 11: Diagnóstico do ensaio de análise de resposta do dielétrico do transformador antes da manutenção

Os resultados mostram que a curva do transformador obtidas pelo algoritmo do software do instrumento e a curva modelo (em vermelho) não ficaram próximas. O algoritmo calculou o teor de umidade no papel, obtendo o valor de 4,0 %. Tal valor está acima dos limites normais, o que fornece a avaliação de que o mesmo se encontra úmido (*wet*). Isto significa que para cada 100 kg de papel no núcleo do transformador há 4 kg de água.

O algoritmo também calculou a condutividade do óleo isolante para o transformador 8,5 pS/m, fornecendo a avaliação de bom (*good*), indicando que o óleo isolante apresenta-se com teor de umidade aceitável.

6.1.2 Ensaio Posterior à Manutenção

A Figura 12, abaixo, apresenta o resultado do ensaio de análise de resposta do dielétrico do isolamento CHL do transformador ensaiado.

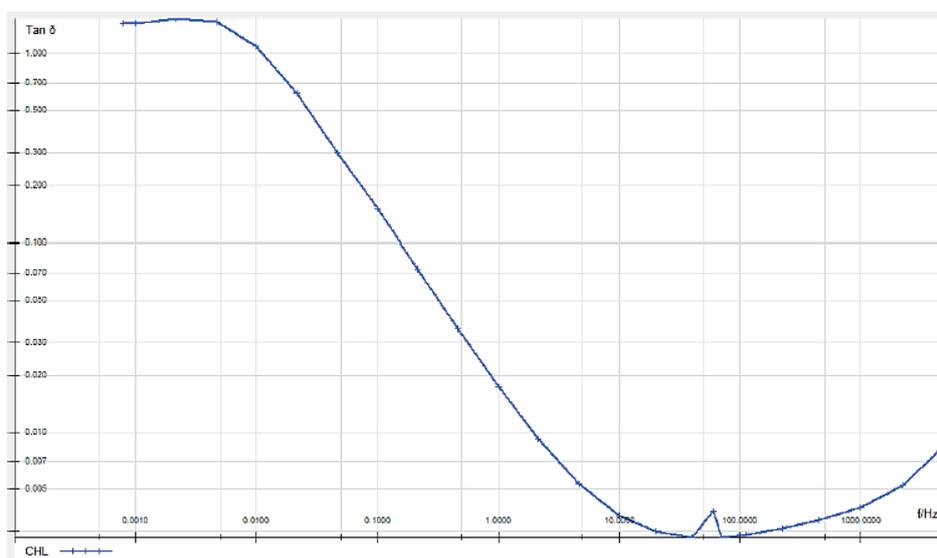


FIGURA 12: Resultado do ensaio de análise de resposta do dielétrico para o isolamento CHL do transformador após a manutenção

Na Figura 13, a seguir, é mostrado o diagnóstico do ensaio de análise de resposta do dielétrico do isolamento CHL do transformador.

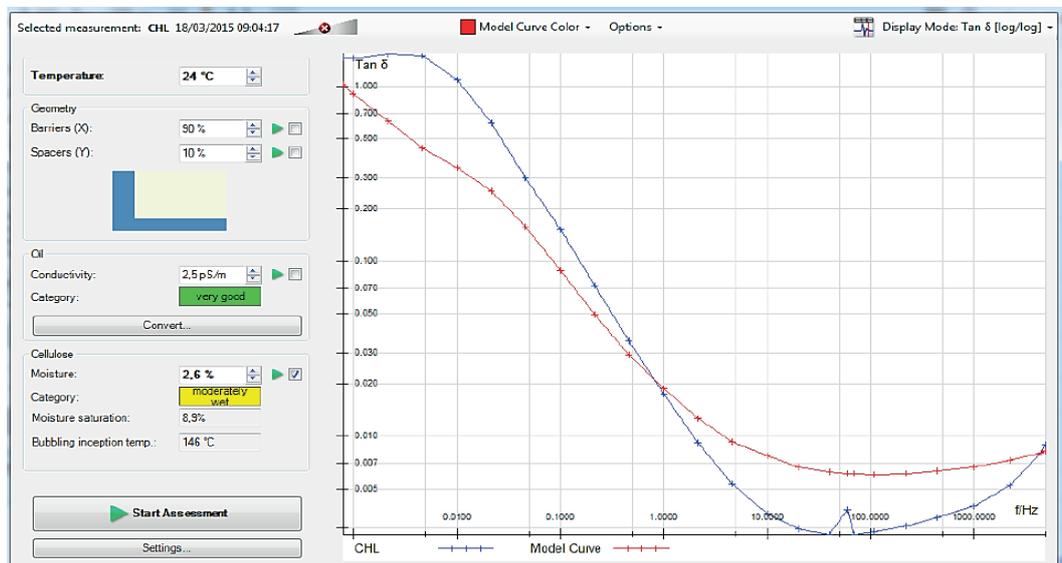


FIGURA 13: Diagnóstico do ensaio de análise de resposta do dielétrico do transformador após manutenção

Os resultados da Figura 13, mostram a curva do transformador (em azul) e a curva modelo (em vermelho), sendo que, as mesmas não ficaram próximas. O algoritmo calculou o teor de umidade na celulose, obtendo o valor de 2,6 %. Tal valor fornece a avaliação de que a celulose (papel) do transformador se encontra moderadamente úmida (*moderately wet*). Isto significa que para cada 100 kg da celulose do transformador, há 2.6 kg de água na celulose.

O algoritmo também calculou a condutividade do óleo isolante do transformador em 2,5 pS/m, fornecendo a avaliação muito bom (*very good*), indicando que o óleo isolante se apresenta com teor de umidade muito bom.

6.2 Bucha RIP

A Figura 14, a seguir, apresenta o diagnóstico do ensaio de análise de resposta do dielétrico do isolamento C1 da bucha RIP de 230 kV.

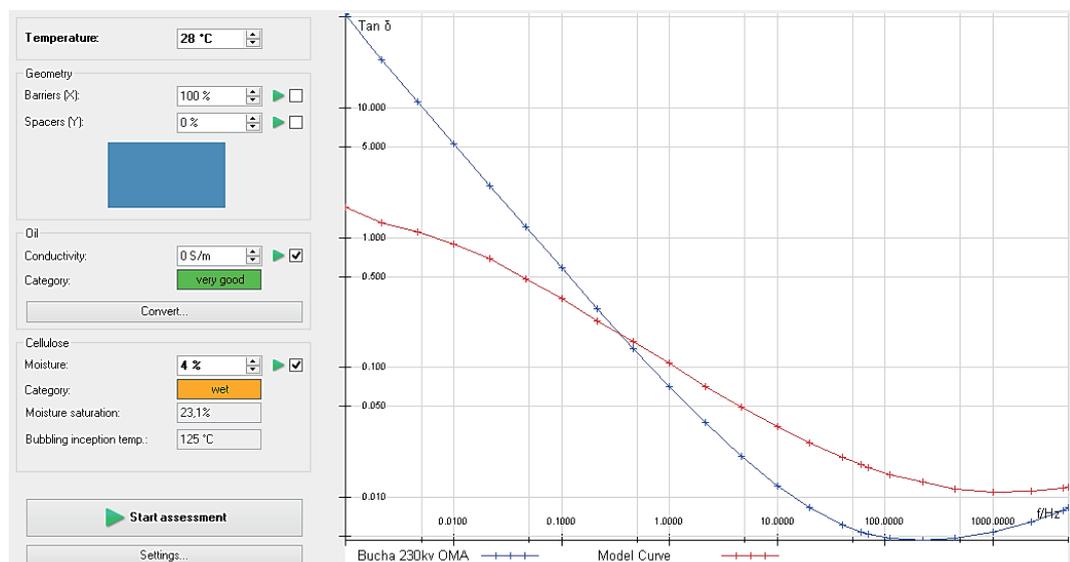


FIGURA 14: Diagnóstico do ensaio de análise de resposta do dielétrico do isolamento C1 da bucha RIP de 230kV

O resultado da análise de resposta do dielétrico mostrou que a bucha apresenta teor de umidade no papel acima dos valores considerados normais, sendo encontrado valor de 4%, isto é, úmida (*wet*).

Ensaaios dielétricos com alta tensão foram realizados na bucha: capacitância, fator de perdas e descargas parciais e tensão suportável a frequência industrial. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

| TENSÃO (kV) | | | FATOR DE PERDA DIELÉTRICA $T_g \delta$ (%) | | CAPACITÂNCIA C1 (pF) | DESCARGAS PARCIAIS (pC) | |
|-------------|-------------------|--------|--|-------------------|----------------------|-------------------------|-------------------|
| ITEM | NÍVEL | VALOR | MEDIDO | MÁXIMO ADMISSÍVEL | MEDIDO | MEDIDO | MÁXIMO ADMISSÍVEL |
| 1 | --- | 10 kV | 0,5020 | 0,7 | 787,258 | <6 | 10 |
| 2 | 0,5 Un | 70 kV | 0,5039 | 0,7 | 787,268 | <6 | 10 |
| 3 | 1,05 Un | 147 kV | 0,5084 | 0,7 | 787,308 | >20 | 10 |
| 4 | 1,5 Un | 210 kV | 0,5175 | 0,7 | 787,371 | >20 | 10 |
| 5* | Tensão Suportável | 391 kV | --- | --- | --- | --- | --- |
| 6 | 1,5 Un | 210 kV | 0,4864 | 0,7 | 787,326 | >20 | 10 |
| 7 | 1,05 Un | 147 kV | 0,4805 | 0,7 | 787,382 | >20 | 10 |
| 8 | 0,5 Un | 70 kV | 0,4777 | 0,7 | 787,344 | <6 | 10 |
| 9 | --- | 10 kV | 0,4766 | 0,7 | 787,326 | <6 | 10 |

Tabela 1 – Resultados dos Ensaios com Alta Tensão em Bucha 230 kV

* A bucha suportou a tensão aplicada de 391 kV, durante 60 segundos, sem interrupção.

As Figuras 15(a) e 15(b) apresentam os resultados da medição de descargas parciais na bucha ensaiada, antes e após o ensaio de tensão suportável à frequência industrial. Como se observa, o nível de descargas parciais medido é superior a 10 pC, valor este estabelecido como limite pela norma NBR 5034/2014 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

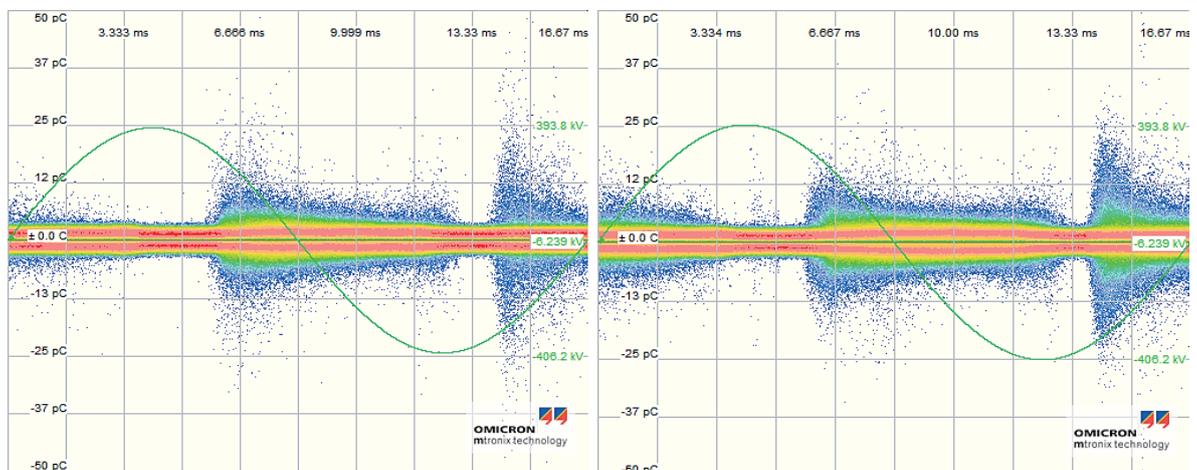


Figura 15 (a) - Medições de descargas parciais antes do ensaio de tensão suportável à frequência industrial.

Figura 15 (b) - Medições de descargas parciais após o ensaio de tensão suportável à frequência industrial.

Figuras 15(a) e 15(b) - Medição de descargas parciais

7 | CONCLUSÃO

Este artigo discutiu alguns dos principais métodos utilizados para o diagnóstico de umidade no papel e condição de degradação do isolamento elétrico de equipamentos de alta tensão. É importante ressaltar que os métodos utilizados são não-invasivos, o que os tornam excelentes aliados para a manutenção preditiva, visto que se permite o conhecimento da condição do equipamento, além de poder diagnosticar eventuais não conformidades. Portanto, há a possibilidade de elaboração de programas de manutenção, capazes de melhorar o desempenho e estender a vida útil dos equipamentos assim geridos.

O primeiro estudo de caso apontou a condição inicial do isolamento de um transformador e como esta mudou após uma manutenção realizada. O segundo estudo de caso demonstrou o estado do isolamento sólido de uma bucha capacitiva, onde se achou o mesmo úmido (*wet*), além disso o ensaio de descargas parciais apontou um alto nível de descargas, o que pode ter sido ocasionada pela relação com a degradação acelerada do dielétrico pela umidade.

REFERÊNCIAS

ACHMAD, Muhammad Taufik; WU, Xue-Zhou; BAI, Fan; CAO, Li-Shuang; LI, Wen-Dong; SUWARNO, ZHANG, Guan-Jun. **Impact of Test Voltage Magnitude on FDS Characteristics of Oil-Paper Insulation with Different Aging Conditions**. The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 23 – 28, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5034: Buchas para tensões alternadas superiores a 1 kV**, 2014.

INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS. **CIGRÉ 254 Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers**. Report of the TF D1.01.09, Paris, 2004.

JOSHI, Abhishek; AARADHI, Pooja. **Dielectric Diagnosis of EHV current Transformer Using Frequency Domain Spectroscopy (FDS) & Polarization and Depolarization Current (PDC) Techniques**. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 3, Issue 11, November-2012.

OMICRON, **Application Note - Measuring and Analyzing the Dielectric Response of Bushings**. ANP_10017_ENU, 2016.

PAULINO, M. E. C. **Diagnóstico em Campo para Determinação de Umidade em Transformadores**, Anais do XIII ERIAC – Décimo Terceiro Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu, Argentina, 2009.

PAULINO, M. E. C. **O Estado da Arte das Aplicações para Diagnóstico de Umidade em Transformadores de Potência**. Anais do CIDEL Argentina 2010 International Electricity Distribution Congress, Buenos Aires, Argentina, 2010.

WANG, Shi-Qiang; ZHANG, Guan-Jun; WEI, Jian-Lin; YANG, Shuang-Suo; DONG, Ming; HUANG, Xin-Bo. **Investigation on dielectric response characteristics of thermally aged insulating pressboard in vacuum and oil impregnated ambient.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no.6, pp. 1853-1862, 2010.

SOBRE A ORGANIZADORA

Jaqueline Oliveira Rezende Possui graduação em Engenharia Elétrica, com certificado de estudos em Engenharia de Sistemas de Energia Elétrica e mestrado em Engenharia Elétrica, ambos pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é aluna de doutorado em Engenharia Elétrica, no Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos, pela Universidade Federal de Uberlândia. Atuou como professora nos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação. Tem realizado pesquisas em Sistemas de Energia Elétrica, dedicando-se principalmente às seguintes áreas: Energia Solar Fotovoltaica; Curvas Características de Painéis Fotovoltaicos; Dinâmica de Sistemas Elétricos; Geração Distribuída; Simulação Computacional; Algoritmo Genético.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-85107-46-8

