



GRUPO -NNN

GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DE MANUTENÇÃO - GMI

IMPLEMENTAÇÃO DE MÓDULO DE MEDIÇÃO ONLINE PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO ÓLEO ISOLANTE DE OLTCs, BASEADA NA IEC 61620

H. A. P. Silva(*) D. T. R. Vidal M. A. Marin A. M. Briotto R. C. Lopes L. R. T. Vallenias
USP ICT INOVA BRASIL COPEL MR DO BRASIL MR DO BRASIL MR DO BRASIL

RESUMO

Este trabalho versa sobre a implementação de um IED (*Intelligent Electronic Device*), cuja técnica de medição está baseada na IEC 61620. Foi instalado um módulo portátil ao painel de controle do OLTC (*On Load Tap Changer*), para avaliação da qualidade do óleo isolante. O dispositivo, baseado na IEC 61620, monitora a qualidade do óleo via condutividade, frente aos ciclos de operação do comutador. Dessa forma, é possível acompanhar a evolução da degradação da isolação líquida e se antecipar para a substituição de seu filtro e/ou óleo, garantindo níveis ainda mais seguros de trabalho para este ativo, pela ação preditiva.

PALAVRAS-CHAVE

IEC 61620, Gestão de ativo, OLTC, condutividade do óleo, LCM

1.0 - INTRODUÇÃO

A norma IEC 61620 [1] descreve um método para líquidos isolantes que mede a condutância (G) e a capacitância (C) permitindo que se determine, de forma indireta, a tangente delta ($\tan\delta$), em valores da ordem de 10^{-6} . Esta norma pode ser aplicado tanto para líquidos isolantes novos quanto para usados.

A avaliação da qualidade do óleo isolante em equipamentos elétricos de subestações do setor elétrico, como transformadores e OLTCs, pode ser realizada em campo empregando-se um medidor portátil de condutividade de duas formas: 1) *offline* - que utiliza para as avaliações uma pequena amostra de óleo extraída do equipamento (cerca de 200 mL) para sua cela de teste onde se faz a leitura da condutividade (em pico Siemens por metro - pS/m), 2) *online*, em que uma cela de fluxo é conectada ao sistema de circulação de óleo do ativo e assim realiza a medida em tempo real. A condutividade do óleo isolante está correlacionada com outras propriedades como, por exemplo, $\tan\delta$, fator de potência, as quais são obtidas em medições que demandam envio de amostra preservada ao laboratório. A condutividade, da mesma forma como as outras grandezas tradicionais, serve para avaliar a qualidade do óleo isolante, porém, no caso do uso do equipamento LCM (*Liquid Conductivity Meter*) – 8716 (Alff Engineering – Suíça), esta avaliação é rápida, de fácil amostragem e dispensa envio de amostras preservadas para o laboratório. Os valores típicos de referência para classificação do estado de degradação do óleo mineral isolante, a temperatura ambiente, com base na medição da condutividade estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de referência para óleo mineral isolante, a temperatura ambiente, conforme manual do fabricante.

Condição do Óleo	Condutividade (σ) – pS/m
Novo com qualidade para análise laboratorial	$\leq 0,05$
Novo e não usado com qualidade industrial	0,05 a 0,1
Pouco usado, em bom estado	0,1 a 1,0
Usado, em bom estado	1,0 a 5,0
Usado, em mal estado	$> 5,0$

O equipamento LCM portátil e seus acessórios para utilização em campo estão ilustrados na Figura 1.

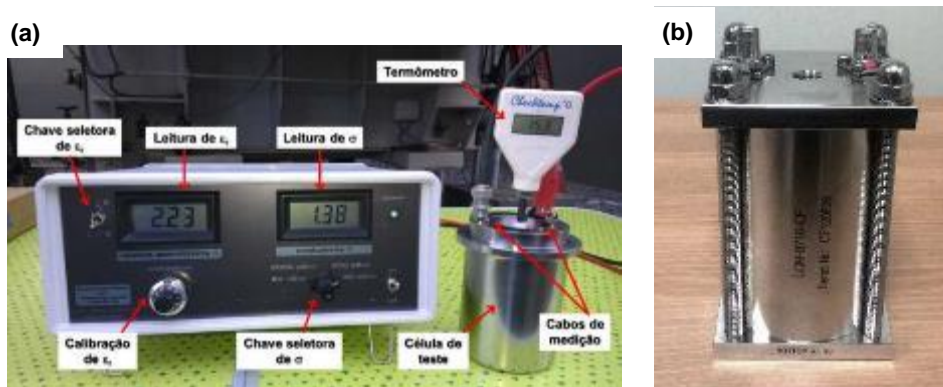


FIGURA 1 – (a) Equipamento LCM – modelo 8716 com e cela para testes *offline*, com exemplo de medição da condutividade em óleo mineral isolante, recém extraído de transformador de potência, - (b) Vista da cela para medidas em fluxo – modo *online*.

2.0 - DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO ENVOLVIDO NO EQUIPAMENTO DE LCM

Partindo-se da premissa de que um líquido isolante (no caso o óleo mineral ou vegetal isolante) é um dielétrico apolar com uma configuração de eletrodos planos com área A e separados por uma distância d , a capacitância é dada por:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde $\varepsilon = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r$, sendo que ε_0 é a permissividade no vácuo com valor de $8,85 \times 10^{-12}$ F/m e ε_r é a permissividade relativa do meio, neste caso do isolante. Isolantes reais apresentam sempre uma dada condução que, no caso mais simples é descrito por uma resistência R em paralelo com a capacitância C , independente da frequência com valor $R = \rho L/A$, sendo ρ , a resistividade do líquido ou, de outra forma, $R = L/\sigma A$, com σ representando a condutividade. A aplicação de uma tensão senoidal com frequência angular de $\omega = 2\pi f$, ao circuito RC produz uma corrente capacitiva I_C , que está 90° elétricos adiantada da tensão V , com amplitude $I_C = V/R$. Essas correntes podem ser visualizadas na Figura 2.

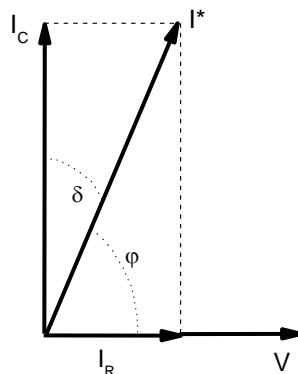


FIGURA 2 - Representação vetorial das correntes e ângulos.

A corrente total I^* está adiantada de V por um ângulo de $\varphi = 90 - \delta$ denominado ângulo de perdas e o valor de $\tan\delta$, denominado fator de perdas ou dissipação dielétrica. Da Figura 2, $\tan\delta = I/R C \omega$. Se nesta equação R for substituído por $R = L/\sigma A$ e C pela equação 1, ter-se-á a seguinte equação rearranjada:

$$\tan\delta = \frac{\sigma}{\varepsilon\omega} \quad (\text{Eq. 2})$$

Desta forma, pode-se relacionar o fator de dissipação com a condutividade elétrica do material. O fator de potência - definido como o cosseno do ângulo de fase entre a intensidade de campo alternado e densidade de corrente - pode ser determinado de forma similar¹:

¹ Para bons isolantes como óleos novos, o fator de potência e $\tan\delta$, têm valores numéricos baixos e quase idênticos.

$$\cos\phi = \frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + (\epsilon_r \epsilon_0 2\pi f)^2}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Em se tratando de óleos isolantes, os valores medidos de $\tan\delta$ e σ são muito pequenos. Usualmente as medições são realizadas em altas temperaturas, pois os valores são extremamente dependentes da mesma, numa relação exponencial. Tradicionalmente, os valores de $\tan\delta$ são medidos por pontes de medição, automáticas ou não, de alto custo e invariavelmente posicionadas em laboratórios químicos. A medição da condutividade é de difícil obtenção em temperaturas baixas, pois dependendo do estado do óleo apresentam valores menores que 1 pS/m ou em termos de resistividade, 1 G Ω .m. Diversos estudos realizados [2-6] mostraram a aplicabilidade de um método de medição denominado método de onda quadrada, culminando com a publicação da norma IEC 61620 [1]. O princípio de operação é efetuar a medição de ambas as correntes, capacitiva e de condução, através da aplicação de uma onda alternada quadrada a uma célula ou cuba de ensaio. A corrente capacitiva é medida durante a subida da tensão e a corrente de condução durante o período estável da tensão, como mostrado na Figura 3.

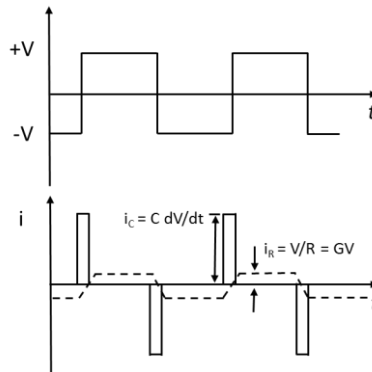


FIGURA 3 - Princípio de operação do método de onda quadrada.

Instrumentos de medição em conformidade com a IEC 61620, foram desenvolvidos e disponibilizados, como no caso do já citado LCM, para obtenção dos resultados de σ (em pS/m) de forma a tornar possível o cálculo de $\tan\delta$, em temperatura ambiente, de modo portátil, que é condição fundamental para medições em campo. A temperatura desempenha papel fundamental no cálculo da $\tan\delta$, pois seu aumento promove o aumento da condutividade e, conseqüentemente, da $\tan\delta$, conforme ilustra a Figura 4 [7].

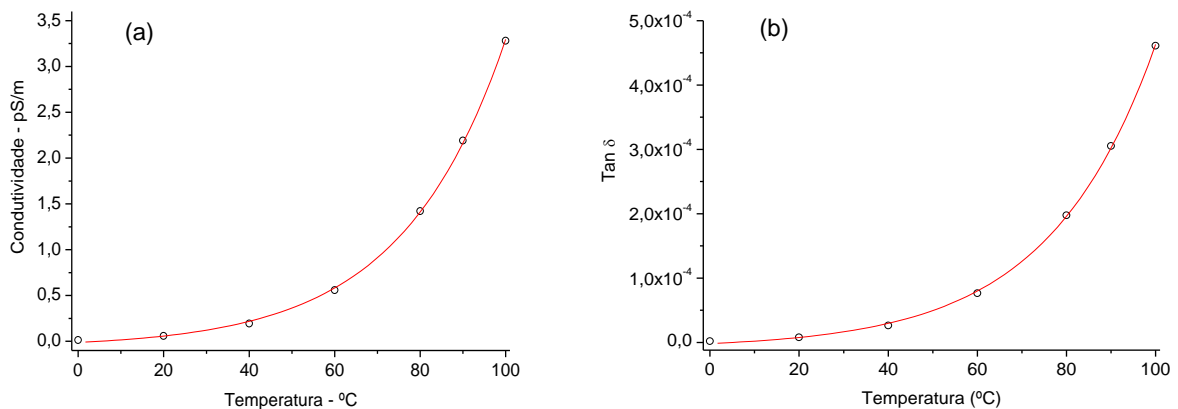


FIGURA 4 - (a) condutividade (em pS/m), - (b) $\tan\delta$. Neste exemplo, as curvas são referentes a óleo mineral isolante novo. Os valores foram retirados do *software LCM Calculator v. 3.0*, com permissividade relativa de 2,23.

3.0 - RESULTADOS

3.1 Módulo de medição online para qualidade do óleo isolante de oltc

O emprego com sucesso do uso do LCM para a qualidade do óleo isolante de transformadores de potência, seja em medições *offline* quanto *online*, realizada pelo grupo de pesquisa em projeto de P&D (8,9), motivou o desenvolvimento e a implementação de um IED - *Intelligent Electronic Device*, para motiramento de qualidade óleo isolante de OLTC - *On Load Tap Changer*. O IED permite que o LCM seja acoplado ao painel de controle do OLTC possibilitando, em tempo real, a avaliação da qualidade de seu óleo mineral isolante. Pode ser instalado em OLTCs com sistema de filtragem e, neste caso, se vale da bomba do próprio sistema ou em OLTCs mais antigos, que não possuam sistema de filtragem, sendo aqui o módulo equipado com uma pequena bomba de circulação. O dispositivo possibilita também a estimativa da eficácia do sistema de filtragem que é acionado pelo número de operações do OLTC, podendo indicar

não somente falhas no sistema de isolamento, mas também da vida útil do sistema de filtragem. O dispositivo monitora a qualidade do óleo, via condutividade, frente aos vários ciclos de operação que o comutador realiza. Dessa forma, é possível acompanhar a evolução da degradação da isolamento líquida e se antecipar para a substituição de seu filtro e/ou óleo isolante, garantindo níveis ainda mais seguros de trabalho para este ativo, pela ação preditiva. Este sistema está sendo implementado dentro do escopo do projeto de pesquisa da Copel/USP (P&D ANEEL PD-6491-0247/2012). O IED foi implementado e testado em um comutador da MR do BRASIL, cujo óleo mineral foi substituído recentemente, sendo a primeira unidade instalada na área piloto (SE Pilarzinho) da Copel, em Curitiba, em um transformador de 230 kV da transmissão, conforme ilustra a Figura 5.



FIGURA 5 - (a) bastidor do IED instalado no transformador de 230 kV, na SE Pilarzinho da COPEL GeT, em Curitiba - (b) *close-up* do bastidor aberto ilustrando as conexões em fluxo e sensores.

O sistema é formado por uma cuba em fluxo, instalada no circuito de circulação do óleo do comutador da MR, sendo que o sinal da cuba é enviado para o LCM, que mede a condutividade e a permissividade relativa do líquido isolante a temperatura ambiente. A instalação do ponto de amostragem do óleo antes de sua passagem pelo filtro permite que seja avaliada uma amostra cujas impurezas resultantes do ciclo de carga do comutador ainda estejam presentes no óleo. Além disso, o sistema conta com sensor Pt100 para temperatura do óleo, filtro de partículas, sensor de umidade relativa e módulo de comunicação, para envio remoto de dados ao sistema de monitoramento *online*. As Figura 6 e 7 ilustram, respectivamente, as conexões para o fluxo de óleo e arranjo dos diversos equipamentos dentro do bastidor.

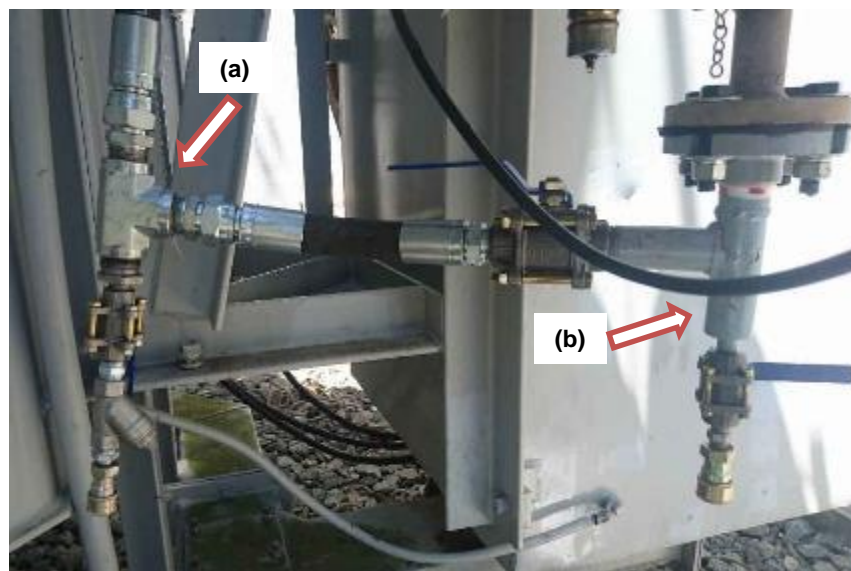


FIGURA 6 - (a) conexão "T" para fluxo de óleo antes da entrada do filtro do comutador. - (b) conexão "T" para retorno do fluxo de óleo ao filtro do comutador após análise pela cela em fluxo.

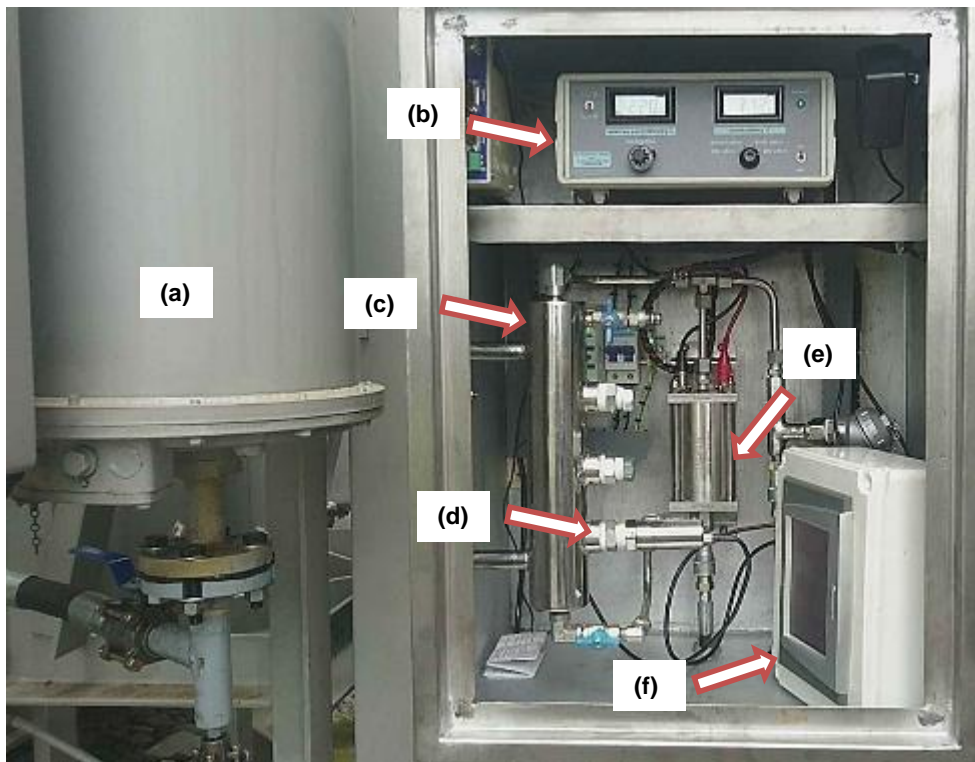


FIGURA 7 - (a) filtro de óleo do comutador da MR do BRASIL - (b) LCM – (c) filtro de partículas – (d) sensor de umidade e temperatura – (e) cela em fluxo para medida de condutividade – (f) módulo de comunicação para envio de dados ao sistema de monitoramento.

3.2 Comunicação remota

A incorporação do módulo de comunicação com CLP acoplado, permite que tais dados sejam adquiridos e enviados a um sistema de monitoramento e este, por sua vez, ser acesso remotamente para avaliação dos dados, os quais ainda podem ser transformados em gráficos, para melhor visualização da condição do óleo isolante em função ao longo do tempo. A figura 8, ilustra um exemplo de medição gráfica de 24 horas que pode ser visualizado *online* em navegador de internet, com os eixos da abcissa e ordenada representando, respectivamente, as horas do dia e os valores das grandezas aquisitadas.

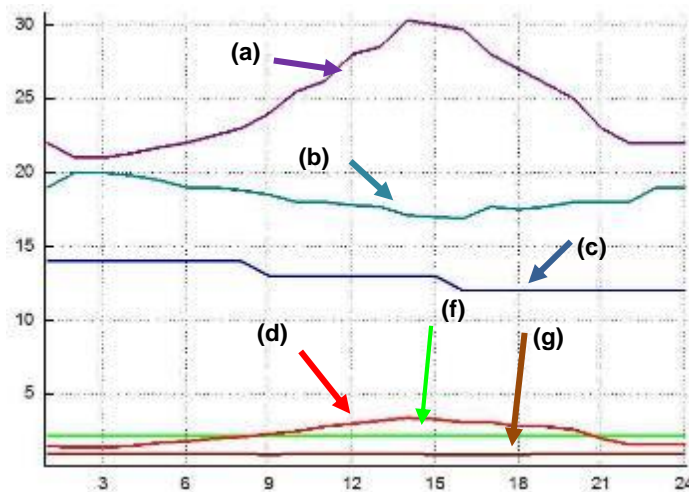


FIGURA 8 – Exemplo de medições online no supervisório implementado para monitoramento *online* de grandezas do óleo de comutador. –(a) curva para temperatura (°C); –(b) curva para saturação relativa (%); –(c) curva teor de água (ppm); –(d) curva para a condutividade (pS/m); –(e) curva para permissividade relativa; –(f) tangente delta (%).

3.3 Avaliação dos valores das medições de condutividade e fator de potência (%) *online*

Com o emprego da IEC 61620 na avaliação da qualidade do óleo isolante via LCM, se tem a vantagem de calcular o fator de perdas dielétricas percentual a qualquer temperatura, de forma *online*. Como visto na equação 3, o fator de potência pode ser calculado a partir do valor de condutividade do óleo isolante. Há duas formas de se conhecer a condutividade a dada temperatura: 1) aquecendo-se a amostra até a temperatura desejada; 2) estimando sua condutividade através da energia de ativação e assim dispensando o aquecimento da amostra. A energia de ativação se relaciona com a condutividade como mostrado no exemplo da equação 4.

$$\sigma_{100} = \sigma_{20} \exp \left(-\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{100}} - \frac{1}{T_{20}} \right) \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

onde E_a é a energia de ativação, e k é a constante de Boltzmann com valor de $8,62 \times 10^{-5}$ eV/K, sendo K a temperatura em Kelvin e T_{100} e T_{20} as temperaturas medidas a 100 e 20 °C, respectivamente.

Por exemplo, no caso de óleo mineral isolante, os valores de E_a variam de 0,355 a 0,422 eV para óleos usados e de 0,466 a 0,484 eV, para óleos novos. Dessa forma, os valores médios para óleos novos e usados são, respectivamente, 0,475 e 0,389 eV. Estes são valores médios obtidos através de um número bastante expressivo de amostras. Evidentemente que para valores mais precisos de E_a , há a necessidade de realizar o aquecimento da amostra a fim de se obter a E_a para determinada amostra. Todavia, verifica-se que os valores de CV% (coeficiente de variação) para os valores médios de óleos novos e usados são, respectivamente, 2,7 e 12,2%. Sendo assim, basta implementar os valores médios de E_a no cálculo de fator de potência, via condutividade, e se obtém seu valor em qualquer temperatura.

A NBR 10576 de 2006, indica que o óleo do comutador deve ter os mesmos valores de referência do óleo do equipamento. Como o comutador está instalado em um transformador de 230 kV seus valores máximos de fator de perdas percentual, para óleos novos, são os seguintes: a 25°C – 0,05%; a 100°C – 0,60% (10). A Tabela 2 ilustra os resultados do fator de potência % para o óleo do comutador que está sendo estudado.

Tabela 2 - Valores do fator de potência % calculado para o óleo mineral isolante do comutador da MR do BRASIL.

Permissividade relativa	Condutividade do óleo* (pS/m)	Fator de potência calculado a 25 °C (%)	Fator de potência calculado a 100 °C (%)
2,20	3,03	0,02	0,60

*Condutividade referente a temperatura medida de 35 °C, da amostra de óleo.

Como pode-se verificar na Tabela 2, os valores encontrados foram calculados a partir de uma medição de condutividade a 35°C, mas utilizando o valor de E_a para óleo mineral novo e a equação 4 foi possível recalculá-los os valores de fator de potência para as temperaturas estipuladas na NBR 10576. Verifica-se pelos valores encontrados que o óleo isolante do comutador está em bom estado de uso, pois os valores estão em concordância tanto com a NBR 10576, quanto com os valores de referência do LCM. Vale ressaltar que o óleo analisado pelo LCM é o da entrada do filtro do comutador, ou seja, é uma amostra sem qualquer filtragem, contendo todos os contaminantes provenientes do faiscamento dos ciclos de carga, que faz com que a bomba do comutador atue e o óleo seja filtrado, ou seja o arranjo demonstra robustez para a realização das medições.

4.0 - CONCLUSÃO

A avaliação preliminar do dispositivo indicou bons resultados para a integração das medidas *online* - em especial da condutividade e fator de potência % a qualquer temperatura, com a vazão do sistema de comutação, além da precisão dos resultados para a qualidade do óleo. Ainda, dado o acompanhamento da evolução da degradação da isolação líquida é possível se antecipar para a substituição de seu filtro e/ou óleo isolante e, assim, garantir níveis bastante seguros de trabalho para este ativo, através da ação preditiva. Desta forma, esta implementação se mostra promissora como um futuro componente a ser incorporado em comutadores como item de fábrica.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEC 61620 – Insulating liquids – Determination of the dielectric dissipation factor by measurement of the conductance and capacitance – test method. 1st edition, Nov. 1998.
- (2) BERGER, N.; FILIPPINI, J.C.; TOBAZÉON, R. Progress in the determination of the dissipation factor $\tan\delta$ or the resistivity ρ of dielectric liquids. *Electra*, n. 185, Aug, 1999.
- (3) LI, Y.; RUNGIS, J.; HEYDON, R. conductivity of liquid dielectrics measured with the square wave voltage method, International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Graz, 1995.
- (4) DIABI, R.; FILIPPINI, C.; MARTEAU, C.; TOBAZÉON, R. On the role of temperature and impurities in the low field conduction of insulating liquids. International conference on Conduction and Breakdown in dielectric liquids (ICDL), Rome, 1996.
- (5) LI, Y.; RUNGIS, J.; HEYDON, R. The square wave voltage method for the measurement of low-level $\tan d$ of liquid dielectrics. International Conference on Properties and Applications of Dielectric, Seoul, 1997.

- (6) Tobazéon, R.; Filippini C.; Marteau, C. On the measurement of conductivity of highly insulating liquids. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 1, n. 6, Dec. 1994.
- (7) U. GÄFVERT, "Modeling of Dielectric Measurements on Power Transformers", CIGRE 1998, SC15 - Rep. 15-103.
- (8) P&D ANEEL CEB 0057 – "Sistema de diagnóstico com técnicas avançadas de avaliação quantitativa e qualitativa do estado de transformadores de potência com vistas à degradação por contaminantes no sistema de isolamento (sólido-líquido), integrados a sistemas alternativos de ações de recuperação do seu estado de degradação e a sistemas de monitoramento de estado". Início: 2012 e Término: 2015.
- (9) P&D ANEEL COPEL GeT/DIS 6491-0247/2012 – "Monitoramento de transformadores de potência em subestações aplicando técnicas de diagnóstico de degradação e ações corretivas para extensão da sua vida útil". Início: 2015 e Término: 2018.
- (10) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 10576: Guia para acompanhamento de óleo mineral isolante de equipamentos elétricos. ABNT, 2006, Brasil.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

HUMBERTO DE ALENCAR PIZZA DA SILVA

Floraí/PR – 22 de setembro de 1964

Graduação: São Paulo/SP – 1989 / Pós-Graduação: São Paulo/SP – 2011.

Graduado em Engenharia Industrial Elétrica pela Universidade São Judas Tadeu (1989), mestrado em Energia pela Universidade de São Paulo (IEE-USP) em 2005 e doutorado em Energia pela Universidade de São Paulo (IEE-USP) em 2011. Atualmente é pesquisador na Universidade de São Paulo, na Escola Politécnica e no Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, Energias Renováveis, Sistemas de Distribuição Subterrâneo, Redes Inteligentes (*Smart Grids*), Geração Distribuída, Fontes alternativas de geração, atuando principalmente nos seguintes temas: gerenciamento de ativos, monitoramento, controle, proteção, diagnóstico de equipamentos elétricos, sistemas especialistas.