



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

BR/GTM/07
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – XIII

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

**AValiação DO DESEMPENHO DE ÉSTERES NATURAIS COMO MEIO ISOLANTE EM EQUIPAMENTOS
ELÉTRICOS**

H. M. Wilhelm*, L. Lange, C. Michelotti, C. Galdeano, M. F. C. Stocco H. P. Silva A. Cabrino
DIAGNO MATERIAIS E MEIO AMBIENTE UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ELEKTRO

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi investigar o mecanismo de migração da umidade da celulose para o óleo vegetal isolante ou éster natural isolante (ENI). A migração da umidade do papel para o ENI foi avaliada por meio de ensaios de laboratório e por testes de funcionalidade em campo. Avaliar o desempenho do ENI em equipamentos selados e não selados como em religadores e chaves a óleo foi outro objetivo desse trabalho. Os resultados desse trabalho são importantes para todas as concessionárias de energia elétrica, interessadas em ampliar o espectro de aplicação dos ésteres naturais em seu parque de equipamentos.

PALAVRAS-CHAVE

Óleo vegetal isolante, éster natural isolante, BIOVOLT A, envelhecimento acelerado, extensão da vida útil.

1.0 - INTRODUÇÃO

Estudos realizados em laboratório demonstraram que entre as vantagens técnicas do uso de ésteres naturais isolantes (ENI's) ou óleos vegetais isolantes está a extensão da vida útil do transformador devido 1) à migração preferencial da umidade do papel isolante para o éster e 2) à reação de esterificação entre a celulose e os ácidos graxos livres formados a partir da hidrólise do ENI (1). Devido a sua composição química, os ENI's possuem ponto de saturação de umidade muito maior em comparação ao óleo mineral, podendo conter, à temperatura ambiente, de 15 a 20 vezes mais água em solução do que o óleo mineral sem comprometer sua rigidez dielétrica. Essa maior afinidade pela água confere aos ENI's a propriedade de "secar" a isolação sólida de transformadores, por exemplo, e, consequentemente, diminuir a taxa de degradação da celulose. No entanto, o mecanismo desse processo de secagem em transformadores operando em condições normais não foi investigado ainda. Investigar o mecanismo de migração da umidade da celulose para o ENI é um dos principais objetivos desse trabalho, que está sendo desenvolvido pelo DIAGNO e ELEKTRO. A migração da umidade do papel para o ENI foi avaliada por meio de ensaios de laboratório e por testes de funcionalidade em campo. O ENI utilizado na pesquisa foi o BIOVOLT A. Os ensaios de laboratório foram realizados em estufa, em frascos de aço inoxidável, selados, utilizando-se papel kraft neutro com diferentes teores de umidade e cobre metálico. Como a temperatura é um fator importante na cinética de migração da água da isolação sólida para o óleo, os ensaios foram realizados em diferentes temperaturas, entre 70 e 140 °C.

Um dos testes de funcionalidade em campo, para avaliar a migração da umidade da celulose para o BIOVOLT A, foi realizado em um transformador de 34,5 kV e 3,5 MVA, equipado com sensores de umidade, temperatura e gases e de um sistema de transmissão remoto de dados. Esse transformador opera numa temperatura média de 50 °C. O outro teste de funcionalidade em campo foi realizado em quatro transformadores de distribuição de 13,8 kV e 75 kVA. Antes da instalação foram realizadas medidas de PDC (polarização e depolarização de corrente) para

(*) Rua México, n° 1053 – CEP 82510-060 Curitiba, PR – Brasil
Tel: (+55 41) 3328-0368 – Fax: (+55 41) 3328-0367 – Email: helenaw@diagno.com.br

estimar o teor de água da isolamento sólida. O teor de água do óleo está sendo acompanhado em laboratório, pela análise de amostras coletadas, e por meio de sensores instalados nos transformadores.

Devido a sua composição química, os ENI são mais suscetíveis a oxidação em comparação ao óleo mineral isolante. Avaliar o desempenho do BIOVOLT A em equipamentos selados e não selados como em religadores e chaves a óleo foi outro objetivo desse trabalho. Para tanto, foram selecionados quatro religadores de diferentes modelos, sendo que dois deles (um de cada modelo) foram apenas preenchidos com BIOVOLT A enquanto que os outros dois passaram por modificações no sistema de vedação e foi instalada uma válvula de alívio de pressão, e duas chaves seccionadoras (CO trifásica, 400 A). Em uma das chaves foi adaptado um registro para coleta de amostras. Esses equipamentos foram instalados na rede da concessionária no primeiro semestre de 2011.

Os resultados desse trabalho são importantes para todas as concessionárias de energia elétrica, interessadas em ampliar o espectro de aplicação dos ésteres naturais em seu parque de equipamentos.

2.0 - DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A metodologia empregada, os resultados obtidos estão descritos nas principais etapas relacionadas na sequência.

2.1 Aquisição do BIOVOLT A e dos papéis isolantes

O ENI utilizado nessa pesquisa foi o óleo BIOVOLT A (formulado à base de óleo de milho), fornecido pela empresa MINERALTEC, sendo caracterizado de acordo com a norma ABNT NBR 15422. O óleo mineral tipo AV-60 IN foi fornecido pela empresa MGTRAFOS, sendo caracterizado de acordo com a resolução ANP 36 de 05/12/2008. Ambos os óleos atenderam as especificações para óleos novos. O papel kraft termooestabilizado isolantes, bem como o cobre, foram cedidos pela WEG TRANSFORMADORES, sendo estes os mesmos materiais que a empresa utilizou na fabricação do transformador de 34,5 kV e 5/6,25 MVA. O papel kraft neutro foi fornecido pela WEIDMANN. O grau de polimerização (GP) dos papéis foi determinado conforme metodologia descrita na norma IEC 60450.

2.2 Instalação e energização do transformador de 34,5 kV e 5/6,25 MVA, isolado com BIOVOLT A

O transformador de 34,5 kV e 5/6,25 MVA, com projeto especial para ENI, foi adquirido da WEG TRANSFORMADORES. O transformador foi instalado na subestação de Pilar do Sul, SP, em substituição a um dos transformadores da SE PISO01 (Figura 1). A montagem do transformador foi realizada pela empresa POTENCIAL. O enchimento e o tratamento do BIOVOLT A foram realizados pela equipe verde da MINERALTEC (Figura 1). Esses serviços foram acompanhados pela equipe da ELEKTRO, que também executou as ligações de comando, controle e proteção e fez o comissionamento do transformador. Foram instalados sensores de temperatura, água e gás, adquiridos da empresa TREETECH, na parte superior e inferior desse transformador. Amostras de BIOVOLT A foram coletadas antes da energização, em vazio, com 50 e 100% de carga as quais foram caracterizadas segundo os ensaios descritos na norma ABNT NBR 15422. As amostras também foram analisadas por gás cromatografia (ABNT NBR 7070) e determinado o período de indução do BIOVOLT A pelo método do RANCIMAT (2, 3).



FIGURA 1 - Tratamento do óleo BIOVOLT A do transformador de 34,5 kV, realizado em 27/07/10, na subestação de Pilar do Sul, SP.

2.3 Instalação e energização de transformadores de 15 KV, religadores e chaves a óleo

Foram selecionados 03 transformadores de 13,8 kV e 75 kVA e 01 de 112,5 kVA. O de 112,5 kVA foi adquirido da empresa ITB, sendo projetado para OVI, e os outros 03 foram reformados pela empresa POTENCIAL, sendo projetados para OMI. Todos foram preenchidos com BIOVOLT A. Após o preenchimento, o BIOVOLT A foi

analisado e atendeu aos critérios de recebimento de equipamentos isolados com ENI. Antes da instalação dos transformadores foram realizados ensaios de polarização e despolarização de corrente (PDC). Estes estudos tiveram por objetivo avaliar e demonstrar a aplicabilidade desse método como ferramenta de avaliação da isolação sólida também para transformadores com ENI.

Três transformadores isolados com BIOVOLT A e um com OMI foram submetidos a ensaios de PDC. Após, o óleo vegetal foi substituído por OMI, e os transformadores novamente ensaiados. Depois, o OMI foi novamente substituído pelo vegetal e os transformadores novamente ensaiados. Como no processo de substituição do óleo vegetal pelo mineral parte do óleo vegetal permaneceu na isolação sólida (óleo residual), o OMI que foi inserido estava contaminado com o ENI residual. Neste caso o óleo isolante resultante foi aqui denominado de OMI + ENI, uma vez que não se trata de OMI puro.

Para o ensaio de PDC os transformadores foram alimentados com tensão contínua de 500 V nos terminais H1, H2 e H3 interconectados e medição de corrente através dos terminais X1, X2, X3 e X0 interconectados. O tanque e demais pontos de aterramento foram aterrados. As medições de correntes de polarização e despolarização foram realizadas utilizando-se o equipamento PDC-ANALYSER-1MOD, cuja eficácia está comprovada em transformadores com OMI. As medições de condutividade (σ) e permissividade (ϵ) do óleo foram realizadas por meio do instrumento Conductivity Meter For Liquids LCM-8716 (LCM).

Diversas grandezas dielétricas podem ser avaliadas a partir da medição das correntes de polarização e despolarização e obtenção da rede representativa de componentes R-C que sintetizam o sistema de isolamento utilizando-se o aplicativo do PDC Analyzer, dentre elas o percentual de umidade da isolação sólida. Estas avaliações foram realizadas para todos os transformadores medidos tendo sido ao final feitas comparações entre os transformadores com óleo mineral que posteriormente foram substituídos por óleo vegetal.

Após os ensaios de PDC, 02 transformadores de distribuição foram instalados em Atibaia e outros 02 em Votuporanga. Em fevereiro de 2013 os 04 transformadores foram retirados da rede para repetição dos ensaios de PDC e para realização de análises físico-químicas nos óleos.

2.4 Avaliação do desempenho do óleo BIOVOLT A no transformador de 34,5 kV e 5/6,25 MVA

Após a energização com 100% de carga foram coletadas amostras para acompanhar as propriedades físico-químicas do BIOVOLT A e os gases dissolvidos. Na Tabela 1 estão apresentados alguns resultados obtidos que são considerados normais e aceitáveis. Dentre os parâmetros físico-químicos (Tabela 1), o fator de perdas dielétricas foi o que apresentou maior variação, mas este parâmetro, bem como os demais, estão dentro dos valores limites sugestivos reportados no documento da IEEE para ésteres naturais isolantes novos em equipamentos novos, após energização (4).

TABELA 1- Análise físico-química do BIOVOLT A coletado do transformador de 34,5 kV após energização com 100% de carga.

Propriedade	BIOVOLT A coletado em:		
	06/09/10	28/09/11	19/07/12
Aspecto visual	Límpido	Límpido	Límpido
Teor de água (ppm)	54	61	55
Fator de perdas dielétricas a 100 °C (%)	5,8	7,6	8,5
Rigidez dielétrica - Eletrodo calota (kV)	65	64	65
Acidez (mg de KOH/g óleo)	0,05	0,03	0,03
Viscosidade a 40 °C, (cSt)	35,8	37,0	38,6
Ponto de Fulgor (°C)	317	308	318
Ponto de Combustão (°C)	356	352	348
Período de indução a 130 °C (RANCIMAT) (h)	16,6	16,5	16,3

O comportamento térmico do transformador ocorreu conforme especificado no projeto. Na Figura 2 estão apresentadas as curvas de carga, de temperatura do óleo e do enrolamento num intervalo de 15 dias e 01 dia de operação. Picos de carregamento de 90% da capacidade nominal podem ser identificados diariamente, em curtos intervalos de tempo.

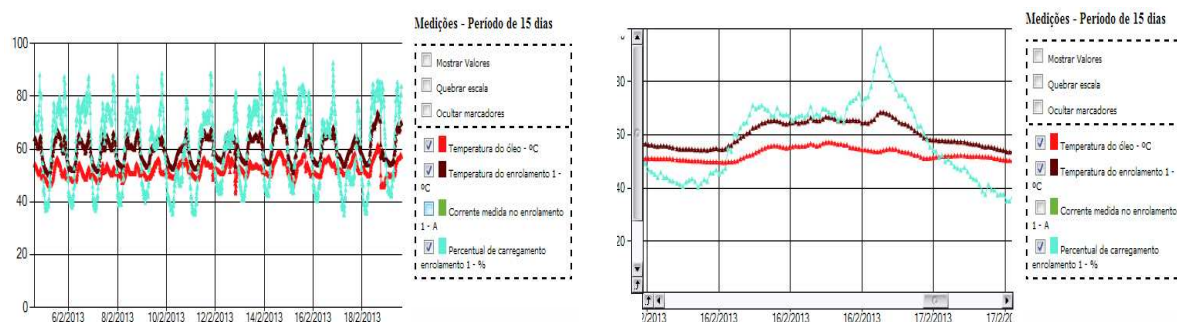


FIGURA 2 - Curvas de carga (—), de temperatura (—) do óleo e de temperatura do enrolamento (—) do transformador de 34,5 kV e 5/6,25 MVA registrados pelos sensores instalados.

2.5 Avaliação da migração da umidade do papel para o OVI

Para avaliar a migração da umidade do papel sólido para o BIOVOLT A foram realizados ensaios de envelhecimento acelerado entre 50 e 120 °C, com base no apêndice A do guia da IEEE ANSI C57.100, com o intuito de verificar a migração da água do papel isolante para o BIOVOLT A.

Para tanto foram levados à estufa frascos de aço inox contendo óleo puro e óleo/papel/cobre (300 mL/27 g/1,85 m). Antes de serem levados à estufa foi borbulhado gás nitrogênio no óleo para a retirada de oxigênio. Optou-se por usar as combinações de óleo e papel descritas na Tabela 2.

TABELA 2 - Condições experimentais utilizadas nos testes de envelhecimento acelerado, para avaliar a migração da umidade do papel para o OVI.

Temperatura (°C)	Teor de água aproximado do ENI (ppm)	Teor de água aproximado do papel isolante (%)
50	80	0,9
50	80	1,8
70	60	3,0
90	60	2,3
120	60	3,3

Ao término do envelhecimento, que teve duração de 30 dias, foi determinado o teor de água nos óleos vegetais pelo método Karl Fischer, descrito na norma ABNT NBR 5758/10 e determinada a acidez. Não houve variação significativa na acidez das amostras envelhecidas.

A Figura 3 ilustra o teor de água que migrou do papel para o BIOVOLT A. Esse teor foi obtido pela diferença entre o teor de água das amostras óleo/cobre/papel e o teor de água do óleo puro envelhecidos na mesma temperatura e intervalo de tempo. Percebe-se que com o aumento da temperatura há um aumento no teor de água do ENI na presença do papel isolante, evidenciando a migração da umidade do papel para o óleo, porém o teor de água permaneceu constante com o tempo (Figura 3). No entanto, os resultados obtidos a 50 °C mostram que nessa temperatura pouquíssima água migra do papel para o óleo vegetal, independente da quantidade de água presente no papel (1,8 ou 0,9 %). A maior concentração de água que migrou do papel para o óleo ocorreu a 120 °C e equivale a um incremento de ~ 300% no teor de água do ENI.

Analisando os dados em função da temperatura (Figura 4) é possível observar que a água migra do papel para o ENI de forma exponencial. Ou seja, em condições de sobrecarga, por exemplo, mais umidade migra da isolamento sólida para o ENI.

Para avaliar a migração da umidade no transformador de 34,5 kV foram analisados os dados de umidade do óleo e de temperatura registrados pelos sensores instalados no equipamento. Na Figura 5 estão apresentados os dados para um período de um ano. Observa-se uma constância na temperatura do óleo, de aproximadamente 45 °C. O teor de umidade variou na faixa de 60 – 80 ppm, resultando num valor médio de 67 ppm. Teor esse que confere com o valor obtido em laboratório, nas amostras de óleo coletadas (Tabela 1), indicando a confiabilidade dos resultados de monitoramento dos sensores.

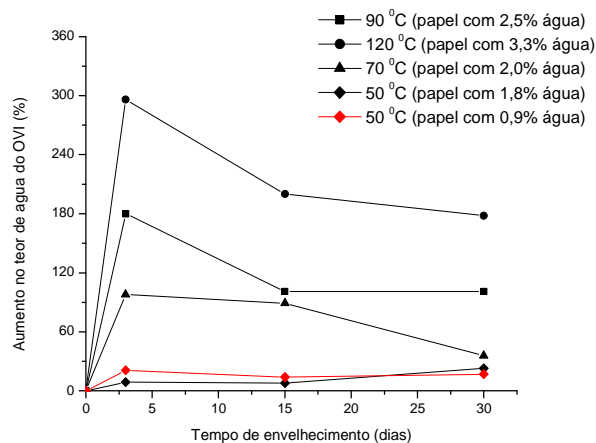


FIGURA 3 - Aumento no teor de água do BIOVOLT A em função da temperatura e do tempo de envelhecimento.

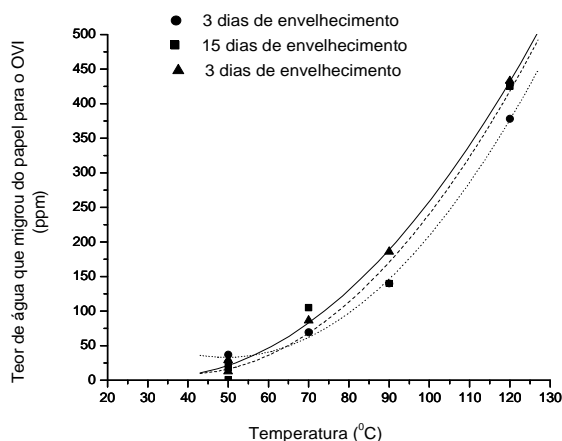


FIGURA 4 - Taxa de evolução da migração da água do papel para o ENI ou OVI em função da temperatura e do tempo (usou-se papel com 0,9 a 3,3% de água).

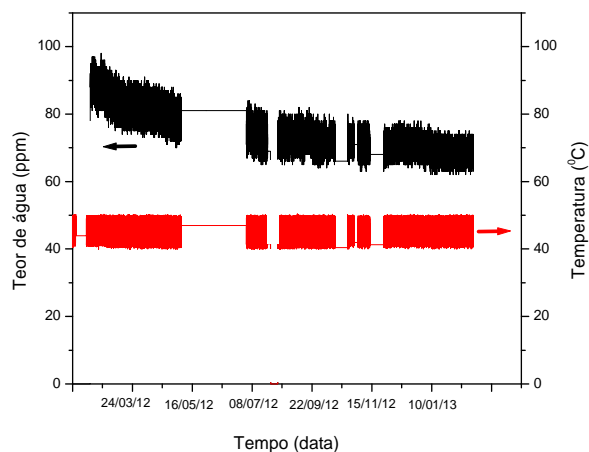


FIGURA 5 - Monitoramento *on line*, via sigma4web, do teor de água e da temperatura do óleo na parte inferior do tanque do transformador de 34,5 kV, isolado com BIOVOLT A, no intervalo de tempo de 1 ano.

Foi monitorado o teor de água e o ponto de combustão do BIOVOLT A inserido nos religadores (Tabela 3) e nas chaves a óleo (Tabela 4). Os resultados obtidos indicam que o óleo não se encontra contaminado com OMI. Mostraram também que o teor de água dos religadores que foram adequados para minimizar entrada de umidade apresentaram teores de umidade semelhante àqueles que não foram adaptados. Esses resultados indicam que o tipo de adaptação realizada não contribuiu na minimização de entrada do teor de água no óleo. Nesse período de tempo não foram observadas alterações na acidez e na viscosidade do óleo BIOVOLT A em uso nesses equipamentos.

TABELA 3 - Teores de água das amostras de BIOVOLT A coletadas dos religadores.

Identificação do Religador	Data de coleta da amostra	Teor de água (ppm)	Ponto de Fulgor (°C)	Ponto de combustão (°C)
RL000272*	julho de 2011	256	308	348
RL000272*	setembro de 2011	271	288	346
RL000272*	maio de 2012	326	310	350
RL000272*	março de 2013	389	308	335
RL000212**	julho de 2011	253	296	350
RL000212**	maio de 2012	315	308	350
RL000212**	março de 2013	383	304	348
RL000465***	julho de 2011	507	318	354
RL000465***	março de 2013	713	306	342
RL000562****	Julho de 2011	665	312	350
RL000562****	março de 2013	774	306	340

*RL000272: NÃO SELADO, instalado em 05/2011.

**RL 000212: SELADO, instalado em 05/2011.

***RL 000465: SELADO, instalado em 03/2011.

****RL000562: NÃO SELADO, instalado em 02/2011.

TABELA 4 - Teores de água das amostras de BIOVOLT A coletadas das chaves a óleo.

Identificação da chave a óleo	Data de coleta da amostra	Teor de água (ppm)	Ponto de Fulgor (°C)	Ponto de Combustão (°C)
CO00100*	julho de 2011	195	312	350
CO00100*	março de 2013	181	304	342
CO00194**	março de 2013	277	306	344

*CO00100: instalada em 04/2011, em Campos do Jordão.

**CO00194: instalada em 06/2011, em Campos do Jordão.

Quanto aos ensaios de PDC, na Figura 6 estão apresentadas as comparações entre os resultados obtidos nos mesmos corpos preenchidos com OVI e com OMI. O andamento das curvas de corrente de polarização e despolarização após as trocas de óleo (vegetal por mineral) mostrou um deslocamento não convencional que pode ter sido causado, em parte, pela impregnação do OVI e pelos valores muito maiores de condutividade (medidos pelo equipamento de LCM). O andamento diferenciado das curvas de PDC era esperado na parte inicial da medição onde as características do óleo é que prevalecem, e confirmam a resposta diferenciada para cada um dos óleos utilizados. Isto se explica pelo fato de que cada óleo possui parâmetros dielétricos distintos.

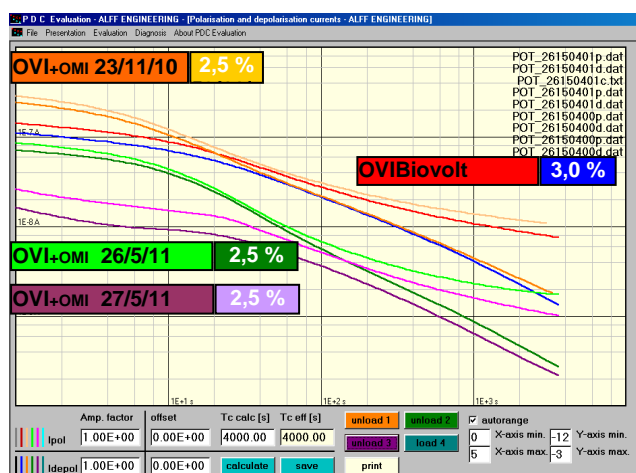


FIGURA 6 - Gráfico de comparação entre curvas medidas e percentual de umidade para o mesmo corpo de prova com OMI e ENI ou OVI.

A parte final das curvas, que é sensível às características da isolamento sólida e seus contaminantes, mostraram-se similares para cada série de medição, pois somente foram trocados os óleos isolantes, não tendo sido aplicada nenhuma forma de secagem da parte ativa. Ou seja, o PDC está indicando o percentual de umidade na isolamento sólida do mesmo corpo de prova, com valores muito próximos, tanto na presença de OMI como de OVI. Conforme

mencionado anteriormente, esses transformadores forem instalados na rede da concessionária e retirados em fev/13 para repetição dessas medições de PDC. A partir dessa segunda rodada de medições espera-se obter informações mais precisas com relação a migração da umidade do papel para o OVI.

Com esses resultados preliminares é possível afirmar que as técnicas de PDC e LCM apresentaram respostas satisfatórias na avaliação qualitativa dos sistemas de isolamento para transformadores de distribuição com OVI e (OMI+OVI).

3.0 - CONCLUSÕES

O BIOVOLT A apresentou desempenho satisfatório como fluido isolante em transformador de 34,5 kV e 5/6,25 MVA, religadores e chaves a óleo.

A água migra do papel isolante para o BIOVOLT A e essa migração é função da temperatura.

De uma forma geral, os resultados parciais obtidos nesta pesquisa mostram que a concessionária pode utilizar o BIOVOLT A em transformadores de distribuição, religadores e chaves a óleo. Com essa prática a concessionária estará utilizando um material biodegradável em atendimento as boas práticas ambientais. O principal benefício decorrente do uso dos produtos desse projeto de pesquisa pela concessionária é a melhoria no serviço interno adotado pelas equipes de manutenção e o aumento da disponibilidade e a confiabilidade de fornecimento, garantindo uma melhoria da qualidade do serviço prestado. Ganhos esses que podem ser refletidos no melhor atendimento a carga em operação normal e, sobretudo, em emergência.

4.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ANEEL pela aprovação do projeto de P&D, a ELEKTRO pelo apoio financeiro e ao DIAGNO pela infraestrutura disponibilizada. Agradecem também ao CNPq pela bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora - DT concedida para a pesquisadora Helena Maria Wilhelm e ao centro de microscopia eletrônica da UFPR pelas análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) WILHELM, H. M., TULIO, T., JASINSKI, R., ALMEIDA, G. "Aging markers for in-service natural ester-based insulating fluids," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol. 18, No. 3, pp.714-719, 2011.
- (2) WILHELM, H. M., STOCCO, G. B., BATISTA, S. G. Jr. "In-service natural ester-based insulating fluids reclaiming: preliminary study", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol.20, No.1, pp. 128-134, 2013.
- (3) WILHELM, H. M., STOCCO, G. B. Determinação da Estabilidade à Oxidação de Óleos Vegetais Isolantes pelo Método Condutivimétrico. Relatório Técnico apresentado no CIGRÉ p 6, 2007.
- (4) IEEE C57.147, "IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers", July 11, 2008, New York, USA.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Helena Maria Wilhelm é graduada em Química pela UFPR, Mestre pela UFSC, Doutora pela UNICAMP. Atua como pesquisadora e coordenadora de projetos P&D&I nas áreas de química, materiais e meio ambiente com ênfase em fluidos isolantes, no DIAGNO, LACTEC, MINERALTEC e ICT. É bolsista de Produtividade Desen. Tec. e Extensão Inovadora do CNPq desde 2006, e professora de pós-graduação dos programas PRODETEC (LACTEC) e PIPE (UFPR).



Lisiane Lange da Silva é graduada em Farmácia, Bioquímica, Indústria e Alimentos pela PUC – PR, mestranda do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (LACTEC E IEP) em Desenvolvimento de Tecnologia e Sistemas Energéticos Convencionais.

Carlos Micheloti é técnico em química e trabalha no laboratório químico do DIAGNO.

Mônica Buffara Cecato Stocco é graduada em Engenharia Química pela PUCPR, Mestre em Engenharia de Materiais pela UFPR. Engenheira Química do DIAGNO, Professora de graduação de Engenharia Química e Engenharia Ambiental na PUCPR, doutoranda da UFPR em Engenharia de Materiais.

Claudio Galdeano possui graduação em Engenharia Química pela Faculdade Oswaldo Cruz, especialização em Legislação Ambiental pela USP, especialização em Manutenção pelo Núcleo de Treinamento Tecnológico. Atua na área de fluidos isolantes, meio ambiente e materiais.

Adriano Cabrino atua nas áreas de gestão, especificação e manutenção de equipamentos elétricos.

Humberto de Alencar Pizza da Silva é graduado em Engenharia Elétrica pela USJT-SP, Mestre em Ciências pela USP, Doutor em Energia pela USP. Atua como pesquisador e coordenador de projetos P&D&I na Universidade de São Paulo nas áreas de Elétrica, Automação, Controle, Proteção de Sistemas Elétricos e Equipamentos de Potência com ênfase em Gerenciamento de Ativos, Monitoramento, Diagnósticos de Sistemas e Equipamentos, Redes Inteligentes, Sistemas de Informação, Geração Distribuída. Atua como coordenador de grupos de trabalho do CIGRE nos temas de diagnósticos avançados para equipamentos elétricos e redes subterrâneas de distribuição de energia.