



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

BR/GTM/22
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - XIII

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES -
GTM**

**AValiação da Confiabilidade de Transformadores de Potência por Meio da Correlação
Entre Ensaio Elétricos da Parte Ativa e Físico-Químicos do Óleo Isolante**

PauloEduardo Malaquias*
AES Tietê

José Pissolato Filho
Unicamp

RESUMO

O presente estudo visou a desenvolver metodologia de avaliação da confiabilidade de transformadores de potência por meio da correlação entre ensaios elétricos da parte ativa e físico-químicos no óleo isolante.

Inicialmente foram avaliados os resultados históricos de ensaios físico-químicos convencionais e de gases dissolvidos em óleo isolante. Foram escolhidos os óleos de alguns transformadores de maior interesse para medir os ácidos de baixa massa molar (ácido fórmico e acético), pois aceleram o envelhecimento do papel, havendo uma clara sinergia entre eles e o teor de água deste.

Foram coletados dados "on line" de temperatura e da saturação relativa da água no óleo isolante para determinar o teor de umidade dos enrolamentos. Também foi avaliada a tipologia das descargas parciais (DP) de transformadores energizados em campo.

Os resultados de ensaios dos diversos métodos aplicados foram analisados, buscando obter correlação entre eles, de modo a determinar com maior eficácia a confiabilidade operacional dos transformadores, sua vida útil remanescente e a necessidade de intervenções de manutenção ou substituição.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador; Envelhecimento Sistema Isolamento

1.0 - INTRODUÇÃO

Hoje existem comercialmente vários sistemas de isolamento para uso em transformadores de potência (epóxi, papel-óleo vegetal, papel-silicone, etc.). Todos apresentam vantagens e desvantagens quando comparados entre si, mas o sistema de isolamento papel-óleo mineral isolante é, de longe, o mais utilizado.

Neste tipo de transformador o óleo mineral isolante "divide" com o isolamento sólido a responsabilidade em prover a adequada rigidez dielétrica do sistema de isolamento. Deve-se frisar que neste caso o elemento isolante mais importante é o papel embebido em óleo, ou seja, a combinação entre o isolamento líquido e sólido, pois esta combinação possui uma rigidez dielétrica entre 20 e 25% superior a soma da rigidez dielétrica do papel e óleo isolante quando separados[1].

O óleo mineral isolante é formado basicamente por hidrocarbonetos (átomos de carbono unidos a átomos de hidrogênio). Compostos contendo enxofre, nitrogênio e oxigênio em pequena quantidade também podem ser

(*) Avenida Nações Unidas nº17 -17 11º andar – Centro – CEP 17.013- 905 Bauru, SP - Brasil
Tel: (+55 14) 2106-3400 – Fax: (+55 14) 2106-3447 – Email: paulo.malaquias@aes.com

encontrados. Com relação a classificação, existem dois tipos primários de óleo mineral isolante: Óleos parafínicos e óleos naftênicos.

Os termos parafínicos e naftênicos referem-se aos diferentes arranjos dos hidrocarbonetos nas moléculas de óleo. No arranjo parafínico os átomos são unidos formando linhas retas ou ramificadas. Já na disposição naftênica os átomos são unidos em forma de anéis, com cada anel geralmente formado por cinco, seis ou sete grupos de átomos, conforme apresentado na Figura 1.

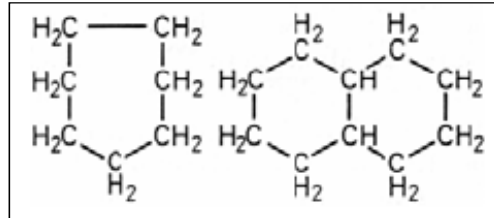


Figura 1 - Representações de Átomos em Arranjo Naftênico [1]

A principal matéria prima empregada na fabricação do papel utilizado na isolação sólida de transformadores é a madeira. A madeira é um composto natural formado por fibras de celulose unidas por lignina. O processo de produção do papel visa eliminar a lignina e outros componentes menores presentes na madeira como carboidratos e graxas restando basicamente a celulose [2].

A celulose é um polímero natural de longa cadeia cuja unidade molecular é composta por glicose, que é um açúcar produzido pelas plantas verdes no processo de fotossíntese. Sua fórmula simplificada (sem considerar as ligações nos finais das cadeias) pode ser escrita por $[C_6H_{10}O_5]_n$, onde n é o Grau de Polimerização (GP). A Figura 2 mostra a estrutura química de uma cadeia de celulose.

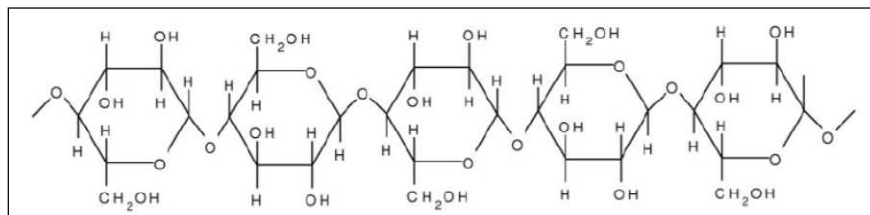


Figura 2 - Estrutura Química da Celulose [3]

O óleo isolante pode ser substituído ou tratado, ao contrário do papel isolante. Assim a vida útil do transformador com isolamento papel - óleo mineral isolante coincide com a vida útil do papel isolante.

Portanto, é de extrema importância a determinação do grau de envelhecimento do papel isolante, tanto para avaliar a confiabilidade operacional do equipamento quanto para programar com maior precisão investimentos na substituição ou recapacitação de transformadores.

2.0 - ENVELHECIMENTO DO SISTEMA ISOLANTE

A degradação do óleo dá-se pela oxidação, ou seja, pela reação química dos hidrocarbonetos com o oxigênio, modificando assim as propriedades físicas e químicas do óleo. Os produtos resultantes da oxidação do óleo são: alcoóis (ROH), aldeídos (RCHO), cetonas (RCOR), ácidos (RCOOH), ésteres (RCOOR) e água.

A temperatura exerce muita influência no processo de oxidação, pois o calor ativa a reação do oxigênio com os hidrocarbonetos do óleo. Na faixa de trabalho do transformador (cerca de 80 °C) a velocidade de degradação dobra a cada aumento de temperatura entre 8 e 10°C [2].

Para temperaturas acima de 150 °C a degradação do óleo leva a formação de determinados gases combustíveis como o hidrogênio, metano, etano, etileno e o acetileno.

Outros catalisadores das reações químicas que degradam o óleo mineral isolante são: luz, campo eletromagnéticos e alguns tipos de metais como aço e cobre. Destes agentes citados, apenas a luz não está presente no interior do transformador.

Já o envelhecimento do papel ocorre com a quebra das ligações entre as moléculas que compõem suas fibras. Esta quebra leva a diminuição do GP e da resistência mecânica do papel.

Os principais agentes da degradação do papel isolante são:

- Água (degradação por hidrólise)/ ataque químico dos ácidos
- Temperatura (degradação por pirólise)
- Oxigênio (degradação por oxidação)

A temperatura tem influência na velocidade de degradação do papel isolante tanto agindo como catalisador dos outros fatores principais de degradação (hidrólise, oxidação e ataque químico) quanto provocando a pirólise. A pirólise "pura" ocorre em temperaturas superiores a 140 °C [3], temperatura que não é esperada em um transformador em operação, tendo início quando a vibração dos átomos do papel, decorrente da energia térmica recebida, desfaz as ligações químicas entre os átomos. Com a quebra das ligações, outros elementos químicos são formados como a água, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio, compostos furânicos (- Hidroximetil-2-Furfural (5H2F), 2-Furfuralcool (2FOL), 2-Furfural (2FAL), 5-Metil-2-Furfural (5MEF) e 2-Acetil Furano (2ACF)), bem como a glicose. Acima de 200 °C, nos extremos das moléculas de celulose uma reação química específica pode ocorrer levando a formação de outras substâncias, principalmente o levoglucosano [4].

Na oxidação o oxigênio ataca os átomos de carbono na molécula da celulose formando ácidos e aldeídos [5]. Se os átomos de carbono que participam da ligação entre os anéis são atacados ocorre a cisão da cadeia de celulose, com a conseqüente diminuição do Grau de Polimerização. Nesta cisão são formados: água, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrogênio.

A hidrólise é causada pela ação das moléculas de água e dos ácidos de baixa massa molar. Este processo de degradação tem início quando uma molécula de água retira um íon de hidrogênio (H^+) do ácido. Em seguida o íon de hidrogênio combina com um átomo de oxigênio da molécula do papel quebrando a cadeia polimérica. O ânion remanescente do ácido ($RCOO^-$) une-se ao cátion ($+CH_2R$) da celulose [3].

Os ácidos de baixo peso molecular como o fórmico, o acético e o levulínico (que são formados na degradação da celulose) são mais facilmente absorvidos pelo papel isolante que os ácidos de maior peso molecular como o esteárico e o naftênico (formados na degradação do óleo). Assim, os ácidos de baixa massa molecular tem grande influência no processo de degradação do papel, enquanto os ácidos de elevado peso molecular parecem não influenciar significativamente [6].

A Figura 3 sintetiza as reações químicas resultantes da hidrólise e oxidação do papel.

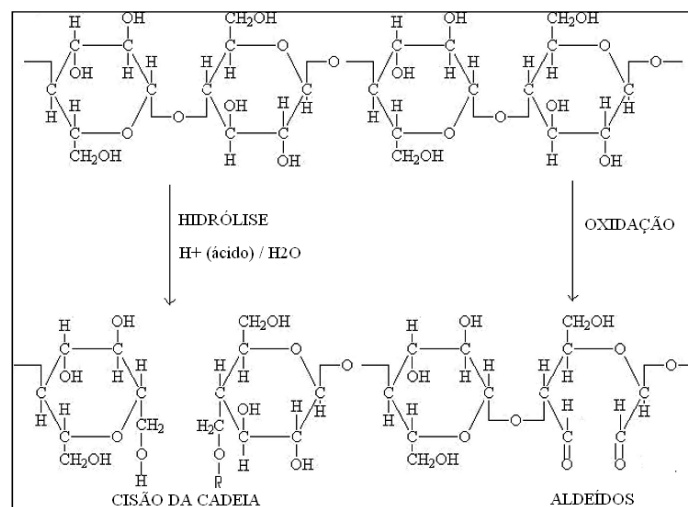


Figura 3 - Hidrólise e Oxidação do Papel Isolante

3.0 - METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE

3.1 Ensaio de Descargas Parciais

A norma IEC 60270 define descargas parciais (DP) como uma descarga elétrica que une parcialmente a isolação entre condutores [7]. Este fenômeno ocorre quando em determinada região do sistema isolante o campo elétrico estressa o dielétrico a tal ponto que, nesta região, ele deixa de funcionar como isolante [8].

Deve-se frisar que a falha na isolação, da qual se originam as descargas parciais, é um acontecimento local, o sistema de isolamento (como um todo) continua realizando sua função, apesar da falha do isolamento em determinada região.

Descargas parciais geralmente provocam pulsos com duração menor que 1 μ s emitindo luz, calor, radiação eletromagnética e sinais elétricos e acústicos. A energia da centelha resultante poderá quebrar as ligações das moléculas do isolante alterando suas propriedades químicas e físicas [9].

Na interpretação dos resultados do ensaio de descargas parciais são importantes a quantificação, energia e posição em relação a senóide de tensão dos pulsos de DP. Para este fim, nos transformadores ensaiados neste trabalho, foram instalados sensores nos “taps capacitivos” das buchas de alta tensão, medindo assim os sinais elétricos emitidos pelos pulsos de DP. Um software apropriado tratou os sinais capturados pelos sensores para possibilitar a análise.

3.1 Ensaio no Óleo Isolante

3.1.1 Teor de Água no Papel

Pode-se estimar a quantidade de água presente na isolação sólida, medindo-se o teor de água e a temperatura do óleo isolante.

Neste estudo, instalou-se um sistema de coleta de dados “on line” de temperatura do óleo e saturação relativa da água no óleo. Os dados foram coletados durante 10 dias típicos, em medições de 10 em 10 minutos. Calculou-se a temperatura média do óleo e a saturação relativa média da água no óleo num dia típico. Com base nesses dados, utilizou-se metodologia desenvolvida pela SDMYERS [10], que estima o teor de água no papel por meio de um programa digital.

3.1.1 Análise de Furfuraldeído

Os elementos furânicos produzidos no interior do transformador são produtos exclusivos dos derivados de madeira presentes, principalmente do isolante sólido e como são parcialmente solúveis em óleo isolante a concentração e o tipo de furano presente podem ser estimados com a análise de uma amostra do óleo do transformador. Nos transformadores avaliados, este ensaio foi realizado conforme NBR-15349 [11].

3.1.2 Análise de Ácidos de Baixa Massa Molar

A medição “tradicional” de ácidos diluídos no óleo isolante não distingue os vários tipos de ácidos. Neste trabalho, para a determinação dos ácidos de baixa massa molar misturou-se a amostra de óleo em um igual volume de água destilada. Após agitar a mistura fez-se a separação em um funil de separação. Em seguida mediu-se o índice de neutralização de ambas as fases, conforme descrito por Lundgaard [12].

4.0 - ENSAIOS E RESULTADOS

O projeto piloto inclui a análise em 10 transformadores elevadores de Usina. Esses transformadores são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Transformadores Escolhidos para Análise

Número de Série	Ano de Fabricação	Potência Nominal (MVA)	Tensão (kV)	
			Primária	Secundária
4600325	2009	40	13,8	138
2214	2005	40	13,8	138
46.487	1982	112	13,8	138
3790	2001	65	13,8	138
3788	2007	53	13,8	138
21161	2002	45	13,8	138
8687 / 2	2000	50	13,8	138
34370	2011	50	13,8	138
32278	1978	20,4	13,8	138
5.100.396	2001	65	13,8	138

Todos os transformadores avaliados apresentaram teor de umidade no isolante sólido menor que 1% M/DW, bem como não foi detectada nenhuma anormalidade nos ensaios de descargas parciais efetuados. Também não encontrou-se quantidades significativas de furfuraldeído e de ácidos de baixa massa molar, atestando a boa conservação do óleo isolante dos transformadores participantes da pesquisa.

De modo a avaliar o comportamento do óleo dos transformadores em estudo, foram colhidas amostras, as quais foram envelhecidas a 150°C por 72 horas. O envelhecimento foi executado em amostras de óleo “com” e “sem” a inserção de uma tira de papel isolante.

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.

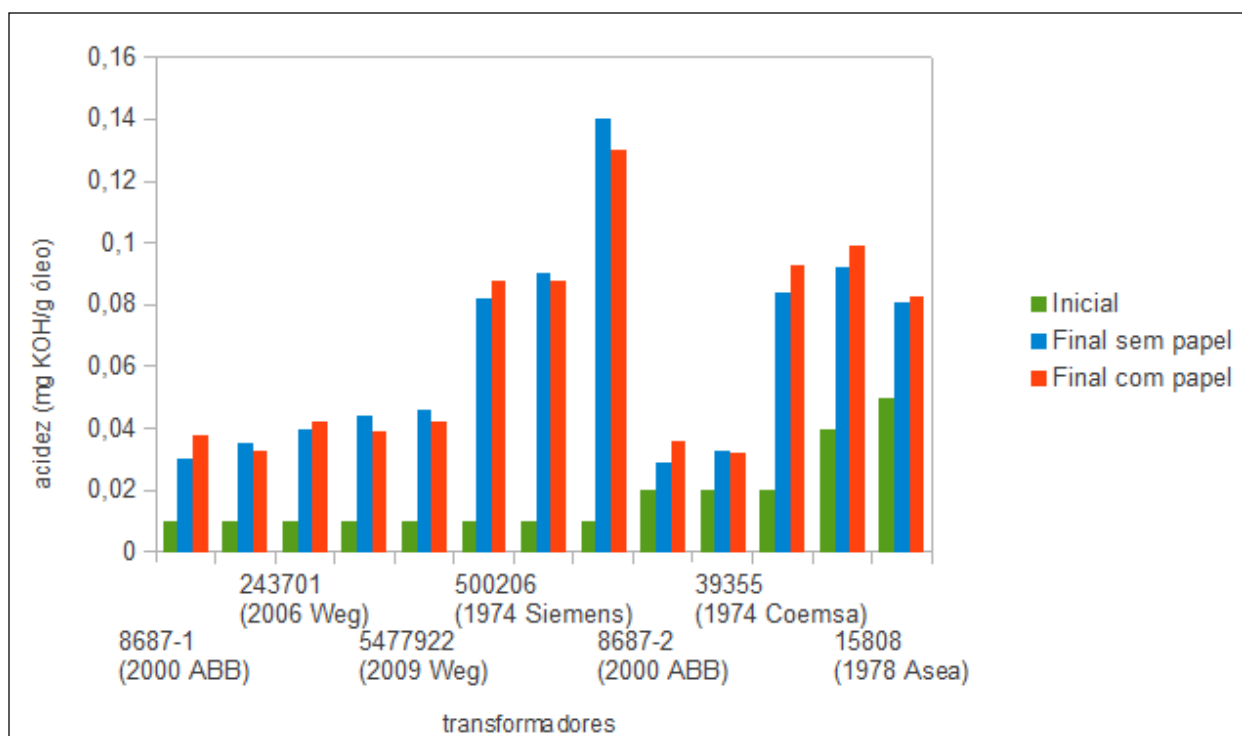


Figura 4 – Índice de neutralização do óleo dos transformadores em estudo antes e após o envelhecimento a 150 °C por 72 horas, com adição de amostra de papel e sem amostra de papel

Na Figura 5 traça-se a correlação entre o teor de furfural (2fal) dissolvido no óleo e o índice de neutralização do óleo dos transformadores em estudo, após o envelhecimento com amostra de papel a 150 °C por 72 horas.

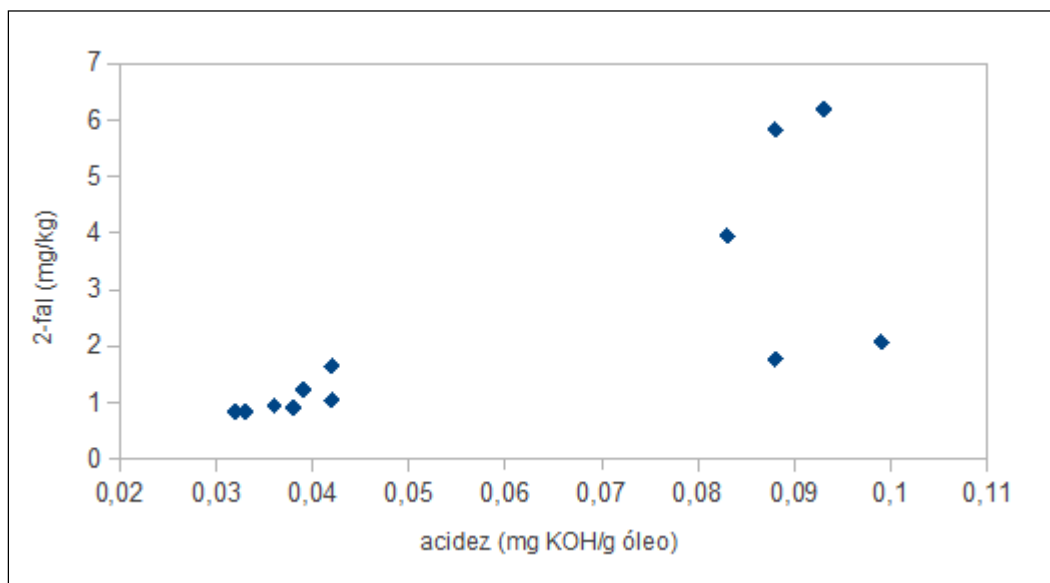


Figura 5 – Correlação entre o teor de furfural (2Fal) dissolvido no óleo e o índice de neutralização da água com a extração dos compostos ácidos de baixa massa molar do óleo dos transformadores em estudo após o envelhecimento com amostra de papel a 150 °C por 72 horas

Já na Figura 6 é apresentada a relação entre o teor de furfural (2fal) dissolvido no óleo e o índice de neutralização da água após a extração dos compostos ácidos de baixa massa molar do óleo dos transformadores em estudo, com o envelhecimento do óleo contendo amostra de papel a 150 °C por 72 horas.

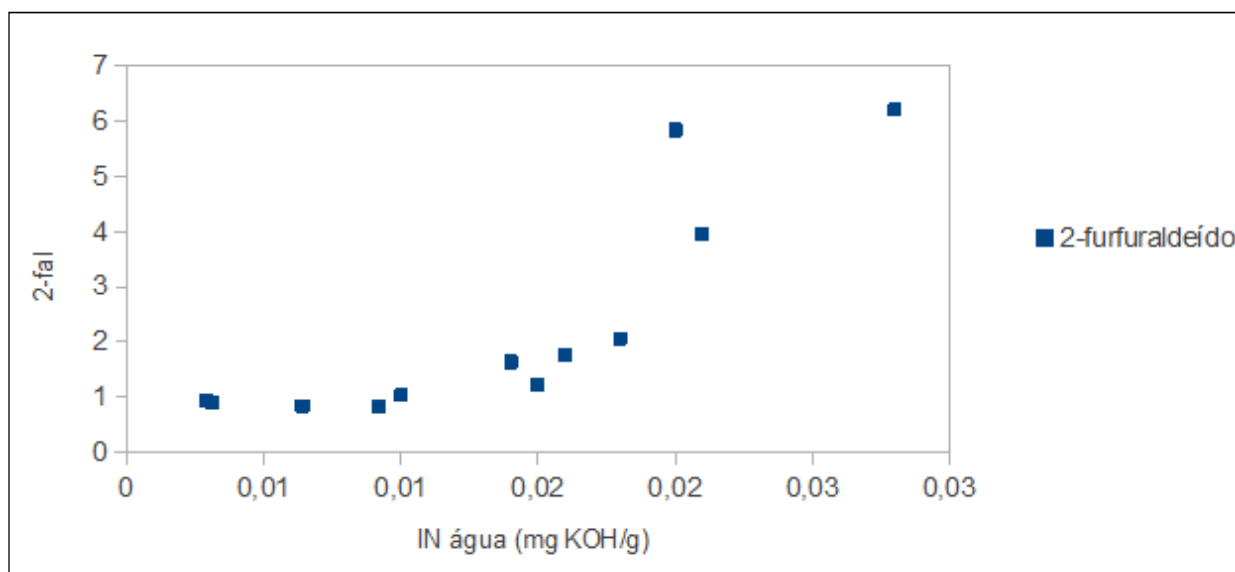


Figura 6 – Correlação entre o teor de furfural 2Fal dissolvido no óleo e o índice de neutralização da água após a extração dos compostos ácidos de baixa massa molar do óleo dos transformadores em estudo após o envelhecimento com amostra de papel a 150 °C por 72 horas

Na comparação das Figuras 5 e 6 pode-se observar a boa correlação entre o teor de furfural 2Fal dissolvido no óleo e o índice de neutralização da água, após a extração dos componentes ácidos de baixa massa molar do óleo, o que é um resultado significativo do presente estudo.

5.0 - CONCLUSÕES

Considerando os resultados dos ensaios, tem-se as seguintes conclusões:

- Os resultados do ensaio de medição do teor de água no óleo e da saturação relativa em campo indicam que em todos os transformadores tanto o isolante sólido quanto o líquido apresentam baixa umidade;
- Com base nos ensaios efetuados os transformadores avaliados estão com seus sistemas isolantes em bom estado e não contêm em quantidade importantes os agentes que aceleram o processo de degradação do transformador;
- A realização dos testes de verificação (“Envelhecimento Forçado”) para estabelecimento das correlações apresentadas foi adequada e importante para a continuidade do desenvolvimento metodológico;
- Observou-se uma boa correlação tanto do grau de polimerização de amostras de papel quanto do teor de furfural do óleo e o índice de neutralização da água após a extração dos compostos ácidos de baixa massa molar do óleo. Embora sejam necessários novos experimentos, somente esta conclusão é um resultado muito significativo do presente estudo.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HORNING MIKE; KELLY JOE; MYERS SCOTT; STEBBINS RANDY; Transformer Maintenance Guide; Transformer Maintenance Institute; S.D. Myer Di vision; Página 55
- [2] BASSETTO FILHO, ARMANDO; Estudo químico de óleos isolantes elétricos por cromatografia, extração com fluido supercrítico e degradação radiolítica; Tese de Doutorado; São Carlos; 1998; página 12
- [3] LELEKAKIS, NICK; GUO WENYU; MARTIN DANIEL; WIJAYA JAURY; A Field Study of Aging in Paper-Oil Insulation Systems; IEEE Electrical Insulation Magazine; página 12
- [4] BASSETTO, ARMANDO FILHO; MCNUTT WILLIAN; GRIFFIN PAUL; Curso Tutorial Sobre Papéis Isolantes de Transformadores; Outubro 1993; pág. 9
- [5] McNutt, W. J.; Insulation Thermal Life Considerations for Transformer Loading Guides; Transactions on Power Delivery; Volume 7; Número 1; Janeiro de 1992; IEEE; página 392
- [6] MARTINS, MARIA AUGUSTA G. Envelhecimento Térmico do Papel Isolante de Transformadores. Investigação Experimental. Modelos de Degradação; Ciência & tecnologia dos Materiais; Volume 22; nº1/2 2010; página 79
- [7] IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION; International Standard IEC 60270 – High-voltage test techniques – Partial discharge measurements; 3ª edição; 2000-12; pág. 14
- [8] ARORA, RAVINDRA; MOSCH, WOLFGANG; High Voltage and Electrical Insulation Engineering; IEEE Press; 2011; pág. 33
- [9] STRACHAN, S. M.; RUDD, S; MCARTHUR, S. D. J; JUDD, M. D; MEIJER, S; GULSKI, E; Knowledge-Based Diagnosis of Partial Discharges in Power Transformers; IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 1; Fevereiro de 2008; pág.260
- [10] SDMYERS, “The Half Century Transformer”. 2009.
- [11] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – “Óleo Mineral Isolante – Determinação de 2-furfural e seus Derivados”, NBR 15349. 2006.
- [12] LUNDGAARD, L. E.; HANSEN, W.; INGEBRIGTSEN, S., “Ageing of Mineral Oil Impregnated Cellulose by Acid Catalysis”. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 2; April 2008. pp. 540-5546.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Paulo Eduardo Malaquias é engenheiro eletricitista, formado pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) em 1992. Atualmente é engenheiro sênior da AES Tietê e mestrando em Engenharia Elétrica na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

José Pissolato Filho é doutor pela “Université Paul Sabatier”, França (1986) e atualmente professor titular da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Responsável pelo Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (LAT/FEEC). Suas principais áreas de pesquisa são: transitórios eletromagnéticos e compatibilidade eletromagnética.