



**XXIII SNPTEE
SEMÍNÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GTM/27
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – XIII

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

**PROTÓTIPO DE SISTEMA PARA MEDIDA DE CORRENTE DE POLARIZAÇÃO EM ÓLEOS ISOLANTES DE
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

**Guilherme Cunha da Silva(*)
INSTITUTOS LACTEC**

**Vitoldo Swinka Filho
INSTITUTOS LACTEC**

**Sebastião Ribeiro Júnior
INSTITUTOS LACTEC**

**Daniel de Andrade Ussuna
INSTITUTOS LACTEC**

**Juliano de Andrade
INSTITUTOS LACTEC**

**Renatto Vaz Carvalho
INSTITUTOS LACTEC**

**Mário Carlos Andreoli
CTEEP**

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento e validação de um protótipo de sistema de medida de corrente de polarização que permite monitorar a resistividade volumétrica de óleos isolantes e auxiliar no diagnóstico da isolação de transformadores de potência. O protótipo é constituído por instrumentação eletrônica, célula de medida e software. Foram realizados testes de validação em laboratório com amostras de óleo isolante mineral novo e envelhecido aceleradamente e naturalmente. Foi mostrado que quando a resistividade volumétrica é reduzida duas ordens de grandeza outras características físico-químicas do óleo (por ex. baixa tensão interfacial) indicam estado avançado de degradação da isolação.

PALAVRAS-CHAVE

Corrente de polarização, diagnóstico, óleo mineral isolante, protótipo, transformadores.

1.0 - INTRODUÇÃO

Durante a vida útil dos transformadores de potência o sistema de isolação, normalmente constituído de papel-óleo, fica sujeito a uma série de processos de envelhecimento e degradação. Efeitos de fadiga térmica, química, elétrica e mecânica, tais como pontos quentes, sobreaquecimento, sobretensões e vibrações acabam resultando no aparecimento de significativas alterações no papel isolante e no óleo isolante. Sendo assim, faz-se necessário realizar a manutenção preventiva dos equipamentos com o objetivo de minimizar falhas e diminuir os custos da manutenção corretiva (1).

Um dos dielétricos líquidos comumente utilizado nos sistemas de isolação de transformadores é o óleo mineral isolante. Entre os testes realizados periodicamente para manutenção preventiva de transformadores estão os ensaios físico-químicos no óleo mineral isolante, tais como teor de água, índice de neutralização, tensão interfacial, perdas dielétricas em 60 Hz e rigidez dielétrica. Quando os valores medidos atingem os valores limites pré-estabelecidos nas normas vigentes o óleo mineral isolante é regenerado ou substituído (2).

O outro componente do sistema de isolação é um dielétrico sólido, geralmente o papel isolante. Quando este encontra-se em estágio avançado de degradação não há possibilidade de troca ou recuperação e, por esta razão é comum dizer que a condição do papel isolante tem uma importância relevante na determinação do tempo de vida útil dos transformadores. O papel isolante também pode ser avaliado por meio de ensaios, tais como o ensaio de grau de polimerização. Todavia, como na prática é inviável a coleta de papel isolante de transformadores em operação a avaliação do grau de degradação é realizada por meio de medidas indiretas, entre as quais a análise de compostos furânicos. Dos compostos furânicos o 2-furfuraldeído (2-FAL) é o indicador químico mais utilizado para avaliação de sistemas óleo mineral isolante-papel convencional. Por outro lado, pesquisas mostram que o 2-

FAL não é um indicador químico eficiente quando se trata da avaliação de sistemas óleo mineral isolante-papel termoestabilizado (3)-(4).

Além dos parâmetros físico-químicos é de fundamental importância monitorar as características elétricas do óleo mineral isolante durante o envelhecimento, uma vez que são estas que determinam a suportabilidade elétrica do dielétrico líquido. É prática comum avaliar em laboratório parâmetros como o fator de perdas e a rigidez dielétrica, ambos na frequência industrial. Todavia, a medida destes parâmetros em uma frequência única não é considerada eficaz para monitorar o estado de degradação do óleo (5). A alternativa que tem sido pesquisada para tal fim é o monitoramento da degradação do sistema de isolamento por meio de técnicas dielétricas no domínio da frequência utilizando, por exemplo, a técnica de espectroscopia dielétrica (6)-(7) ou no domínio do tempo utilizando, por exemplo, medidas de corrente de polarização (8)-(9).

Neste artigo está apresentado o desenvolvimento e validação de um protótipo de sistema de medida de corrente de polarização que utiliza a resistividade volumétrica como parâmetro para acompanhamento da degradação de sistemas óleo mineral isolante-papel termoestabilizado utilizados em transformadores. Tal desenvolvimento foi realizado dentro de um projeto de pesquisa intitulado "Desenvolvimento de metodologias físico-químicas e dielétricas para avaliação da condição de sistemas papel-óleo utilizados em equipamentos de subestação", realizado pelos Institutos LACTEC e CTEEP dentro do programa de pesquisa e desenvolvimento da ANEEL.

2.0 - EXPERIMENTAL

Este item está dividido em duas etapas, a saber: 1 - medidas de corrente de polarização e 2 - desenvolvimento do protótipo e testes de validação.

2.1 Medidas de corrente de polarização

Para teste e validação da medida de corrente de polarização como técnica de avaliação da degradação do sistema de isolamento papel-óleo, assim como para definição de parâmetros de teste e desenvolvimento do projeto conceitual do protótipo foram utilizadas amostras constituídas por óleo mineral isolante novo e sistemas óleo mineral isolante/papel termoestabilizado envelhecidos aceleradamente em laboratório em diferentes temperaturas (100 °C e 125 °C).

A Figura 1 mostra o arranjo experimental utilizado nas medidas de corrente de polarização. Este é constituído de fonte DC Systron Donner, modelo RS 320-2C; eletrômetro Keithley, modelo 6514; célula de medida de dielétricos líquidos Solartron, modelo 12962 e computador/ software para aquisição e tratamento de dados. O software foi desenvolvido pelos pesquisadores para atendimento ao desenvolvimento do protótipo.



FIGURA 1 - Arranjo experimental para medidas de corrente de polarização.

A medida consiste na aplicação de uma tensão DC na amostra durante um determinado período de tempo e medição da corrente de polarização. Nesta parte do trabalho as medidas de corrente de polarização foram realizadas em amostras de 2,5 ml de óleo mineral isolante novo e envelhecido aceleradamente em laboratório nas temperaturas de 100 °C e 125 °C. Os parâmetros de teste utilizados foram: tensão aplicada de 100 VDC, distância entre eletrodos de 200 µm e tempo de teste de 600 s (10 min), com uma taxa de amostragem de 1 amostra/s.

As Figuras 2 e 3 apresentam os resultados das medidas realizadas no sistema óleo mineral isolante-papel termoestabilizado envelhecido a 100 °C por 135 dias e no sistema óleo mineral isolante-papel termoestabilizado envelhecido a 125 °C. Foram também realizadas avaliações do óleo mineral isolante novo. Nas Figuras 2 e 3 o eixo y da esquerda apresenta os valores de corrente de polarização das amostras de óleo mineral isolante novo (branco) e envelhecido a 15 dias e o eixo y da direita mostra os valores de corrente de polarização das amostras de óleo dos demais períodos de envelhecimento. Nestes gráficos também está indicada a resistência de isolamento de

cada amostra no tempo $t = 600$ s. Este tempo foi escolhido pelo fato da corrente de polarização tender a atingir um valor constante neste ponto.

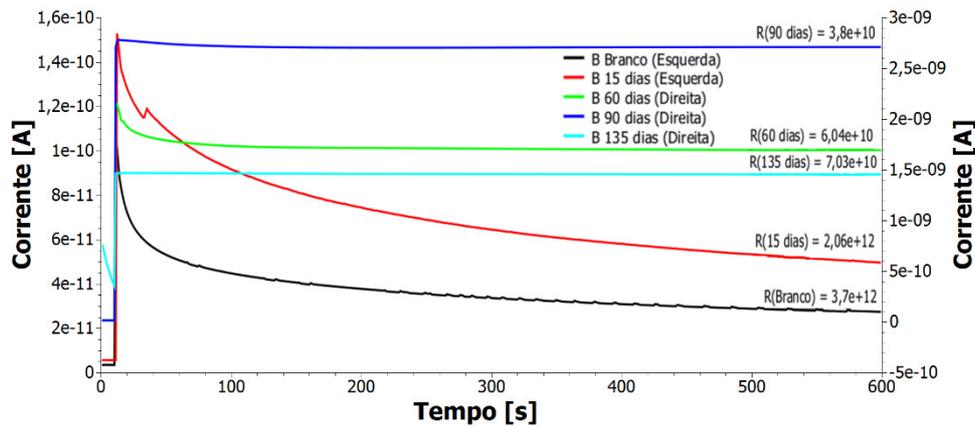


FIGURA 2 - Sistema óleo mineral isolante-papel termoestabilizado envelhecido na temperatura de 100 °C para diferentes períodos.

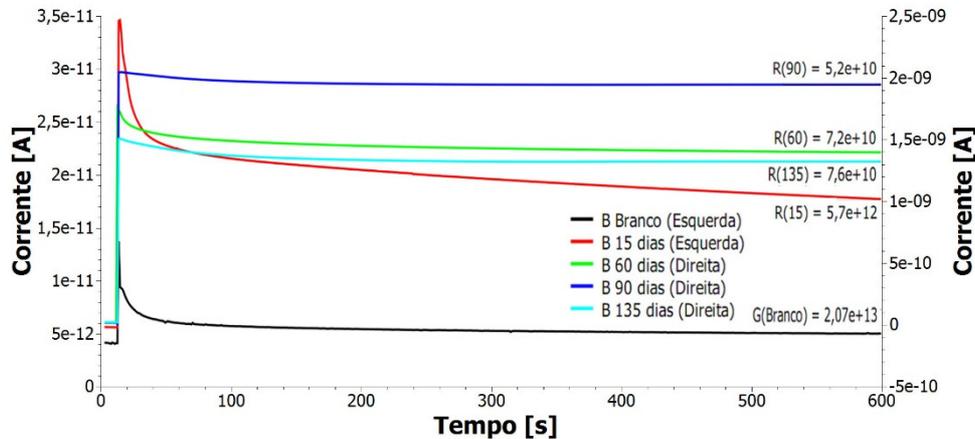


FIGURA 3 - Sistema óleo mineral isolante-papel termoestabilizado envelhecido na temperatura de 125 °C para diferentes períodos.

A Figura 4 apresenta a variação da resistividade volumétrica das amostras de óleo mineral isolante em função do tempo de envelhecimento, para as temperaturas de 100 °C e 125 °C. Estes valores foram calculados a partir do valor da tensão aplicada (100 V), do valor da corrente de polarização no tempo $t = 600$ s e dos parâmetros geométricos da célula. A medida do óleo mineral isolante novo está representada no tempo $t = 0$ dias. Pode ser visto que nas duas temperaturas testadas houve uma redução de aproximadamente 2 ordens de grandeza no valor da resistividade volumétrica para períodos de envelhecimento em laboratório acima de 60 dias.

A fim de validar a utilização do parâmetro resistividade volumétrica para avaliação da degradação de sistemas de isolamento papel-óleo foram realizados, de forma simultânea às medidas dielétricas, ensaios de grau de polimerização (GP) do papel e de tensão interfacial do óleo mineral isolante. A Figura 5 apresenta os resultados comparativos das medidas de GP, tensão interfacial e resistividade volumétrica para a temperatura de 100 °C. Pode ser observado que a resistividade volumétrica, o GP e a tensão interfacial tendem a um decrescimento exponencial com o tempo de envelhecimento. Todavia, a resistividade volumétrica tende a estabilizar na faixa de 10^{10} $\Omega \cdot m$ a partir de 60 dias de envelhecimento. Neste ponto a medida de GP está na faixa de 400, indicando que o papel já está em elevado estágio de degradação e o óleo mineral apresenta tensão interfacial menor do que 20 dina/cm, o que indicaria necessidade de regeneração do mesmo. Estes resultados sugerem que a resistividade volumétrica seja um parâmetro eficiente para avaliação da degradação de sistemas de isolamento papel-óleo. Um comportamento similar foi observado nas medidas realizadas na temperatura de 125 °C.

A partir dos resultados obtidos foram definidos alguns pontos para o desenvolvimento do protótipo:

- Metodologia: medida de corrente de polarização;
- Parâmetros de teste: tensão aplicada de 100 VDC, distância entre eletrodos de 200 μm e tempo de teste de 600 s (10 min);
- Parâmetro de avaliação: resistividade volumétrica;

- Constituição do protótipo: fonte DC, eletmetro (ou similar) para medida de corrente de polarização, célula de medida e computador (ou similar) com software dedicado para aquisição e tratamento de dados.

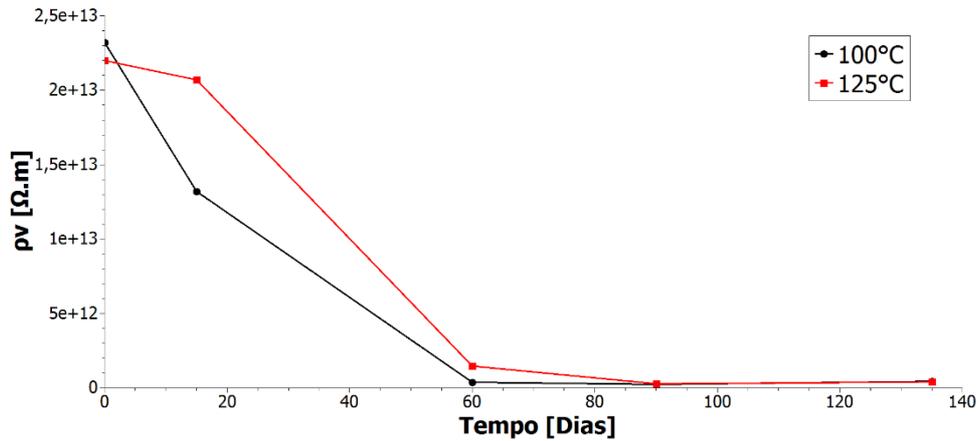


FIGURA 4 - Variação da resistividade volumétrica do óleo em função do tempo de envelhecimento para diferentes temperaturas (100 °C e 125 °C).

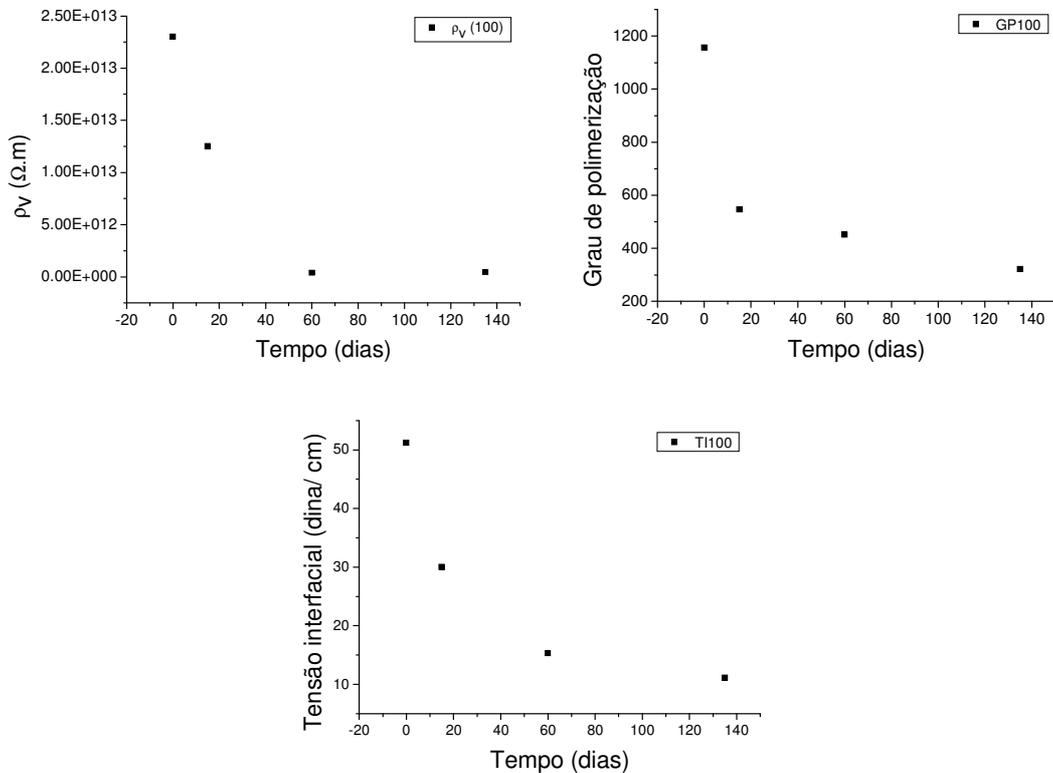


FIGURA 5 - Valores de resistividade volumétrica, GP e tensão interfacial para o sistema óleo mineral isolante-papel termoestabilizado na temperatura de 100 °C.

2.2 Desenvolvimento do protótipo e testes de validação

Com as definições supracitadas foram desenvolvidas as seguintes partes do protótipo: célula de medida de dielétricos líquidos, instrumentação eletrônica para aplicação de tensão e medida de corrente de polarização e software para aquisição e tratamento de dados.

2.2.1. Célula de medida de dielétricos líquidos

A célula de medida de dielétricos líquidos desenvolvida está apresentada na Figura 6. Esta é formada por dois eletrodos inseridos em um cilindro metálico, que proporciona a blindagem da célula. A isolamento dos eletrodos com o cilindro externo foi confeccionada com teflon. A distância entre eletrodos é fixa, não necessitando de ajuste para

realização das medidas. Pelo fato da célula ser blindada não há necessidade de realização das medidas em gaiola de Faraday.



FIGURA 6 - Célula de medida de dielétricos líquidos.

2.2.2. Instrumentação eletrônica

A instrumentação eletrônica foi projetada de modo a permitir que um único instrumento realizasse a aplicação da tensão de polarização e a medida da corrente de polarização na amostra, substituindo assim equipamentos de grande porte e elevado custo como a fonte DC e o eletrômetro. O circuito de medida de corrente foi projetado para permitir a seleção de seis estágios de ganho e medição de correntes na faixa de 10^{-11} A à 10^{-6} A por meio de um amplificador eletrométrico. A tensão de polarização é fornecida pela aplicação de um conversor de tensão CC-CC de 100 V, com ajuste por meio do sinal de PWM de um microcontrolador. O microcontrolador desempenha também o papel de realizar a conversão digital do sinal de corrente medido pelo amplificador eletrométrico, ajustar as escalas de ganho do amplificador e transferir os dados para a porta de comunicação USB do computador.

Na Figura 7 está apresentado o dispositivo com a instrumentação eletrônica desenvolvida para aplicação de tensão e medida da corrente de polarização, o qual utiliza componentes eletrônicos com tecnologia SMD. Estes componentes apresentam dimensões reduzidas, o que possibilita minimizar influências elétricas parasitas, assim como a compactação do circuito. A conexão do circuito com a célula de medida é realizada utilizando cabos coaxiais com conectores BNC. O circuito desenvolvido não necessita de fonte de alimentação externa, pois a conexão com a porta USB é suficiente para fornecer energia para o sistema.

Para validar o sistema de medida de corrente de polarização, denominado daqui por diante de MCP, foram aplicados os mesmos procedimentos de medida de corrente de polarização do item 2.1. Para cada amostra de óleo foram efetuadas medidas de corrente de polarização com dois sistemas distintos: a) eletrômetro Keithley, modelo 6514 e b) MCP. O protótipo desenvolvido está apresentado na Figura 8.

A aquisição e tratamento de dados foi realizada por meio de software desenvolvido especificamente para aquisição e tratamento dos dados de medida de polarização. Este possui interface amigável, de fácil utilização e permite exportar os dados com extensão CSV. Decorridos 600 s do processo de medição o software calcula e apresenta na tela o valor da resistividade volumétrica.



FIGURA 7 - Dispositivo para aplicação de tensão e medição da corrente de polarização: (a) vista interna; (b) vista do sistema completo, incluso cabo USB.

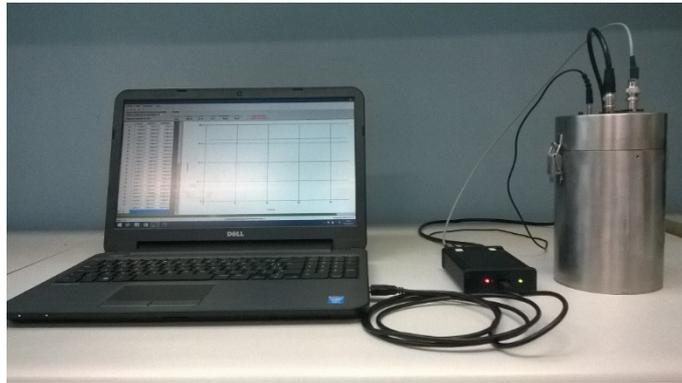


FIGURA 8 – Protótipo de sistema de medida de corrente de polarização (MCP): software, instrumentação eletrônica e célula de medida.

Nesta etapa de validação foram testadas quatro amostras de óleo isolante:

- Óleo mineral isolante novo;
- Óleo mineral isolante envelhecido em laboratório, 125 °C, 135 dias;
- Óleo mineral isolante coletado de transformador em operação, 13,8 kV/ 150 kVA (caso 1);
- Óleo mineral isolante coletado de transformador em operação, 13,2 kV/ 750 kVA (caso 2).

As Tabelas 1 e 2 apresentam algumas características físico-químicas dos óleos minerais isolantes coletados de transformadores em operação.

TABELA 1 - Características do OMI de transformador 13,8 kV/ 150 kVA (caso 1)

Ensaio	Resultado	Valor de referência
Índice de neutralização (mg de KOH/g de óleo)	0,15	0,15
Teor de água (ppm)	28	Máx. 35
Fator de potência (% a 100 °C)	13,5	Máx. 15
Tensão interfacial (dina/cm)	14,8	Mín. 18

TABELA 2 - Características do OMI de transformador 13,8 kV/ 750 kVA (caso 2)

Ensaio	Resultado	Valor de referência
Índice de neutralização (mg de KOH/g de óleo)	0,23	0,15
Teor de água (ppm)	15	Máx. 35
Fator de potência (% a 100 °C)	3,8	Máx. 15
Tensão interfacial (dina/cm)	14,1	Mín. 18

Pode ser notado que para o caso 1 o índice de neutralização está no limite do valor de referência estabelecido em norma e no caso 2 o índice de neutralização ultrapassou o valor de referência. Para o óleo mineral isolante envelhecido em laboratório (125 °C, 15 dias) o índice de neutralização obtido foi de 0,20.

Os resultados das medidas de corrente de polarização realizadas com o eletrômetro Keithley, modelo 6514 e com o MCP para os casos de óleo mineral novo, envelhecido em laboratório e coletado de campo estão apresentados na Tabela 3 e Figuras 8 a 10.

TABELA 3 - Resultados das medidas de corrente de polarização com equipamento Keithley, modelo 6514 e protótipo desenvolvido (MCP)

Parâmetro	Amostra	Keithley 6514	MCP
Corrente (A)	Novo	$1,8 \times 10^{-11}$	$1,3 \times 10^{-10}$
	Env. em lab.: 125 °C, 135 dias	$6,7 \times 10^{-10}$	$7,8 \times 10^{-10}$
	Caso 1	$8,6 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-9}$
	Caso 2	$2,3 \times 10^{-9}$	$2,6 \times 10^{-9}$
Resistência de isolamento (Ω)	Novo	$5,6 \times 10^{12}$	$7,9 \times 10^{11}$
	Env. em lab.: 125 °C, 135 dias	$1,5 \times 10^{11}$	$1,3 \times 10^{11}$
	Caso 1	$1,2 \times 10^{11}$	$1,0 \times 10^{11}$
	Caso 2	$4,3 \times 10^{10}$	$3,8 \times 10^{10}$
Resistividade volumétrica ($\Omega \cdot m$)	Novo	$8,7 \times 10^{12}$	$1,2 \times 10^{12}$
	Env. em lab.: 125 °C, 135 dias	$2,3 \times 10^{11}$	$2,0 \times 10^{11}$
	Caso 1	$1,8 \times 10^{11}$	$1,6 \times 10^{11}$
	Caso 2	$6,8 \times 10^{10}$	$6,0 \times 10^{10}$

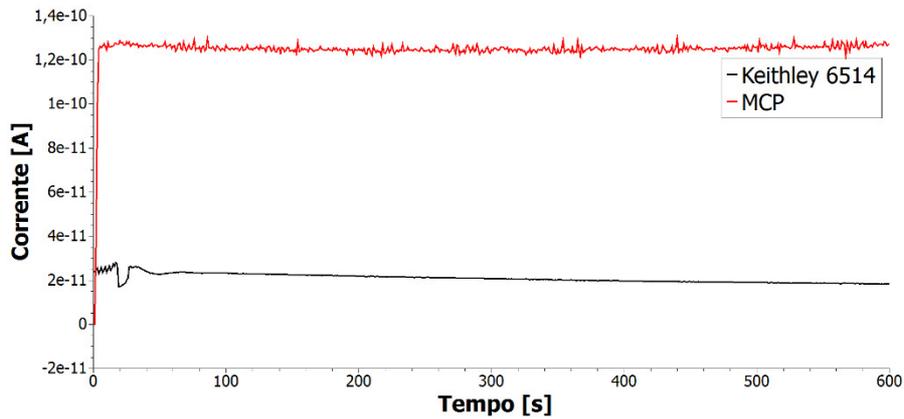


FIGURA 8 - Corrente de polarização para óleo mineral isolante novo.

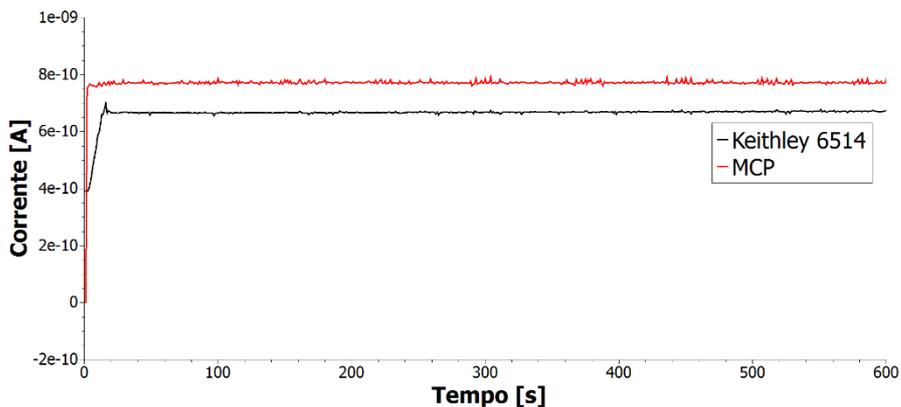


FIGURA 9 - Corrente de polarização para óleo mineral isolante envelhecido em laboratório.

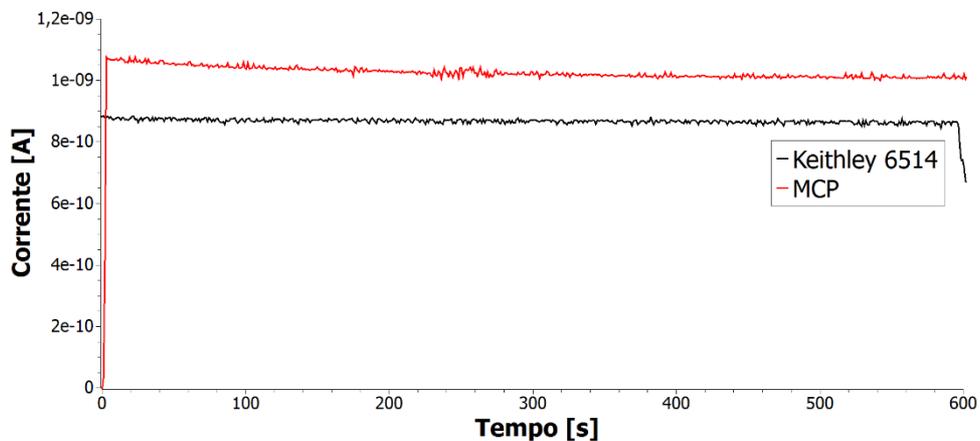


FIGURA 10 - Corrente de polarização para óleo mineral isolante retirado de transformador em operação (env. em campo 1).

Pode ser notado que:

- Para a amostra de óleo mineral isolante novo há uma pequena diferença no resultado obtido nos diferentes equipamentos. Tal fato leva a necessidade de aplicar um fator de correção no protótipo desenvolvido para esta condição. Apesar disto, a ordem de grandeza da resistividade volumétrica ficou na faixa de $10^{12} \Omega.m$ em ambos os casos;
- Para as amostras de óleo mineral envelhecido em laboratório ou coletado de campo os valores medidos nos diferentes equipamentos são muito similares;
- O resultado do óleo mineral isolante envelhecido em laboratório é muito próximo ao do óleo mineral isolante coletado de campo (caso 1);
- O óleo mineral isolante coletado em campo, com índice de neutralização acima da tolerância para óleo em uso (caso 2) apresenta valores de resistência de isolamento na faixa de $10^{10} \Omega.m$;

- A ordem de grandeza dos resultados obtidos durante os testes de validação é similar a obtida no item 2.1.

Após os testes de validação o protótipo desenvolvido teve patente depositada junto ao INPI, registro BR 10 2015 003025 8, sob o título “Sistema, instrumento de medição e célula de medida para análise de óleos isolantes”.

3.0 - CONCLUSÃO

Foi mostrado que a resistividade volumétrica, medida pela técnica de corrente de polarização, é um parâmetro eficaz para avaliação da degradação de sistemas papel-óleo.

Os parâmetros de teste definidos para as medidas de corrente de polarização foram: tensão aplicada de 100 VDC, distância entre eletrodos de 200 µm e tempo de teste de 600 s.

O protótipo desenvolvido tem como características ser compacto e de fácil uso. A instrumentação eletrônica desenvolvida, além de ser compacta e leve, não necessita de alimentação externa. Além disto, as medidas para obtenção da resistividade volumétrica são de curta duração. Um dos diferenciais do protótipo desenvolvido está relacionado com o procedimento de medição, isto é, a medida pode ser realizada em campo (por ex., na sala de comando da subestação) a partir de uma coleta de óleo convencional, sem necessidade de desligamento do transformador.

Para o protótipo ser transformado em um equipamento comercial para uso em larga escala faz-se necessário a continuidade da pesquisa em duas frentes: a) criação de um banco de dados com medidas de corrente de polarização e medidas físico-químicas de óleos isolantes de transformadores com distintos tempos de operação e b) otimização do protótipo em parceria com indústria.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ZIRBES, R.; ROLIM, J. G.; JURN, H. H. Metodologia para avaliação e diagnóstico do estudo de isolamentos de papel impregnado com óleo mineral. SBA Controle e Automação, v. 16, n. 3, 2005.
- (2) GRANATO, R. C.; TULLIO, L. Apostila de óleos isolantes (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento), 1991.
- (3) MARTINS, M. A. Furfuraldeído - Um Indicador Prático da Degradação Térmica do Papel Kraft de Transformadores. Ciência e Tecnologia de Materiais, v. 19, p. 25-33, 2007.
- (4) MARTINS, M. A. Monitorização da degradação térmica do papel isolante usado em transformadores: Papel "Thermally Upgraded" Versus Papel Kraft. Ciência e Tecnologia dos Materiais, v. 19, p. 14-18, 2007.
- (5) VAUGHAN, A. S.; HOISIER, I. L.; SUTTON, S. J.; DAVIS, F. J. On the Electrical Properties of Insulating Oils. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p. 221-224, 2005.
- (6) SUPRAMANIAM, G. K.; HUSSIEN, Z. F. Application of Frequency Domain Spectroscopy (FDS) in Assessing Dryness and Ageing State of Transformer Insulation Systems. 2nd IEEE International Conference on Power and Energy, p. 55-61, 2008.
- (7) BETIE, A.; MEGHNEFI, F.; FOFANA, I.; YEO, Z. On the impacts of ageing and moisture on dielectric response of oil impregnated paper insulation systems. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p. 219-222, 2012.
- (8) FOFANA, I.; HEMMATJOU, H.; MEGHNEFI, F. Effect of Thermal Transient on the Polarization and Depolarization Current Measurements of Oil-Paper Insulation. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, n. 2, p. 513-520, 2011.
- (9) FOFANA, I.; HEMMATJOU, H.; FARZANEH, M.; GOCKENBACH, E.; BORSI, H. Polarization and depolarization current measurements of oil impregnated paper insulation system under thermal runaway. IEEE International Conference on Solid Dielectrics, p. 1-4, 2010.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Guilherme Cunha da Silva nasceu na cidade de Porto Alegre/ RS em 14 de agosto de 1973. Possui graduação em Engenharia Industrial Elétrica pela FURB/SC (1997) e mestrado e doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais pela UFPR/PR (2000 e 2005, respectivamente). É Pesquisador Sênior nos Institutos LACTEC, atuando nas seguintes áreas: novos materiais e diagnóstico de envelhecimento e degradação de dielétricos aplicados em equipamentos e acessórios de linhas de transmissão e redes de distribuição.