



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

BR/GTM/06
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - XIII

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

ENVELHECIMENTO ACELERADO COMPARATIVO DE PAPÉIS KRAFT NEUTRO E TERMOESTABILIZADO EM ÓLEO MINERAL E ÉSTER NATURAL ISOLANTES

Lisiane Lange da Silva*Helena Maria Wilhelm Dieli Carolina da Silva Adriano Cabrino
DIAGNODIAGNO MGMELEKTRO

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar comparativamente as propriedades de papéis kraft neutro e termoeestabilizado em óleo mineral isolante e em Biovolt A® (éster natural isolante). Amostras dos papéis foram adicionadas aos óleos, na presença de cobre metálico, em frascos de vidro âmbar com tampa esmerilhada, aquecidos a 100 °C por seis meses. Em intervalos regulares de tempo foram retiradas amostras de papel e foram realizados ensaios de caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia vibracional na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), ensaios mecânicos e determinado o grau de polimerização (GP).

PALAVRAS-CHAVE

Ésteres naturais isolantes; óleos isolantes biodegradáveis; extensão da vida útil; Biovolt A®; impactos ambientais.

1.0 INTRODUÇÃO

Os esforços mundiais para conseguir o desenvolvimento sustentável, estão ligados ao uso eficiente do meio ambiente e dos recursos naturais renováveis. Assim, o cuidado com o meio ambiente vem impulsionando vários segmentos do mercado, que estão se preparando para aplicar uma política ambiental, que diminua os impactos negativos à natureza(1). A questão de impacto ambiental é hoje uma preocupação mundial e discutida significativamente, pois de acordo com a ABNTNBR ISO 14001, impacto ambiental é qualquer modificação do meio ambiente, adversa ou benéfica, que resulte, no todo ou em parte, das atividades, produtos ou serviços de uma organização (2). Inclusive a Resolução 003/86 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) remete um olhar mais profundo sobre o termo impacto ambiental, que é qualquer alteração das atividades físicas, químicas e biológicas pela ação antrópica, ou seja, ação do homem. Nesse contexto o setor elétrico tem buscado novas alternativas para o sistema de isolamento líquido de um transformador (3).

Atualmente o óleo mineral é sem dúvida o dielétrico líquido de maior utilização no setor elétrico. No entanto, estudos laboratoriais e práticos, com ésteres naturais isolantes, estão sendo realizados em virtude de inúmeras vantagens, quando comparado ao óleo mineral isolante. A grande vantagem do uso dos ésteres vegetais isolantes está relacionado à propriedade de ser um fluido biodegradável, de segurança ambiental, alinhado com as boas práticas de sustentabilidade.

A vida útil de um transformador é definida em função do envelhecimento dos seus materiais isolantes. O papel isolante mais utilizado é o papel kraft neutro, porém quando são esperadas altas temperaturas de operação é utilizado o papel krafttermoeestabilizado. O papel krafttermoeestabilizado pode ser produzido a partir de reações de cianoetilação ou de acetilação da celulose; ou pela adição de agentes estabilizantes como uréia, melanina, dicianoamida ao papel kraft neutro (4).

(*) Rua México, n°1053 – CEP:82510- 160, Curitiba, PR – Brasil.

Tel: +55 (41) 3328-0368 Fax: +55 (41) 3328-0367 – Email: lisianelange@gmail.com

Esse estudo teve por objetivo avaliar comparativamente as propriedades dos papéis kraft neutro e krafttermoestabilizado em óleo mineral isolante e em um éster natural isolante (ENI), o Biovolt A®. O óleo Biovolt A® é formulado a partir do óleo de milho e, além do uso nos ensaios de envelhecimento acelerado realizados em laboratório, está sendo usado em um transformador de 34,5 kV e 5/6,25 MVA, instalado numa subestação da ELEKTRO (4).

2.0 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais e caracterização

O óleo Biovolt A® (formulado à base de óleo de milho) foi fornecido pela empresa MINERALTEC, em conformidade com a norma ABNT NBR 15422. O óleo mineral isolante (OMI) tipo AV-60 IN foi fornecido pela empresa MGTRAFOS, em conformidade com a resolução ANP 36 de 05/12/2008. O papel krafttermoestabilizado isolante, bem como o cobre, foram cedidos pela WEG TRANSFORMADORES, sendo estes os mesmos materiais que a empresa utilizou na fabricação de um transformador de 34,5 kV e 5/6,25 MVA, instalado na ELEKTRO, na subestação de Pilar do Sul, SP. Para a inserção de corpos de prova de papel krafttermoestabilizado foi modificada a tampa deste transformador, para posterior coleta. Esses corpos de prova foram dispostos em um suporte/dispositivo especificamente dimensionado para esse transformador. O papel kraft neutro foi fornecido pela empresa WEIDMANN.

Para o ensaio de caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV), após a montagem em suporte metálico, as amostras foram submetidas à metalização em aparelho Balzers SCD030. As eletromicrografias foram feitas em microscópio eletrônico de varredura Jeol JSM6360LV. As análises foram realizadas no Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Paraná (5).

O ensaio de espectroscopia vibracional na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi realizado conforme método do equipamento (Marca Bruker - Modelo Vertex 70; operando no modo reflectância- ATR) em parceria com o Departamento de Química da Universidade Federal do Paraná.

As propriedades mecânicas de amostras de papel novo e envelhecidas em OMI e ENI foram determinadas conforme metodologia descrita na norma ABNT NBR NM ISO 1924-2:2012, em parceria com o Lactec (6)

O grau de polimerização (GP) dos papéis foi determinado conforme metodologia descrita na norma IEC 60450 no laboratório da empresa Diagno.

2.2 Ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório

Os respectivos papéis foram adicionados aos óleos, na presença de cobre metálico, em frascos de vidro âmbar com tampa esmerilhada, sendo dispostos em estufa a 100 °C por um período de seis meses, conforme propo rção do apêndice A do guia da IEEE ANSI C57.100 (Figura 1).

Em intervalos regulares de tempo foram retiradas amostras de papel da estufa. Após a coleta das amostras de papel foi realizada a remoção do óleo residual por meio de extração com solvente (hexano) em um extrator tipo Soxhlet, por um período de 6 horas, nas quais foram realizados ensaios de caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV), ensaios de espectroscopia vibracional na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), ensaios mecânicos e determinado o grau de polimerização (GP) (Figura 2).



FIGURA 1 - Ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório a 100 °C por um período de seis meses.



FIGURA 2 - Amostras de papel envelhecido, após a remoção do óleo residual por meio de extração: papel kraft neutro envelhecido em (A) OMI e (B) Biovolt A®; papel kraft termoestabilizado envelhecido em (C) OMI e em (D) Biovolt A®.

3.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise ultra-estrutural dos papéis novos e envelhecidos por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A análise ultra-estrutural de papel kraft neutro (Figura 3A) por MEV evidencia um padrão de dispersão das fibras de celulose bem diferente quando comparado com o papel kraft termoestabilizado. As fibras de celulose apresentam semelhantes diâmetros e se apresentam dispersas em feixes que se inter cruzam apresentando características ultra-estruturais de entrelaçamento. Observa-se uma diferença de densidade de elétrons nas fibras que constituem o papel, como fibras menos elétron-densas e fibras que se interconectam com evidente deposição de elétron-densidade. Observam-se, também, longas fibras elétron-densas que inter cruzam a malha do papel e abaixo dessas nota-se a presença de fibras menos elétron-densas de diferentes diâmetros.

De forma semelhante ao papel kraft neutro termoestabilizado (Figura 3D), observam-se pouquíssimas e esparsas porosidades. Pode-se observar que o tratamento do papel kraft neutro com Biovolt A® (Figura 3B) manteve as mesmas características ultra-estruturais apresentadas pelo papel kraft controle, parecendo ou sugerindo de alguma forma, uma redução nas deposições elétron-densas comparativamente às observadas no controle.

No tratamento com OMI (Figura 3C) nota-se quase ausência total de material elétron – denso compondo as fibras da malha do papel. Observam-se áreas desse papel com maior porosidade, bem como alguns pontos agregados particulados sobre a malha. Pode-se ainda observar que o material controle apresenta pouco material particulado de pequeno diâmetro disperso sobre a malha do papel e que o tratamento do papel com Biovolt A®, evidencia um material particulado que se deposita sobre as fibras de celulose. No papel tratado com OMI, observa-se um material particulado de diâmetro intermediário.

Na análise ultra-estrutural em microscopia eletrônica de varredura (MEV) observa-se nas Figuras 3 D, E e F que o padrão de entrelaçamento, diâmetro e porosidade por entre as fibras manteve-se constante entre o papel controle quando comparado aos tratamentos impostos. Observa-se que somente quando da exposição do papel ao OMI houve uma maior deposição de material particulado por sobre as fibras de celulose. No *inset* da Figura 1F, pode-se observar em maior magnitude uma ampliação desse material particulado, que ao ser analisado pelo EDS mostrou maior concentração de cálcio. É uma deposição formada por agregados particulados de menores diâmetros, de aspecto regular.

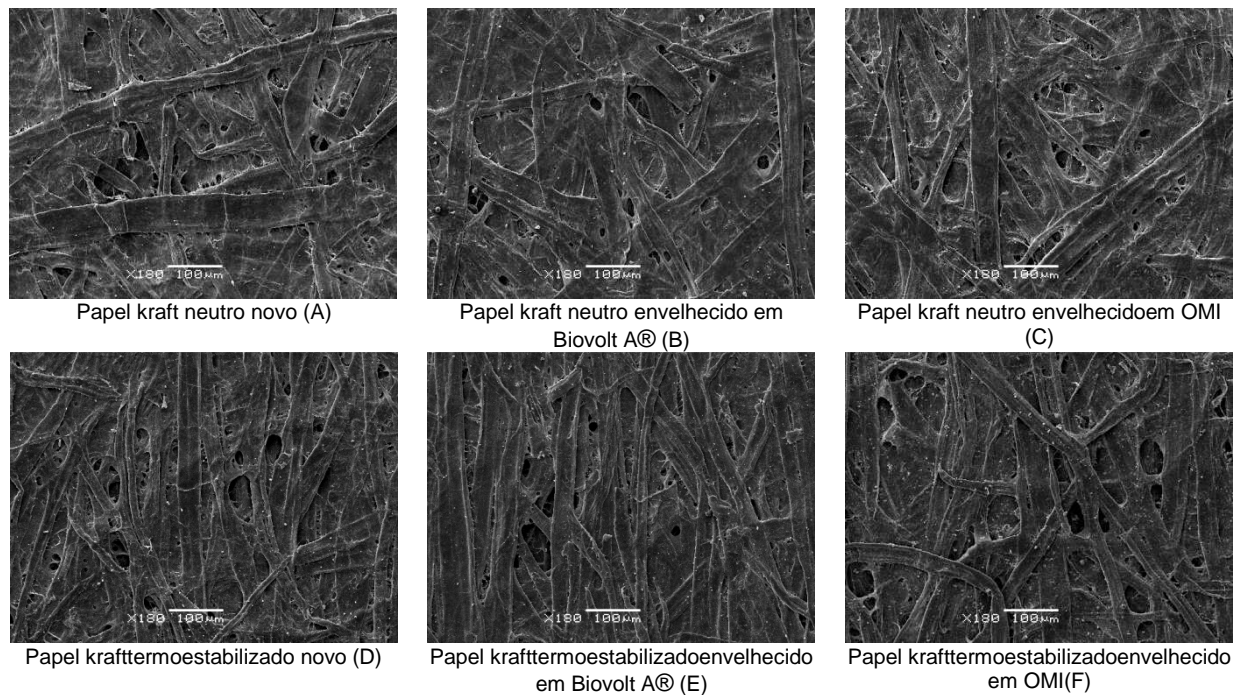


FIGURA 3 - Microscopia eletrônica de varredura dos papéis isolantes novos e envelhecidos.

3.2 Ensaio de tração mecânica

Também foi avaliada a resistência mecânica de amostras de papel novo e envelhecidas em OMI e Biovolt A® e os resultados obtidos para a deformação estão apresentados na Tabela 1. Os papéis kraft termoestabilizados novos e os envelhecidos apresentaram menor variação na deformação em comparação aos papéis kraft neutros. A deformação do papel kraft termoestabilizado não foi afetada pelo envelhecimento, enquanto que a do papel kraft neutro diminuiu em torno de 53%. O final da vida útil do papel isolante é determinado quando ocorre redução de 50% na sua resistência a tração, que corresponde a um GP aproximado de 200.

TABELA 1 - Propriedades mecânicas dos papéis envelhecidos em Biovolt A® e OMI por um período de seis meses

Tipo de papel	Deformação medida no papel (%):		
	Novo	Envelhecido em Biovolt A®	Envelhecido em OMI
Kraft neutro	15,2 ± 1,7	8,0 ± 0,63	10,9 ± 1,67
Kraft termoestabilizado	15,1 ± 1,8	10,4 ± 0,68	*

*Não foi coletado material suficiente para realizar essa análise.

3.3 Determinação do grau de polimerização (GP)

Para avaliar o grau de degradação dos papéis isolantes foi determinado o GP dos papéis isolantes novos e envelhecidos. Houve uma redução no GP nas amostras de papel kraft neutro, independente do tipo de óleo utilizado (Biovolt A® ou OMI) em comparação ao papel kraft termoestabilizado. O GP das amostras de papel kraft termoestabilizado envelhecidas em Biovolt A® foi maior em comparação às envelhecidas em OMI, em concordância com os resultados obtidos nos ensaios mecânicos. Liao e colaboradores relatam que a queda inicial do GP, na primeira etapa do envelhecimento, ocorre pela heterogeneidade física do material, ou seja, o mesmo material apresenta diferentes tensões de degradação. Observou também que a cadeia do polímero quebra preferencialmente nas extremidades, justificando essa queda acentuada no GP (7).

TABELA 2 - GP(s) dos papéis envelhecidos em Biovolt A® e OMI por um período de seis meses.

Tipo de papel	Grau de polimerização (GP) do papel:		
	Novo	Envelhecido em Biovolt A®	Envelhecido em OMI
Kraft neutro	1016	490	500
Kraft termoestabilizado	1070	1050	850

3.4 Ensaios de espectroscopia vibracional na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

No papel krafttermoestabilizado novo identificou-se duas bandas, em 1550 e 1640 cm^{-1} , atribuídas ao aditivo adicionado ao papel para lhe conferir uma maior estabilidade térmica. A intensidade dessas bandas diminuiu significativamente no papel envelhecido, evidenciando o consumo desse aditivo. Corpos de prova de papel krafttermoestabilizado também foram inseridos em um transformador de potência de $34,5\text{ kV}$ e $3,5\text{ MVA}$. A análise por FTIR de um desses corpos de prova, retirado do transformador após 2 anos de operação, também apresentou essas duas bandas (1550 e 1640 cm^{-1}), porém em menor intensidade em relação ao papel krafttermoestabilizado novo (Figura 4).

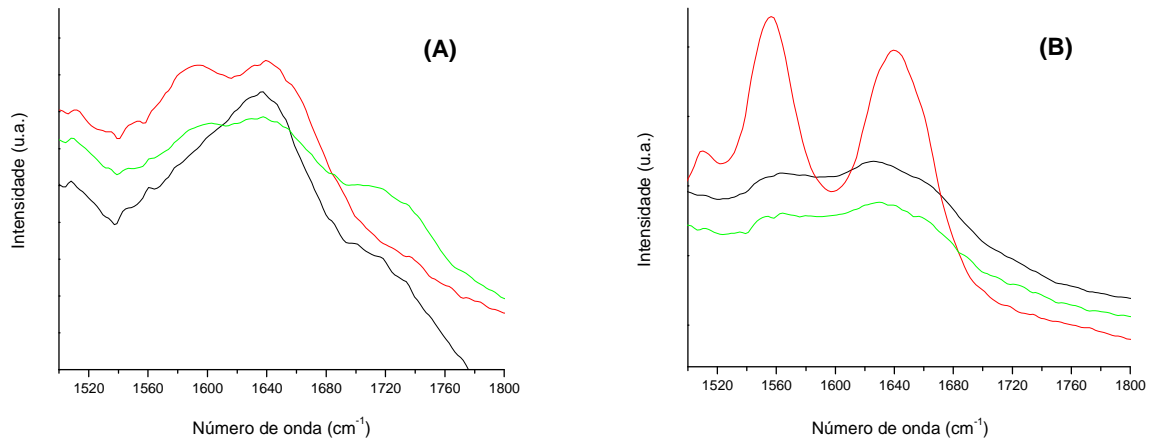


FIGURA 4 - Espectros de FTIR dos papéis novos e envelhecidos. **(A)** Papel kraft neutro: (----) novo; (----) envelhecido em Biovolt A®; (----) envelhecido em OMI. **(B)** Papel krafttermoestabilizado: (----) novo; (----) envelhecido em Biovolt A®; (----) envelhecido em OMI.

4.0 CONCLUSÃO

De uma forma geral, o papel krafttermoestabilizado apresentou menor degradação em comparação ao papel kraft neutro nos ensaios de envelhecimento acelerado realizados em OMI e Biovolt A®. A intensidade das bandas em 1550 e 1640 cm^{-1} podem ser usadas para monitorar o consumo do aditivo estabilizador no papel Kraft termoestabilizado em uso.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) PELIZER, L.H, PONTIERI, M. H., MORAES, I. DE O. Utilização de Resíduos Agro-Industriais em Processos Biotecnológicos como Perspectiva de Redução do Impacto Ambiental. J. Technol. Manag. Innov. 2007. Volume 2. Issue1.
- (2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Sistemas da gestão ambiental – Requisitos comorientações para uso - ABNT NBR ISO 14001:2004. Brasil.
- (3) RESOLUÇÃO CONAMA nº 001. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para avaliação de impacto ambiental. 1986.
- (4) WILHELM, H. M., STOCCO, G. B., GALDEANO, C.A., JUNIOR, M.M.S, HOSSRI, H., FERNANDES, P.O., SANTOS., L.C., CABRINO, A. Avaliação da extensão da vida útil do papel kraft isolante em ésteres naturais (óleo vegetal isolante). XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. 23 a 26 de Outubro de 2011, Florianópolis-SC-Brasil, 9pp.
- (5) SOUZA W. Técnicas básicas de microscopia eletrônica aplicada às Ciências Biológicas. Rio de Janeiro (RJ): Sociedade Brasileira de Microscopia Eletrônica, 1998.
- (6) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Papel e cartão - Determinação das propriedades de tração. Parte 2: Método da velocidade constante de alongamento (20 mm/min) (ISO 1924-2:2008 IDT) - ABNT NBR NM ISO 1924-2:2012. Brasil.

(7) LIAO, R.; SHUAIWEI, L*; CAIXIN, S.; LIJUN, Y. E HUIGANG, S. A comparative study of thermal aging of transformer insulation paper impregnated in natural ester and in mineral oil. Euro. Trans. Electr. Power 2010; 20:518–533.

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 Universidade Federal do Paraná pelas análises de microscopia eletrônica de varredura e ao departamento de química da UFPR pelas análises de FTIR.

6.0 DADOS BIOGRÁFICOS

Helena Maria Wilhelm é graduada em Química pela UFPR, Mestre pela UFSC, Doutora pela UNICAMP. Atua como pesquisadora nas áreas de química, materiais e meio ambiente com ênfase em fluidos isolantes e biodiesel. É bolsista de Produtividade Desen. Tec. e Extensão Inovadora do CNPq desde 2006, e professora de pós-graduação dos programas PRODETEC e PIPE.

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.

Dieli Carolina da Silva é graduada em Biotecnologia pra Tuiuti - PR, mestranda da UFPR em Engenharia de Materiais.

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