

Avaliação da Degradação de Distintos Tipos de Sistemas de Isolação Papel-óleo Usados em Transformadores

Larissa Mildemberger, Guilherme C. da Silva, Guilherme B. Stocco, Heloisa N. da Motta, Joseane V. Gulmine, Claudio A. Deger, Juliano de Andrade, Vitoldo Swinka Filho, Viviane V. Calixto, Marilda Munaro, Mario C. Andreoli

Resumo – O artigo apresenta os primeiros resultados obtidos na avaliação de distintos sistemas de isolação papel-óleo, utilizados em transformadores, frente ao envelhecimento térmico acelerado em laboratório. Foram avaliados quatro sistemas de isolação papel-óleo, a saber: papéis convencional e termoestabilizado e óleos isolantes mineral e vegetal. Diversas técnicas experimentais foram utilizadas para avaliação dos referidos sistemas, dentre as quais: teor de água, índice de neutralização, perdas dielétricas, grau de polimerização. Os resultados obtidos até o momento mostram que o óleo vegetal tem propriedades comparáveis às do óleo mineral com a vantagem de ter alto ponto de fulgor. Todavia, o óleo vegetal isolante apresentou menor rigidez dielétrica que o óleo mineral isolante. Os resultados do ensaio de grau de polimerização indicam elevada taxa de degradação dos papéis durante o período de avaliação.

Palavras-chave – óleo mineral isolante, óleo vegetal isolante, papel convencional, papel termoestabilizado, transformadores.

I. INTRODUÇÃO

O presente estudo está relacionado com a primeira parte do projeto de P&D n°0068-0027/2011 intitulado “Desenvolvimento de metodologias físico-químicas e dielétricas para avaliação da condição de sistemas de isolação papel-óleo utilizados em equipamentos de subestação”, o qual tem como entidade proponente a Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP) e entidade executora o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC). O projeto teve início em junho de 2011 e tem duração de 36 meses.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VII CITENEL), realizado na cidade do Rio de Janeiro/RJ, no período de 05 a 07 de agosto de 2013.

Larissa Mildemberger é mestranda pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais (PIPE-UFPR) (e-mail: larissa.mildemberger@lactec.org.br)

Guilherme C. da Silva, Guilherme B. Stocco, Heloisa N. da Motta, Joseane V. Gulmine, Marilda Munaro, Claudio A. Deger, Rodrigo F. Soares, Juliano de Andrade, Vitoldo Swinka Filho e Viviane V. Calixto trabalham no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) (e-mails: cunha@lactec.org.br; stocco@lactec.org.br; heloisa.motta@lactec.org.br; joseane.gulmine@lactec.org.br; marilda@lactec.org.br; deger@lactec.org.br; rodrigo.ferreira@lactec.org.br; juliano.andrade@lactec.org.br; vitoldo@lactec.org.br; viviane@lactec.org.br).

Mario C. Andreoli trabalha na Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP) (e-mail: mandreoli@ctep.com.br).

Um equipamento de fundamental importância nos sistemas elétricos modernos, seja na geração, na transmissão ou na distribuição de energia elétrica, é o transformador. Entre os constituintes do transformador está o sistema de isolação, normalmente composto de um dielétrico líquido em combinação com um dielétrico sólido. O dielétrico líquido mais utilizado no setor elétrico é o óleo mineral isolante (OMI), principalmente devido à combinação de boas características dielétricas e físico-químicas e baixo custo. Contudo, há desvantagens em utilizá-lo: por ser um derivado de petróleo, o suprimento de matéria-prima é instável. Além disso, o OMI é inflamável e sua biodegradabilidade é lenta [1-3].

Sendo assim, a procura de novos líquidos isolantes, provenientes de fontes renováveis, tem se tornado foco de estudos em todo o mundo, merecendo destaque o óleo vegetal isolante (OVI). O OVI tem como vantagens maior biodegradabilidade, segurança contra incêndio e abundância de matéria-prima.

Muitas pesquisas têm sido realizadas a fim de comparar as propriedades físico-químicas do OVI com as do OMI. Yang *et. al.* [4] observaram que a taxa de envelhecimento do dielétrico sólido (papel isolante) é diminuída em óleo vegetal. Essa diminuição foi atribuída a dois fatores principais: a solubilidade da água em ésteres naturais e a possível mudança química apresentada pela celulose quando impregnada em óleo vegetal, processo conhecido como transesterificação.

A solubilidade limite da água em óleo vegetal é 16 vezes maior em temperatura ambiente e cerca de 4 vezes maior a temperaturas próximas de 100°C do que a solubilidade em óleo mineral, de forma que a hipótese mais aceita é de que o óleo vegetal secaria o papel, protegendo-o [5].

A transesterificação envolve a mudança química na estrutura da celulose. Alguns autores exploraram a possibilidade da estrutura da celulose ser alterada durante o envelhecimento em éster natural, uma vez que um pico referente ao grupo éster (-COOR) foi encontrado em análises de raios-X. Foi sugerido que longas cadeias de ácidos graxos se ligariam à celulose formando uma barreira ao ingresso de água, levando à diminuição da taxa de deterioração do papel isolante pelo efeito da umidade [5].

Vale ressaltar que a utilização segura do OVI necessita do desenvolvimento de projeto específico de transformador para uso deste fluido, não bastando a simples substituição de um tipo de óleo isolante por outro. Ainda, não há normatiza-

ção específica para a avaliação do OVI em uso. Por estas razões, há restrição por parte do setor elétrico na utilização do OVI em grande escala.

O dielétrico sólido empregado em transformadores é o papel kraft isolante, denominado aqui de papel convencional (PC). O PC é produzido pela deslignificação da polpa da madeira pelo processo Kraft, que consiste no tratamento da polpa com mistura de hidróxido de sódio e sulfito de sódio.

Atualmente, tem-se utilizado em grande escala o papel kraft termoestabilizado (PT). Este possui parte da sua estrutura modificada pela adição à celulose de compostos nitrogenados, por exemplo a dicianodiamida, como agentes estabilizantes, não ligados quimicamente, que serão consumidos no lugar do papel isolante durante o envelhecimento [6].

Diferentemente dos dielétricos líquidos, o papel degradado não pode ser regenerado. Sendo assim, é o dielétrico sólido que determina o tempo de vida útil do transformador [7]. Por esta razão torna-se importante o estudo das características e dos mecanismos da degradação da celulose. Os parâmetros mais utilizados no estudo da degradação da celulose são: grau de polimerização (GP), compostos furânicos dissolvidos no óleo e gases dissolvidos no óleo (CO, CO₂).

O número de monômeros de D-glucose na fibra de celulose é determinado como grau de polimerização (GP). O papel isolante novo contém, normalmente, 1000 a 1100 monômeros no polímero de celulose. Quando o GP atinge 200 é considerado o final de vida útil do papel e, conseqüentemente, do transformador [6]. Normalmente esse tipo de ensaio é realizado apenas quando o transformador sai de operação, uma vez que não é possível retirar amostras do papel isolante com o equipamento em funcionamento [7].

Os furanos são alguns dos vários compostos químicos produzidos pelo envelhecimento e degradação do papel isolante em transformadores. As pesquisas envolvendo furanos começaram em 1980, época em que foi descoberto que a degradação térmica do papel isolante produz, entre outros compostos: 2-furfuraldeído (2-FAL), 5-hidroximetil-2-furfuraldeído (5-HMF), 2-acetilfurano (2-AC), 5-metil-2-furfuraldeído (5-MF) e álcool furfúrico (2-FOL). Uma vez formados, os compostos furânicos dividem-se entre o papel e o óleo isolante e sua concentração pode ser medida analisando-se amostras de óleo por cromatografia a líquido de alta eficiência (HPLC). Para a análise de furanos, amostras de óleo retiradas periodicamente do transformador são utilizadas e para a interpretação dos resultados três abordagens podem ser utilizadas: (i) correlação entre concentração de furanos no óleo e grau de polimerização do papel; (ii) comparação da concentração de furanos com um valor limite baseado em análises estatísticas e (iii) tendência da concentração de furanos ao longo do tempo [6].

Apesar da análise do teor de 2-FAL no óleo já estar bem estabelecida para o acompanhamento da degradação do papel kraft em OMI, o mesmo não acontece para o papel termoestabilizado, que tem apresentado teores muito baixos de 2-FAL durante seu envelhecimento. Portanto, vem sendo sugerida na literatura uma análise mais aprofundada dos furanos para avaliação do papel termoestabilizado, com ênfase especial no 2-FOL. Martins *et. al.* [8, 9] identificaram o 2-FOL como o composto de maior concentração no fluido isolante para amostras de papel termoestabilizado envelhecidas ao longo de 24 h sob diferentes temperaturas, pelas

análises do grau de polimerização, de 2-FOL e de 2-FAL. Já para amostras de papel convencional o 2-FAL continuou se mostrando como o composto furânico mais indicado.

Durante experimentos de envelhecimento térmico do sistema de isolamento papel-óleo, Jalbert *et. al.* [10-12] encontraram várias moléculas com potencial de diagnosticar problemas neste isolamento, entre elas acetaldeído, acetona, metanol, butanol, 2-butanona e etanol. Como subprodutos da degradação do papel foram encontrados acetona, metanol, butanol e etanol. A estabilidade destes compostos foi testada em diferentes temperaturas e o metanol apresentou maior estabilidade e solubilidade em OMI. Além disso, foi mostrado que o metanol é instantaneamente formado após a quebra da ligação glicosídica e, como consequência, detectado em estágios iniciais de degradação do sistema papel-óleo.

Apesar da existência de estudos sobre a utilização de 2-FOL como parâmetro de avaliação da degradação do papel termoestabilizado e do metanol como substituto dos furanos para avaliar a degradação dos papéis isolantes, esses estudos ainda são recentes e há necessidade de serem aprofundados.

Este trabalho tem como objetivo apresentar os primeiros resultados obtidos no estudo de envelhecimento térmico acelerado de diferentes sistemas de isolamento papel-óleo em laboratório.

II. METODOLOGIA

Para a confecção dos arranjos experimentais utilizados para o envelhecimento térmico acelerado de diferentes sistemas de isolamento papel-óleo foram utilizados os seguintes materiais:

- Frascos de vidro de 250 mL com tampa esmerilhada;
- Papel kraft convencional, marca Isoletri;
- Papel kraft termoestabilizado, marca Isoletri;
- Óleo mineral AV-60IN, marca Petrobras;
- Óleo vegetal Envirotemp FR-3, marca Cooper;
- Lâminas de cobre eletrolítico (99,99%).

A caracterização dos dielétricos sólidos (PC e PT) foi realizada por espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), em espectrofotômetro Bruker, modelo Vertex 70, utilizando a técnica de refletância com acessório de ATR horizontal em cristal de ZnSe de 4000cm⁻¹ a 650cm⁻¹ e por microscopia eletrônica de varredura (MEV), realizada segundo procedimento interno, utilizando microscópio eletrônico de varredura Philips, modelo XL30, com detector de energia dispersiva de raios-X. O ensaio de grau de polimerização foi realizado conforme a norma ABNT NBR 8148:2000 [13].

A caracterização dos dielétricos líquidos foi feita por meio dos ensaios de rigidez dielétrica [14], teor de água [15], densidade a 20°C [16], tensão interfacial [17], índice de neutralização [18], perdas dielétricas a 100°C [19], ponto de fulgor [20], ponto de combustão [20], viscosidade a 40°C e a 100°C [21], ponto de fluidez [22], enxofre corrosivo [23] e composição carbônica [24].

Para avaliação da degradação dos diferentes tipos de isolamento papel-óleo foram preparados quatro sistemas, sendo: (i) PT-OMI, (ii) PC-OMI (Figura 1), (iii) PT-OVI e (iv) PC-OVI (Figura 1).



Figura 1. Sistemas PC-OMI e PC-OVI, respectivamente.

Os frascos foram devidamente identificados e secos em estufa a 100°C por 1 h. Quando a temperatura dos frascos entrou em equilíbrio com a temperatura ambiente completou-se com 210 mL de óleo e borbulhou-se nitrogênio por 10 min para eliminação de oxigênio das amostras, como mostrado na Figura 2. Tiras de 2 m de comprimento e 1 cm de largura dos dois tipos de papéis foram secas em estufa sob vácuo a 100°C por 2 h e inseridas nos frascos. Ainda, lâminas de cobre eletrolítico, de 1 cm de largura por 2 cm de comprimento foram lixadas e limpas com carvão de silício e acetona e adicionadas aos sistemas.

Após preparo os frascos foram colocados nas estufas para envelhecimento térmico acelerado. As amostras contendo óleo vegetal foram envelhecidas nas temperaturas de 75 °C e 100 °C e as amostras contendo óleo mineral foram envelhecidas nas temperaturas de 100 °C e 125 °C. A retirada dos frascos ocorreu a cada 15 dias por um período de 135 dias. Em cada retirada foram avaliadas as características físico-químicas dos dielétricos líquidos. A determinação de compostos furânicos foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 15349 [25] para o OMI e metodologia interna baseada em Akplinar *et. al.* [26] para o OVI.



Figura 2. Borbulhamento de N₂ nas amostras de OVI.

Antes das análises das amostras de dielétricos sólidos foi feita a extração do óleo impregnado com o auxílio do equipamento ASE 200 Accelerated Solvent Extractor marca Dionex, à temperatura de 100°C e pressão de 100 psi utilizando hexano como solvente e tempo de extração de 30 min, metodologia que se mostrou bastante eficiente na extração do óleo. Após o processo de extração, as amostras de papel isolante foram colocadas em estufa a 100°C por 1 h e deixadas em dessecador até a realização do ensaio de GP segundo a norma ABNT NBR 8148 [13].

III. RESULTADOS

A. Caracterização dos dielétricos sólidos novos

A Tabela I apresenta os resultados do ensaio de GP das amostras de papéis isolantes novos, após a secagem. Os valores obtidos para ambos são próximos e adequados ao que é estabelecido em norma, que indica valores acima de 1000.

Tabela I. Valores de GP para os papéis novos.

Amostra	Grau de polimerização
Papel kraft convencional	1157
Papel kraft termoestabilizado	1111

As amostras de papéis novos passaram por análise de espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Conforme a Figura 3, os espectros das amostras dos dois tipos de papéis são bastante parecidos, exceto pela presença de um duplete na região de 2150 cm⁻¹ no espectro obtido para o PT. Essa banda refere-se à ligação C≡N presente no composto nitrogenado utilizado na termoestabilização do PT.

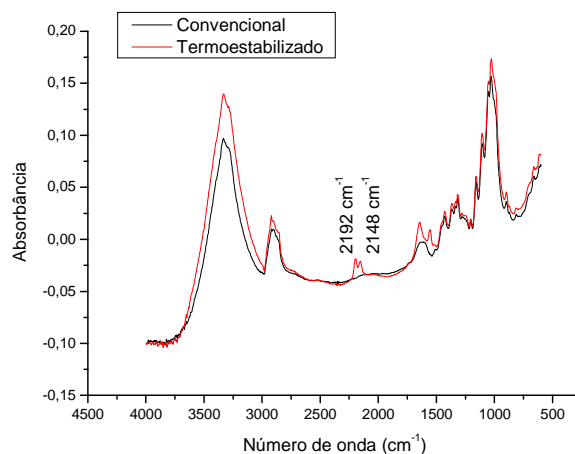


Figura 3. Espectro FTIR-ATR dos papéis convencional e termoestabilizado.

A Figura 4 mostra as imagens de MEV da superfície das fibras dos papéis. Nota-se que as fibras do PC apresentam-se mais lisas que as do PT. Sugere-se que isto possa estar ocorrendo devido ao processamento utilizado na termoestabilização.

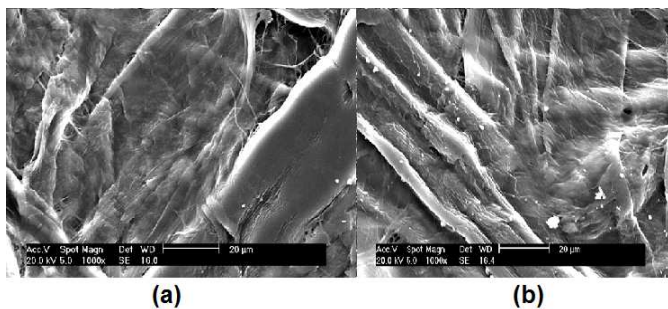


Figura 4. Imagens obtidas por MEV dos papéis (a) convencional e (b) termoestabilizado.

B. Caracterização dos dielétricos líquidos novos

Nas Tabelas II e III estão apresentados os resultados da caracterização do OMI e do OVI, respectivamente. Os valores limites referenciados nas tabelas constam na Resolução ANP nº 36 de 05/12/08 [27] para o OMI e na norma ABNT NBR 15422:2006 [28] para o OVI.

Tabela II. Caracterização físico-química das amostras novas de OMI.

Ensaio	Limites	AV-60IN
Índice de neutralização	máx. 0,03 mg de KOH/g óleo	0,01 mg de KOH/g óleo
Teor de água	máx. 35 ppm	17 ppm
Densidade a 20 ^o C	0,861-0,900 g/cm ³	0,8894 g/cm ³
Fator de potência a 100 ^o C	máx. 0,50%	0,08%
Rigidez dielétrica	mín. 30 kV	57 kV
Ponto de fulgor	mín. 140 ^o C	138 ^o C
Viscosidade a 40 ^o C	máx. 11,0 mm ² /s(cSt)	10,31 mm ² /s(cSt)
Viscosidade a 100 ^o C	máx. 3,0 mm ² /s(cSt)	-
Ponto de fluidez	máx. -39 ^o C	-
Tensão interfacial	mín. 40 dina/cm	51,2 dina/cm
Enxofre corrosivo	Não corrosivo	Não corrosivo
Carbono aromático	-	4%
Carbono parafínico	-	48%
Carbono naftênico	-	48%

Entre os resultados obtidos chama a atenção o elevado teor de água, a baixa rigidez dielétrica e o alto fator de perdas dielétricas encontrados no OVI. Destaca-se ainda o ponto de fulgor bastante alto do OVI quando comparado ao OMI, o que o caracteriza como um fluido de segurança.

Tabela III. Caracterização físico-química das amostras novas do OVI.

Ensaio	Limites	Cooper FR3
Índice de neutralização	máx. 0,06 mg de KOH/g óleo	0,02 mg de KOH/g óleo
Teor de água	200 ppm	54 ppm
Densidade a 20 ^o C	máx. 0,96 g/cm ³	0,9192 g/cm ³
Fator de potência a 100 ^o C	máx. 4,0%	3,9 %
Rigidez dielétrica	mín. 30 kV	36 kV
Ponto de fulgor	mín. 275 ^o C	308 ^o C
Ponto de combustão	mín. 300 ^o C	342 ^o C
Viscosidade a 40 ^o C	máx. 50 mm ² /s(cSt)	35,99 mm ² /s(cSt)
Viscosidade a 100 ^o C	máx. 15 mm ² /s(cSt)	8,57 mm ² /s(cSt)
Ponto de fluidez	máx. -10 ^o C	-7 ^o C
Tensão interfacial	Não se aplica	Não se aplica

Devido à característica polar do OVI, o ensaio de tensão interfacial não se aplica a este dielétrico. A tensão entre a água e o OVI é baixa devido à interação da extremidade polar das moléculas do óleo com a água, também polar. As-

sim, não seria possível identificar, para óleos em uso, se a baixa tensão interfacial deve-se a essa interação ou à presença de compostos ácidos formados durante sua degradação.

C. Envelhecimento térmico acelerado – dielétricos líquidos

A mudança de coloração observada na documentação fotográfica das Figuras 6 a 10 indica a ocorrência de oxidação dos óleos ao longo do envelhecimento. Esta documentação foi realizada sempre no período da manhã, porém em dias e bancadas diferentes. De qualquer forma, o objetivo da mesma é evidenciar a ocorrência de alteração na coloração dos óleos ao longo do tempo, independentemente da graduação desta variação de coloração. A formação de compostos ácidos no OMI leva à formação de borra, que tende a precipitar e ocasionar o escurecimento do óleo. Na Figura 7 nota-se o início da formação de borra nas amostras de OMI. Num caso real, a borra formada pode se depositar nos componentes presentes no transformador, podendo ocorrer sobreaquecimento e, conseqüentemente a queima do equipamento.



Figura 6. Amostras retiradas após 30 dias de envelhecimento, sendo: (a) PT-OMI a 100^oC; (b) PC-OMI a 100^oC; (c) PT-OMI a 125^oC; (d) PC-OMI a 125^oC; (e) PT-OVI a 75^oC; (f) PC-OVI a 75^oC; (g) PT-OVI a 100^oC e (h) PC-OVI a 100^oC.



Figura 7. Amostras retiradas após 60 dias de envelhecimento, sendo: (a) PT-OMI a 125^oC; (b) PC-OMI a 125^oC; (c) PC-OMI a 100^oC; (d) PT-OMI a 100^oC; (e) PT-OVI a 100^oC; (f) PC-OVI a 100^oC; (g) PC-OVI a 75^oC e (h) PT-OVI a 75^oC.

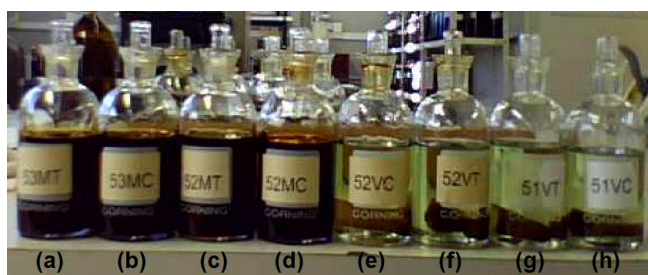


Figura 8. Amostras retiradas após 75 dias de envelhecimento, sendo: (a) PC-OMI a 125^oC; (b) PT-OMI a 125^oC; (c) PC-OMI a 100^oC; (d) PT-OMI a 100^oC; (e) PT-OVI a 100^oC; (f) PC-OVI a 100^oC; (g) PC-OVI a 75^oC e (h) PT-OVI a 75^oC.



Figura 9. Amostras retiradas após 105 dias de envelhecimento, sendo: (a) PT-OVI a 75°C; (b) PC-OVI a 75°C; (c) PT-OVI a 100°C; (d) PC-OVI a 100°C; (e) PT-OMI a 100°C; (f) PC-OMI a 100°C; (g) PT-OMI a 125°C e (h) PC-OMI a 125°C.



Figura 10. Amostras retiradas após 135 dias de envelhecimento, sendo: (a) PT-OVI a 75°C; (b) PC-OVI a 75°C; (c) PT-OVI a 100°C; (d) PC-OVI a 100°C; (e) PT-OMI a 100°C; (f) PC-OMI a 100°C; (g) PT-OMI a 125°C e (h) PC-OMI a 125°C.

Na Figura 11 é apresentado o resultado do ensaio de tensão interfacial para o OMI. Este ensaio é importante para avaliar a formação de compostos polares (geralmente ácidos) no óleo. A diminuição da tensão interfacial apresentada pelas amostras que continham OMI indica a ocorrência da oxidação do óleo isolante e, conseqüentemente a formação de compostos polares, principalmente ácidos carboxílicos. O comportamento dos sistemas PC-OMI e PT-OMI é bastante similar.

Conforme já comentado, durante a utilização do óleo, este está sujeito a processos de oxidação, formando ácidos como produtos de degradação. Estes produtos reagem com componentes do equipamento, principalmente o papel, diminuindo o tempo de vida do transformador. Os resultados do ensaio de índice de neutralização para o OMI estão apresentados na Figura 12. Observa-se um aumento no índice de neutralização nos sistemas papel-óleo avaliados, confirmando a formação de compostos ácidos durante o envelhecimento do óleo. Os ensaios de índice de neutralização para o OVI estão ainda sendo realizados.

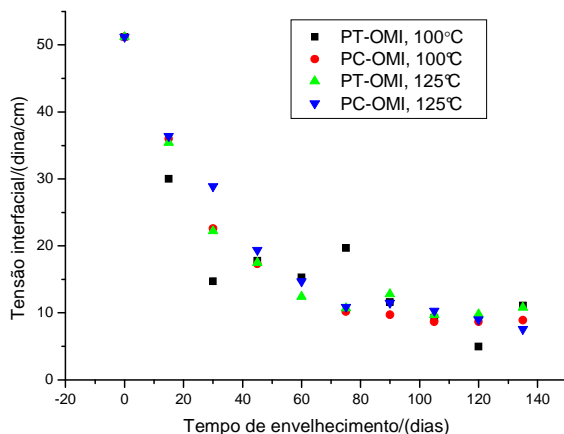


Figura 11. Tensão interfacial das amostras de OMI.

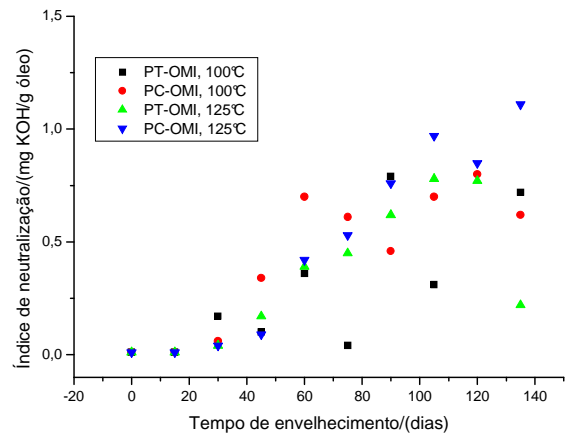


Figura 12. Índice de neutralização das amostras de OMI.

O teor de água é a medida da quantidade de água contida no óleo isolante. A umidade está sempre presente nos líquidos isolantes e pode prejudicar as características de isolamento dos óleos, diminuindo a rigidez dielétrica e aumentando as perdas dielétricas. Atua, ainda, como agente catalisador na decomposição da celulose, diminuindo a vida útil do equipamento.

Os resultados de teor de água são apresentados nas Figuras 13 e 14 para o OMI e OVI, respectivamente. Pode ser notado que as amostras de OVI possuem teores de água até dez vezes maiores do que as amostras de OMI. Fluidos polares como o OVI apresentam maior afinidade com a água do que fluidos apolares (OMI). Assim, no presente caso o OVI pode estar retirando resquícios de umidade do papel isolante [5], absorvendo a umidade do ambiente ou, ainda, a solução de Karl Fischer estar quantificando os grupos hidroxila contidos nas moléculas de OVI, juntamente com a água presente.

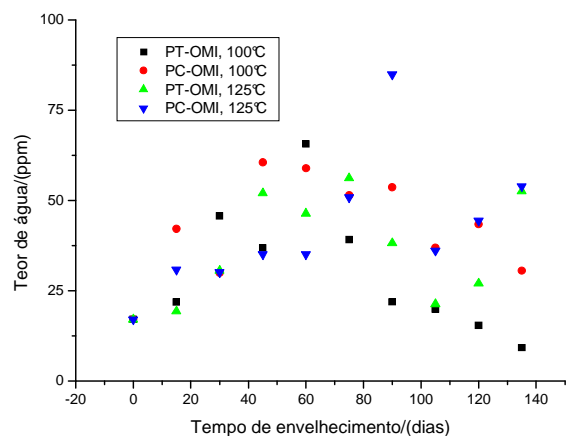


Figura 13. Teor de água em amostras de OMI.

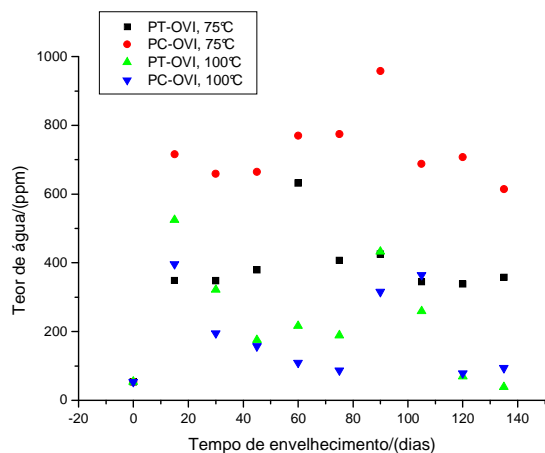


Figura 14. Teor de água em amostras de OVI.

As perdas dielétricas constituem uma medida da perda de energia na forma de calor do líquido isolante quando este é submetido a um campo elétrico alternado [2]. De forma geral, as perdas dielétricas tendem a aumentar na medida em que o óleo isolante degrada. Esse aumento pode ser visto nos gráficos das Figuras 15 e 16. Observa-se que os resultados para os dois óleos são semelhantes, mesmo as amostras de OVI apresentando maiores índices de neutralização e teores de água. Como o ensaio de perdas dielétricas é realizado à temperatura próxima da temperatura de ebulição da água, é possível que a água livre presente no OVI esteja sendo liberada para o meio na forma de vapor e os resultados obtidos no ensaio não estejam sendo influenciados pela concentração de água neste óleo como ocorre nos ensaios de índice de neutralização e teor de água.

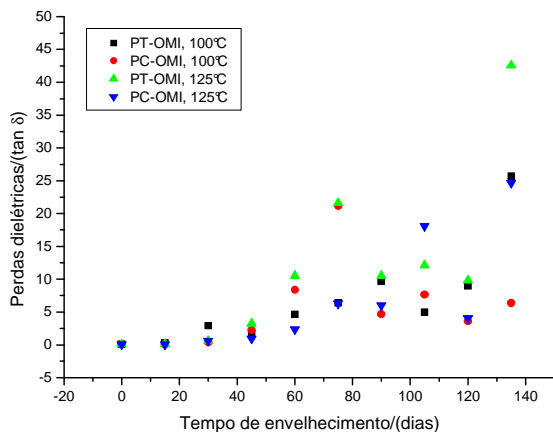


Figura 15. Perdas dielétricas de amostras de OMI.

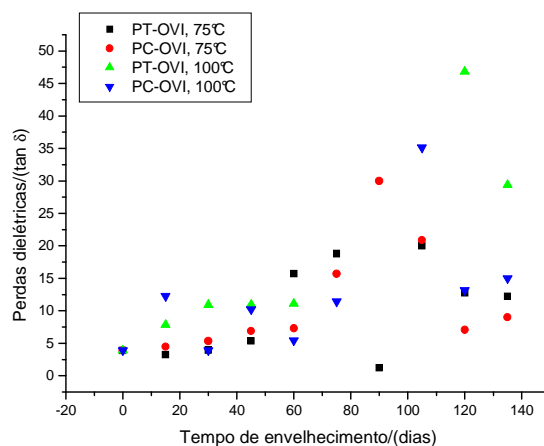


Figura 16. Perdas dielétricas de amostras de OVI.

A quantificação dos compostos furânicos nas amostras de OMI é realizada conforme a Norma ABNT NBR 15349:2006 [25], entretanto, o método de extração adotado nela não foi eficiente para amostras de OVI, devido à sua polaridade e composição química.

Após várias tentativas de encontrar formas de extração de compostos furânicos eficientes para o OVI, optou-se em utilizar a descrita por Akplinar *et al.* [26], onde é indicada uma metodologia de extração adaptada da seguinte forma: tomou-se 5 mL de amostra de óleo e procederam-se 3 extrações sucessivas utilizando-se 3 mL de solvente 70% acetone nitrila e 30% água com agitação vigorosa e separação das fases em centrífuga; a fase superior das três extrações foi homogeneizada e o volume aferido para 10mL em balão volumétrico.

A concentração de 2-FAL nas amostras após envelhecimento acelerado, como pode ser visto nas Figuras 17 e 18, oscilou muito durante o envelhecimento, principalmente para a amostra de PC a 125°C. A linha base indica o limite de detecção (LD) do equipamento, 0,1mg/L para o OMI e 0,5mg/L para o OVI. Esta diferença no LD justifica-se pelas diferentes metodologias adotadas para a extração dos compostos furânicos dos diferentes óleos isolantes.

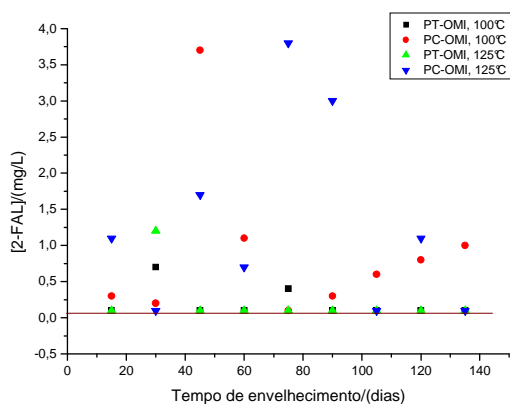


Figura 17. Concentração de 2-FAL em amostras de OMI.

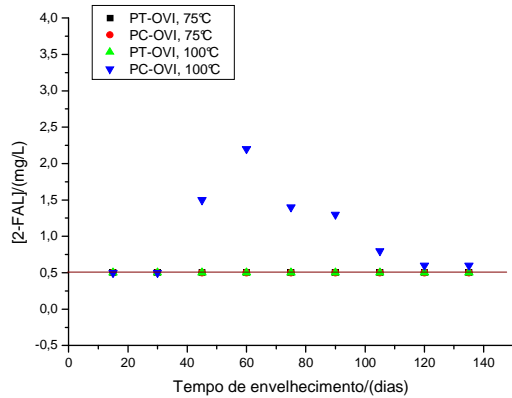


Figura 18. Concentração de 2-FAL em amostras de OVI.

A concentração de 2-FOL não variou muito durante o tempo de envelhecimento. Os resultados obtidos para este ensaio encontram-se nas Figuras 19 e 20. Os limites de detecção do 2-FAL são válidos para o 2-FOL.

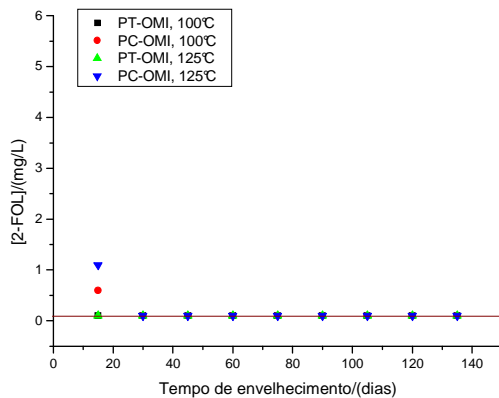


Figura 19. Concentração de 2-FOL em amostras de OMI.

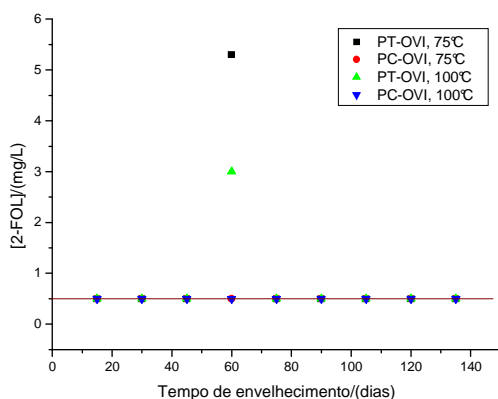


Figura 20. Concentração de 2-FOL em amostras de OVI.

Desta forma, os resultados das análises de 2-FAL e 2-FOL obtidos até o momento não foram conclusivos, sendo necessária a realização de mais testes para uma melhor avaliação dos sistemas em estudo.

D. Envelhecimento térmico acelerado – dielétricos sólidos

Os resultados de GP, mostrados na Figura 23, indicaram a menor degradação das amostras de PT-OVI em relação às demais. Ainda, observa-se um comportamento do PC-OVI semelhante ao do PT-OMI, tendo o sistema PC-OMI o pior comportamento apresentado. Após 15 dias de envelhecimento, com exceção do sistema PT-OVI, as amostras apresentaram, em média, redução de 50% do GP, porcentagem que aumenta à medida que o envelhecimento progride, mais acentuadamente para o sistema PC-OMI. Autores como Liao e colaboradores [7] trabalham com a hipótese de que o OVI reagiria com a molécula de celulose, modificando-a quimicamente, através da substituição das hidroxilas por grupos maiores e mais estáveis, tornando-a mais resistente à hidrólise e diminuindo o efeito da umidade sobre a degradação do papel [5]. Os resultados obtidos neste estudo parecem ir de encontro a esta hipótese.

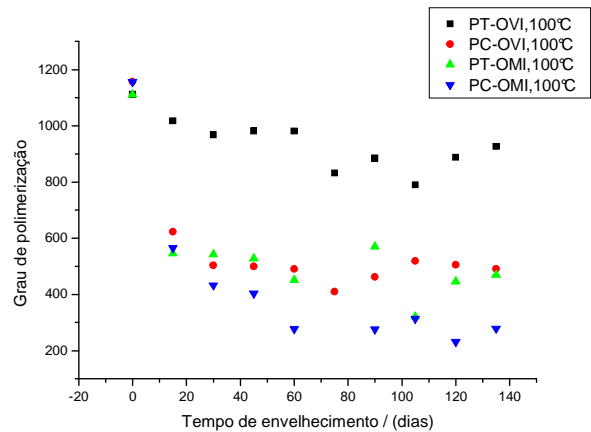


Figura 23. GP de amostras de papéis envelhecidos a 100°C em OMI e OVI.

E. Outros Resultados Científicos e Tecnológicos

Ao seu final o projeto terá como resultados científicos e tecnológicos uma Dissertação de Mestrado da aluna Larissa Mildemberger a ser defendida em março de 2014 pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade Federal do Paraná (PIPE-UFPR), além da publicação de artigos em outros eventos do Setor Elétrico Nacional e revista indexada.

Como apoio à infraestrutura, o projeto proporcionou a aquisição de uma célula de dielétricos líquidos para o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), que está sendo utilizada para medidas dielétricas em líquidos isolantes.

IV. CONCLUSÕES

Dos estudos realizados até o presente é possível verificar que o OVI novo tem propriedades semelhantes às do OMI novo, com a vantagem de ser um fluido de segurança com alto ponto de fulgor. Observa-se ainda que o OVI novo apresentou teor de água mais elevado e rigidez dielétrica menor do que a do OMI novo, porém seus valores estão dentro dos limites recomendados pela norma ABNT NBR

15422:2006, não comprometendo seu desempenho dielétrico.

A análise de FTIR com ATR permitiu distinguir os dois tipos de papéis isolantes novos avaliados: convencional e termoestabilizado.

Para o período de envelhecimento acelerado avaliado, os compostos furânicos não apresentaram variação significativa. O 2-FOL não se apresentou como um indicador efetivo para o acompanhamento da degradação do papel termoestabilizado.

O monitoramento do grau de polimerização foi utilizado para definir o final do envelhecimento acelerado, tendo em vista que, com exceção do sistema PT-OVI, todos os demais apresentaram redução no GP de mais de 50% a partir de 15 dias de envelhecimento. Os resultados de GP deste estudo indicaram que o OVI tem a capacidade de proteger o papel isolante.

V. AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) pelo apoio técnico e de infraestrutura para o desenvolvimento deste projeto e à Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP) pelo apoio financeiro. À UFPR e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais pela oportunidade de desenvolvimento deste projeto junto à instituição. Ao CNPq pelo benefício da lei 8010/90.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BATISTA, D. A. “Desenvolvimento de metodologia colorimétrica para dosagem de compostos furânicos em óleo mineral isolante”. Dissertação de Mestrado, Curitiba: UFPR, 2005.
- [2] TULIO, L. “Estudo do Envelhecimento Acelerado do Óleo Vegetal Isolante em Escala Laboratorial”. Dissertação de Mestrado, Curitiba: PRODETEC, 2008.
- [3] IMAD-U-KHAN, WANG, Z., COTTON, I. “Dissolved Gas Analysis of Alternative Fluids for Power Transformers” IEEE Electrical Insulation Magazine, set/out, 2007.
- [4] YANG, L., LIAO, R., SUN, C., YIN, J., ZHU, M. “Influence of Vegetable Oil in the Thermal Aging Rate of Kraft Paper and its Mechanism”. IEEE, pp. 381-384, 2010.
- [5] FRIMPONG, G. K., OOMMEN, T. V., ASANO, R. “A Survey of Aging Characteristics of Cellulose Insulation in Natural Ester and Mineral Oil”, IEEE, pp. 36-48, 2011.
- [6] CHEIM, L., PLATTS, D., PREVOST, T., XU, S. “Furan Analysis for Liquid Power Transformers”, IEEE, pp. 8-21, 2012.
- [7] LIAO, R., XIANG, B., YANG, L., TANG, C. “Study on the Thermal Aging Characteristics and Bond Breaking Process of Oil-Paper Insulation in Power Transformer”, IEEE, pp. 291-296, 2008.
- [8] MARTINS, M. A. “Furfuraldeído – Um indicador Prático da Degradação Térmica do Papel Kraft de Transformadores”, Ciência e Tecnologia de Materiais, vol. 19, pp. 25-33, 2007.
- [9] MARTINS, M. A. “Monitorização da Degradação Térmica do Papel Isolante Usado em Transformadores. Papel “Thermally Upgraded” versus Papel Kraft”, Ciência e Tecnologia dos Materiais, vol. 19, n°1-2, 2007.
- [10] GILBERT, R., JALBERT, J., DUCHESNE, S., TÉTREAUULT, P., MORIN, B., DENOS, Y. “Kinetics of the production of chain-end groups and methanol from the despolymerization of cellulose during the ageing of paper/oil system. Part 2: Thermally-upgraded insulation papers” Cellulose, November, 2009.
- [11] JALBERT, J., GILBERT, R., DENOS, Y., GERVAIS, P. “Methanol: a Novel Approach to Power Transformer Asset Management” IEEE Transactions on Power Delivery, 2012.
- [12] JALBERT, J., GILBERT, R., TÉTREAUULT, P., MORIN, M., LESSARD-DÉZIEL, D. “Identification of a chemical indicator of the rupture of 1,4-B-glycosidic bonds of cellulose in an oil-impregnated insulating paper system” Cellulose, vol. 14, pp. 295-309, 2007.
- [13] ABNT NBR 8148:1998 “Papéis e papelões celulósicos, Novos e envelhecidos, para fins elétricos - Medida do grau de polimerização viscosimétrico médio - Método de ensaio”.
- [14] ABNT NBR 6869:1989 “Líquidos isolantes elétricos - Determinação da rigidez dielétrica (eletrodos de disco)”.
- [15] ABNT NBR 10710:2006 “Líquido isolante elétrico - Determinação do teor de água”.
- [16] ABNT NBR 7148:2001 “Petróleo e produtos de petróleo - Determinação da massa específica, densidade relativa e °API - Método do densímetro”.
- [17] ABNT NBR 6234:1963 “Método de ensaio para a determinação de tensão interfacial de óleo-água”.
- [18] ABNT MB 101:1962 “Determinação do índice de neutralização de produtos de petróleo (por fenolftalina)”.
- [19] ABNT NBR 12133:1991 “Líquidos isolantes elétricos - Determinação do fator de perdas dielétricas e da permissividade relativa (constante dielétrica) - Método de ensaio”.
- [20] ABNT NBR 11341:2004 “Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland”.
- [21] ABNT NBR 10441:2007 “Produtos de petróleo - Líquidos transparentes e opacos - Determinação da viscosidade cinemática e cálculo da viscosidade dinâmica”.
- [22] ABNT NBR 11349:1990 “Produto de petróleo - Determinação do ponto de fluidez - Método de ensaio”.
- [23] ABNT NBR 10505:2012 “Óleo mineral isolante — Determinação de enxofre corrosivo”.
- [24] ASTM D-2140:2008 “Standard Practice for Calculating Carbon-Type Composition of Insulating Oils of Petroleum Origin”.
- [25] ABNT NBR 15349:2006 “Óleo mineral isolante – Determinação de 2-furfural e seus derivados (método por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC))”.
- [26] AKPINAR, K., KARASAS, B., AKÇA, H., CERTEL, M. “Determination of HMF in roasted flour/oil mixtures and effect of solvent used in the extraction procedure”. Food Chem., vol. 128, n°03, pp 790-794, 2011.
- [27] ANP. Resolução n° 36, de 05 de dezembro de 2008.
- [28] ABNT NBR 15422:2006 “OVIs para equipamentos elétricos - Especificação”.