



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

BR/GTM/30
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

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

**ESTUDO DE MARCADORES QUÍMICOS EM ÓLEOS MINERAL E VEGETAL ISOLANTES PARA
ACOMPANHAMENTO DA DEGRADAÇÃO DE PAPÉIS ISOLANTES DE TRANSFORMADORES**

Larissa Mildemberger(*) UFPR	Claudio A. Deger LACTEC	Guilherme B. Stocco LACTEC	Guilherme C. da Silva LACTEC	Heloisa N. da Motta LACTEC
Joseane V. Gulmine LACTEC	Juliano de Andrade LACTEC	Mario C. Andreoli CTEEP	Rodrigo S. Ferreira LACTEC	Vitoldo Swinka Filho LACTEC
	Viviane V. Calixto LACTEC	Marilda Munaro LACTEC		

RESUMO

O presente trabalho apresenta os resultados da avaliação de sistemas de isolamento papel-óleo, utilizados em transformadores, frente ao envelhecimento térmico acelerado. Foram avaliadas combinações de papéis isolantes convencional (PC) e termoestabilizado (PT) e óleos isolantes mineral (OMI) e vegetal (OVI). Para o estudo de marcadores químicos, realizaram-se quantificações de compostos furânicos nas amostras de OMI e OVI e determinação do grau de polimerização (GP) das amostras de PC e PT. Os resultados obtidos indicaram que, para esse envelhecimento, os compostos furânicos não se mostraram indicadores químicos eficientes devido ao comportamento apresentado na quantificação e falta de correlação com o GP.

PALAVRAS-CHAVE

Óleo, papel, transformadores, envelhecimento.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência são equipamentos fundamentais no sistema elétrico seja na geração, transmissão ou distribuição de energia elétrica, permitindo a passagem da energia de um circuito a outro com variação de corrente e tensão a fim de evitar possíveis perdas durante o percurso [1, 2].

Entre os constituintes do transformador está o sistema de isolamento, composto de um dielétrico líquido em combinação com um dielétrico sólido. O dielétrico sólido mais utilizado no setor elétrico é o papel kraft isolante. O dielétrico líquido por sua vez é o óleo mineral isolante (OMI), devido às suas boas características dielétricas e físico-químicas e ao baixo custo. Contudo, há desvantagens em utilizá-lo: por ser um derivado de petróleo, procura-se diminuir ou até eliminar a sua utilização devido a questões ambientais. Além disso, o OMI é inflamável e sua biodegradabilidade é lenta [3]. Sendo assim, a procura de novos líquidos isolantes tem se tornado foco de pesquisa em todo mundo. Alguns líquidos como silicone, óleo vegetal e éster sintético têm sido testados no mercado.

O óleo vegetal isolante (OVI) apresenta vantagens como biodegradabilidade mais rápida, segurança contra incêndio e abundância de matéria-prima, sendo um bom substituto para o OMI. Neste sentido, muitas pesquisas têm sido realizadas a fim de comparar o OVI com o OMI [4].

Resultados descritos por Fofana et. al. [4] mostraram que o OVI novo possui menor rigidez dielétrica, maior fator de perdas dielétricas e maior teor de água quando comparado ao OMI, devido à característica polar das moléculas presentes no OVI e consequente afinidade deste óleo pela água. De acordo com Frimpong e colaboradores [5] a

(*) Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Prédio da Administração, 2º andar – CEP 81.531-990 Curitiba, PR, Brasil
Tel: (+55 41)3361-6249 – Email: larissa.mildemberger@lactec.org.br

solubilidade limite da água em OVI é 16 vezes maior em temperatura ambiente e cerca de 4 vezes maior a temperaturas próximas de 100°C do que a solubilidade em OMI.

Após o estudo de sistemas contendo papel envelhecido em OVI e OMI, Martins et. al. [6] concluíram que a taxa de envelhecimento do dielétrico sólido é diminuída em óleo vegetal. Os autores observaram que em temperaturas menores que 130°C, o grau de polimerização (GP) do papel envelhecido em OVI é menor que em OMI e o inverso é observado acima desta temperatura, possivelmente devido ao processo de transesterificação da celulose, onde longas cadeias de ácidos graxos ligar-se-iam à celulose e formariam uma barreira ao ingresso de água levando à diminuição da taxa de deterioração do papel isolante pelo efeito da umidade, processo favorecido pelo o aumento da temperatura [5].

Estudos mostraram, ainda, que o óleo mineral tem 30% de biodegradabilidade em 28 dias enquanto que para o OVI, essa taxa sobe para 97% para o mesmo tempo [7]. Entretanto, no caso de vazamentos e derramamentos, o impacto inicial na área ocorrerá da mesma forma para ambos os fluidos, apenas com o passar do tempo o OMI necessitará de maior intervenção no local.

Para a utilização segura do OVI é necessário projeto específico de transformador, não bastando a simples substituição de um tipo de óleo isolante por outro, principalmente devido às diferentes viscosidades que ambos apresentam. Ainda, existe uma normatização para OVI novos [8], mas não há normatização para esses óleos em uso e não é conhecido o desempenho dos OVI quando usados em transformadores por um longo período de tempo [4]. Por estas razões e pelo OVI apresentar algumas características não satisfatórias como, por exemplo, não responder bem ao ensaio de estabilidade à oxidação e apresentar maior viscosidade [7], ainda há receio por parte de algumas concessionárias na sua utilização em grande escala, principalmente em transformadores de potência.

Vale ressaltar que, de qualquer forma, quando da perda das características físico-químicas ou dielétricas necessárias para o bom desempenho do transformador, o dielétrico líquido pode ser regenerado ou trocado, o que não ocorre com o dielétrico sólido.

O dielétrico sólido normalmente empregado é o papel kraft isolante, denominado papel convencional (PC). Atualmente, tem-se utilizado em grande escala o papel termoestabilizado (PT) que possui parte da estrutura original do PC modificada pela adição de agentes estabilizantes não ligados quimicamente à celulose, como dicianodiamida e melamina, que, aparentemente, serão consumidos durante o envelhecimento, preservando o papel [9]. Diferentemente dos dielétricos líquidos, o papel degradado não pode ser regenerado nem trocado. Sendo assim, é o dielétrico sólido que determina o tempo de vida útil do transformador [9]. Por esta razão torna-se importante o estudo das características e mecanismos da degradação deste papel. Os parâmetros mais utilizados neste tipo de estudo são: grau de polimerização (GP) e compostos furânicos (ou furanos) dissolvidos no óleo.

O número de monômeros de D-glucose na fibra de celulose é determinado como 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 do papel e, conseqüentemente, do transformador [6]. Esse tipo de ensaio é realizado apenas quando o transformador sai de operação, uma vez que não é possível retirar amostras de papel isolante com o equipamento em funcionamento [10].

Os furanos são alguns dos vários compostos químicos produzidos pelo envelhecimento e degradação do papel isolante em transformadores. Pesquisas envolvendo furanos começaram na década de 1980, época em que se descobriu que a degradação térmica do papel isolante produz, dentre outros compostos: 2-furfuraldeído (2-FAL), 5-hidroximetil-2-furfuraldeído (5-HMF), 2-acetilfurano (2-AC), 5-metil-2-furfuraldeído (5-MF) e álcool furfurílico (2-FOL). Quando formados, estes compostos dividem-se entre o papel e o óleo isolante e sua quantificação pode ser feita através da análise de amostras de óleo por cromatografia a líquido de alta eficiência (HPLC). Compostos furânicos são basicamente formados pela degradação do papel isolante, indicando assim a ocorrência desta degradação quando presentes no óleo. A análise de furanos não é intrusiva: amostras de óleo retiradas do transformador são utilizadas para este ensaio. Três diferentes formas de interpretação do teste de furanos são utilizadas normalmente: (i) correlação entre a concentração no óleo e o grau de polimerização do papel; (ii) comparação da concentração com um valor limite baseado em análises estatísticas e (iii) tendência da concentração ao longo do tempo [7]. Por ser o último composto a se formar a partir dos demais e, conseqüentemente, ser o mais estável em OMI, a análise baseia-se no 2-FAL.

Embora a quantificação de furanos no óleo esteja bem consolidada, vem sendo sugerida na literatura uma análise mais complexa desses compostos, com ênfase especial no 2-FOL. Para amostras de PT envelhecidas ao longo de 24 h sob diferentes temperaturas, Martins et. al. [11,12] avaliaram os teores de 2-FOL e de 2-FAL, identificando o 2-FOL como o composto de maior concentração no fluido. Já para amostras de PC o 2-FAL continuou se mostrando o melhor indicador da degradação do papel.

Jarbert et. al. [13-15] encontraram durante o envelhecimento térmico do sistema de isolamento papel/óleo várias moléculas com potencial de diagnosticar problemas, 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 a mais alta

estabilidade e solubilidade em óleo entre eles. Além disso, o metanol seria instantaneamente formado após a quebra da ligação glicosídica e, como consequência, detectado cedo no óleo. A identificação dos compostos acima citados foi realizada por meio de cromatografia a gás acoplada a detector de massa (CG-MS).

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

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

2.0 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a confecção dos arranjos experimentais utilizados no envelhecimento térmico acelerado de diferentes sistemas de isolamento papel-óleo foram utilizados os seguintes materiais:

- Frascos de DBO, confeccionados em vidro, com volume aproximado de 250mL, com tampa esmerilhada;
- Papel kraft convencional, marca Isoletri;
- Papel kraft termoestabilizado, marca Isoletri;
- Óleo mineral AV-60IN, marca Petrobras;
- Óleo vegetal Envirottemp FR-3, marca Cooper;
- Lâminas de cobre eletrolítico (99,99%);
- Acetona comercial marca Synth;
- Carbureto de silício (150 mesh).

A caracterização dos dielétricos sólidos novos (PC e PT) foi realizada por grau de polimerização (GP) conforme a norma ABNT NBR 8148:1998 [15]. A caracterização dos dielétricos líquidos novos foi feita através dos ensaios de rigidez dielétrica [17], teor de água [18], densidade a 20°C [19], tensão interfacial [20], índice de neutralização [21], perdas dielétricas a 100°C [22], ponto de fulgor [23], ponto de combustão [24], viscosidade a 40°C e a 100°C [25], ponto de fluidez [25], enxofre corrosivo [26] e composição carbônica [27].

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

Inicialmente os frascos foram devidamente identificados e secos em estufa a 100°C por 1 h. A seguir, adicionou-se 210 mL de óleo e borbulhou-se nitrogênio por 10 min para eliminação de oxigênio das amostras. Tiras de 2 m de comprimento e 15 mm de largura dos papéis foram enroladas e secas em estufa sob vácuo a 100°C por 2 h e inseridas 2 unidades destas em cada frasco. Ainda, lâminas de cobre eletrolítico, de 1 cm de largura por 2 cm de comprimento, lixadas e polidas com carbeto de silício e acetona, foram adicionadas aos sistemas a fim de reproduzir a proporção desses materiais encontrada nos equipamentos.

Após preparo, as amostras foram dispostas em estufas da seguinte maneira: as amostras contendo óleo vegetal foram colocadas em estufas a 75 °C e a 100 °C e as amostras com óleo mineral, em estufas a 100 °C e a 125 °C. A escolha das temperaturas foi baseada em trabalhos anteriores [2], onde se observou que acima de 100°C ocorreu a oligomerização das amostras de OVI e, abaixo dessa temperatura, a degradação do sistema em OMI foi muito lenta.

A retirada dos frascos ocorreu a cada 15 dias por um período de 135 dias. Foram avaliadas as características físico-químicas dos dielétricos líquidos. A determinação de compostos furânicos foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 15349 [28] sendo que se adotou uma metodologia interna para a extração dos compostos furânicos do OVI, uma vez que a realizada conforme a norma não se mostrou eficiente devido à polaridade do mesmo. Optou-se, então, em utilizar a descrita por Akplinar *et al.* [29] e adaptada da seguinte forma: tomaram-se 5 mL de amostra de óleo e procederam-se 3 extrações repetidas utilizando 3 mL de solvente 70% acetonitrila 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 10 mL em balão volumétrico. A injeção das amostras de OVI foi realizada da mesma forma que para o OMI. Entretanto, devido à modificação da metodologia de extração e à necessidade de utilização de 5 vezes mais solução extratora para o OVI, o limite de detecção (LD) foi 0,1 mg/L para o OMI e 0,5 mg/L para o OVI.

Antes do ensaio de GP das amostras de dielétricos sólidos envelhecidas 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 1000 psi utilizando hexano como solvente e tempo de extração de 30 min. Após o processo de extração, as amostras foram colocadas em estufa a 100°C por 1h, cortadas em pedaços pequenos e deixadas em dessecador até a realização do ensaio.

3.0 - RESULTADOS

3.1. Caracterização dos dielétricos sólidos

A Tabela 1 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 1. Valores de GP para os papéis novos.

Amostra	Grau de polimerização (GP)
Papel kraft termoestabilizado	1111
Papel kraft convencional	1157

3.2. Caracterização dos dielétricos líquidos

Na Tabela 2 estão contidos os resultados da caracterização do OMI e do OVI novos e os limites estabelecidos para o OMI.

Entre os resultados obtidos chama a atenção o elevado teor de água, fator de perdas dielétricas e viscosidade e a baixa rigidez dielétrica encontrados no OVI, sendo que o teor de água, fator de perdas e rigidez dielétrica são influenciados pela polaridade do óleo e alta afinidade pela água. A viscosidade significativamente mais elevada encontrada para o OVI, num caso real, afetaria a refrigeração do sistema por convecção, daí a necessidade de mudança no projeto do equipamento. 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 2. Caracterização físico-química das amostras de óleos novos.

Ensaio	Limites (OMI)	AV-60IN (OMI)	Cooper FR3 (OVI)
Índice de neutralização	Máx. 0,03 mg KOH/g óleo	0,01 mg KOH/g óleo	0,02 mg KOH/g óleo
Teor de água	Máx. 35 ppm	17 ppm	54 ppm
Densidade a 20°C	0,861-0,900 g.cm ⁻³	0,8894 g.cm ⁻³	0,9192 g.cm ⁻³
Perdas dielétricas a 100°C	Máx. 0,50 %	0,08 %	3,9 %
Rigidez dielétrica	Mín. 30 kV	57 kV	36 kV
Ponto de fulgor	Mín. 140°C	138°C	308°C
Ponto de combustão	-	-	342°C
Viscosidade a 40°C	Máx. 11,0 mm ² .s ⁻¹	10,31 mm ² .s ⁻¹	35,99 mm ² .s ⁻¹
Viscosidade a 100°C	Máx. 3,0 mm ² .s ⁻¹	-	8,57 mm ² .s ⁻¹
Ponto de fluidez	Máx. -39°C	-	-7°C
Tensão interfacial	Mín. 40 dina.cm ⁻¹	51,2 dina.cm ⁻¹	Não se aplica
Enxofre corrosivo	Não corrosivo	Não corrosivo	-
Carbono aromático	-	4 %	-
Carbono parafínico	-	48 %	-
Carbono naftênico	-	48 %	-

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. Assim, não é possível identificar, para óleos em uso, se a baixa tensão interfacial é devida a essa interação ou à presença de compostos ácidos formados durante a degradação do óleo.

3.3. Envelhecimento térmico acelerado

A diminuição da tensão interfacial, apresentada na Figura 1(a) para as amostras de OMI em estudo, indica a oxidação do óleo isolante e consequente formação de compostos polares, como álcoois, cetonas, aldeídos e ácidos. Esses produtos reagem com componentes do equipamento, principalmente o papel, diminuindo o tempo de vida do transformador. O comportamento dos sistemas PC-OMI e PT-OMI é bastante similar para ambas as temperaturas.

O ensaio de índice de neutralização quantifica os ácidos formados durante a degradação do óleo. Na Figura 1(b) se nota uma tendência de aumento da acidez do óleo apesar do espalhamento dos resultados. Este espalhamento pode ser justificado pela formação de borra, formação de ésteres (consumindo ácidos) e pela pouca afinidade dos ácidos pelo OMI, fatores que podem levar à precipitação e sendo assim, os ácidos totais formados podem não ser quantificados corretamente neste ensaio. Os ensaios de índice de neutralização para o OVI estão ainda sendo realizados.

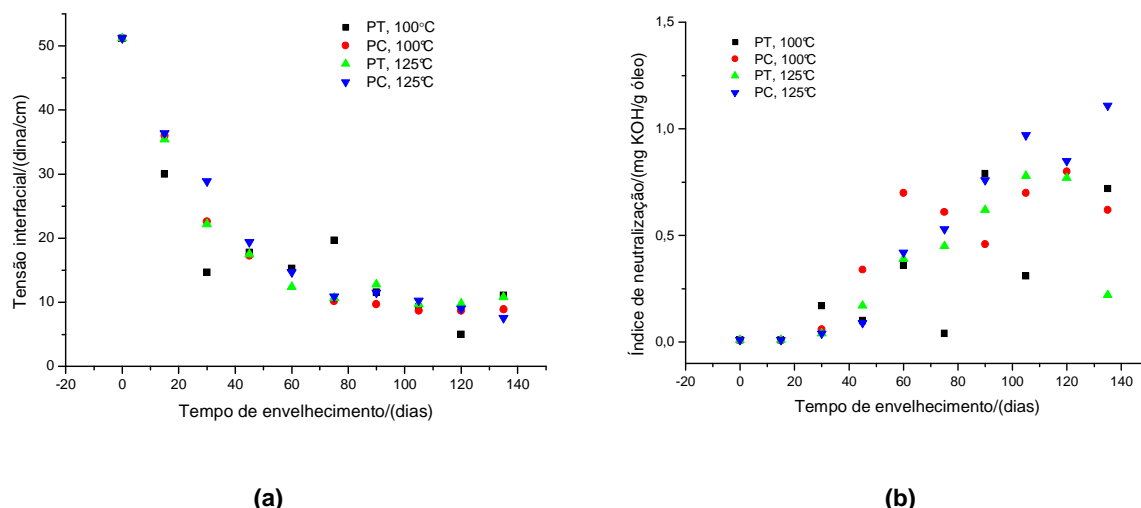


Figura 1. (a) Tensão interfacial e (b) índice de neutralização das amostras com OMI.

As perdas dielétricas são a medida da perda de energia na forma de calor por um líquido isolante quando este é submetido a um campo elétrico alternado [2]. De forma geral, as perdas dielétricas tendem a aumentar à medida que o óleo isolante degrada. Esse aumento pode ser visto nos gráficos da Figura 2, para OMI e OVI, respectivamente. Observa-se que, para os dois óleos, os resultados são semelhantes, mesmo as amostras de OVI tendo maior concentração de água. Como o ensaio de perdas dielétricas é realizado à temperatura de 90°C, próxima da temperatura de ebulição da água, acredita-se que a água livre presente no OVI poderia ser liberada para o meio na forma de vapor. Assim, os resultados não refletiriam a real concentração de água presente neste óleo.

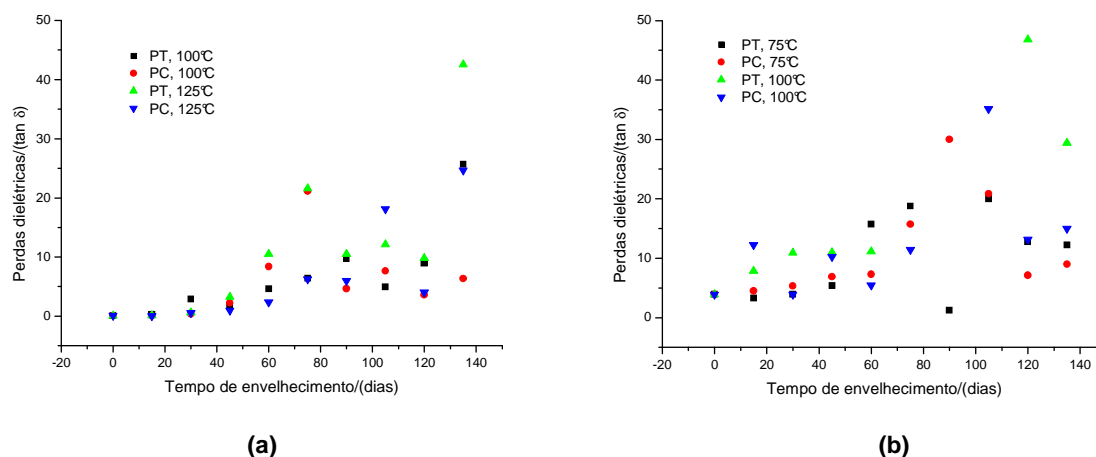


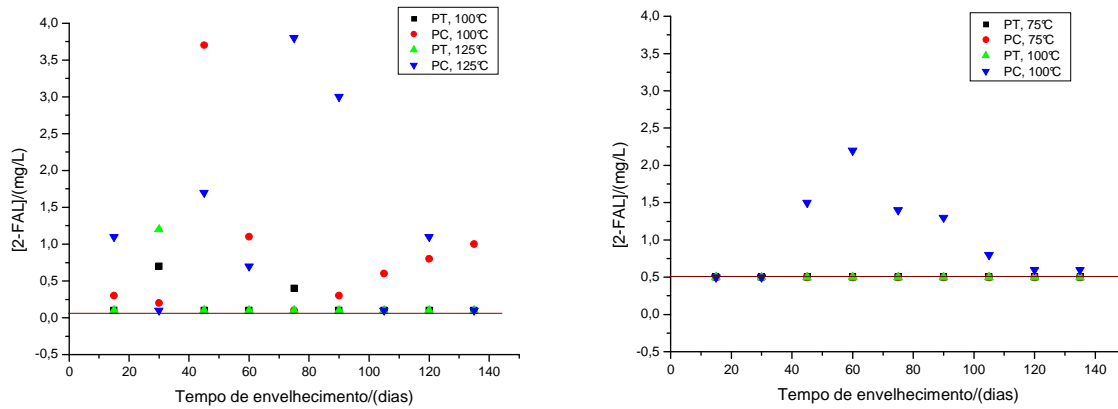
Figura 2. Perdas dielétricas para amostras de (a) OMI e (b) OVI.

Em relação aos compostos furânicos, especialmente o 2-FAL, esperava-se o aumento gradual de concentração à medida que as amostras fossem retiradas ao longo do tempo, mesmo não sendo analisada especificamente a mesma amostra e sim amostras semelhantes retiradas em tempos diferentes. A Figura 3 mostra os resultados de 2-FAL obtidos para amostras de OMI e OVI, respectivamente, sendo que a linha indica o limite de detecção para os dois tipos de óleo.

Para o OVI, apenas para amostras de PC a 100°C a concentração de 2-FAL ficou acima do limite de detecção a partir de 45 dias, entretanto esses valores diminuem ficando no limite a partir de 120 dias.

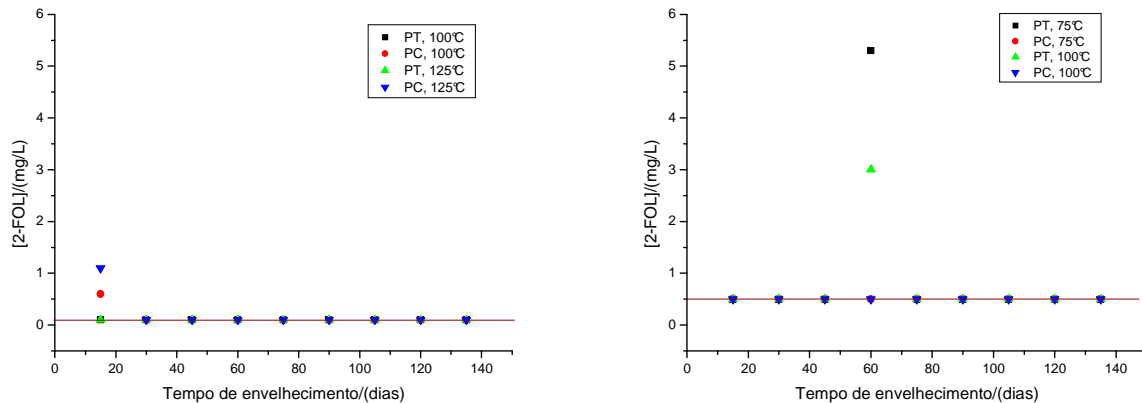
Para o OMI, não se observou a tendência de aumento e sim resultados que oscilam entre o limite de detecção e a região logo acima dele.

Possivelmente ocorreu a quebra da ligação glicosídica e abertura do anel da celulose em condições reacionais desfavoráveis à formação de compostos furânicos, seja por temperatura ou ausência da formação de compostos intermediários desta reação, ocasionando a diminuição significativa de GP, como pode ser visto na Figura 5 e discutido em seguida, sem o aumento da concentração de compostos furânicos no óleo isolante. A ausência de tendência de aumento de concentração de 2-FAL durante o envelhecimento indica que, nas condições aqui usadas, ele não pode ser considerado um marcador químico. A variação dos resultados sugere que o marcador 2-FAL deveria ser acompanhado para cada amostra ao longo do tempo.



(a) (b)
Figura 3. Concentração de 2-FAL nas amostras de (a) OMI e (b) OVI.

Para o 2-FOL houve detecção pontual em amostras de PC em OMI e PT em OVI em ambas as temperaturas, como mostrado na Figura 4. Para as demais amostras, a concentração de 2-FOL ficou abaixo do limite de detecção. O 2-FOL é um dos compostos intermediários da formação de 2-FAL, logo pode estar sendo consumido nesta reação. Para este caso em estudo o 2-FOL não se mostrou um marcador químico efetivo.



(a) (b)
Figura 4. Concentração de 2-FOL em amostras de (a) OMI e (b) OVI.

O ensaio de GP dos dielétricos sólidos observado na Figura 5 sugere a possível proteção dos papéis pelo OVI, pois, para amostras de PT-OVI houve menor diminuição do GP em comparação com as demais amostras indicando menor degradação deste sistema e, para as amostras de PC-OVI os resultados se mantiveram próximos dos obtidos para as amostras de PT-OMI. A proteção do papel por parte do OVI foi observada também por outros autores [30-31] e justificada pelo processo de transesterificação.

Sendo o PT termicamente mais estável, esperava-se que este papel apresentasse menor taxa de degradação que o PC, entretanto, os resultados obtidos para as amostras de PT-OMI e PC-OVI encontram-se numa mesma faixa de degradação podendo ser um indicativo de que a degradação do papel em OMI é mais acentuada que em OVI.

O monitoramento do GP foi utilizado também para definir o final do envelhecimento acelerado, tendo em vista que, com exceção do sistema PT-OVI, todos os demais apresentaram, em média, queda de 50% do GP na primeira retirada após 15 dias de envelhecimento com ligeira queda até os 135 dias, quando o GP desses papéis estava cerca de 65% abaixo do GP inicial. Como dito anteriormente, não foi possível correlacionar o ensaio de GP com a determinação de compostos furânicos neste estudo de envelhecimento acelerado.

O estudo em questão continua em andamento com a realização de novos testes para a comprovação dos resultados.

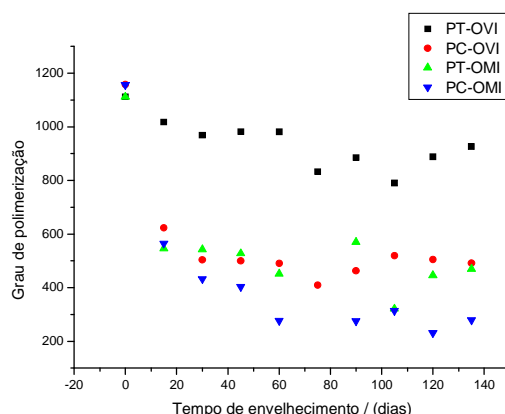


Figura 5. Grau de polimerização das amostras envelhecidas a 100°C.

4.0 - CONCLUSÕES

Os resultados de 2-FAL e 2-FOL para o período de envelhecimento acelerado avaliados indicaram que os compostos furânicos não se apresentaram como indicadores efetivos para as condições de teste impostas neste estudo. Novos estudos de envelhecimento acelerado em laboratório, com diferentes condições de teste, são necessários para corroborar tal afirmação.

A menor variação nos resultados de GP para amostras de PT-OVI em relação às demais e o fato de a degradação das amostras de PC-OVI se manter numa mesma faixa que para amostras de PT-OMI sugere que o OVI tem a capacidade de proteger o PC. Com exceção das amostras PT-OVI, houve queda significativa do valor de GP já para as primeiras retiradas, indicando acentuada degradação em pouco tempo de envelhecimento.

Não foi possível estabelecer uma correlação entre a formação de compostos furânicos e o ensaio de GP, indicando que a quebra das ligações glicosídicas e abertura de anel da celulose está ocorrendo em condições desfavoráveis à formação destes compostos, seja por temperatura ou ausência da formação de compostos intermediários desta reação.

5.0 - 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] Fofana, I., N'Cho, J. S., Olivares-Galvan, J. C., Escarela-Perez, R., Georgilakis, P. S. "Comparative Studies of the Stabilities to oxidation and Electrical Discharge between Ester Fluids and Transformer Oils". North American Power Symposium (NAPS), 2011.
- [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] MARTINS, M. A. G. "Vegetable Oils, an Alternative to Mineral Oil for Power Transformers – Experimental Study of Paper Aging in Vegetable Oil versus Mineral Oil". IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 26, No. 6, 2010.
- [7] Martins, M. A. G. "Será o Óleo Vegetal um Possível Substituto do Óleo Mineral para Transformador? Comparação da degradação Térmica do Sistema Óleo Vegetal/Papel Kraft com a do Óleo Mineral/Papel Kraft". Ciência & Tecnologia dos Materiais, Vol. 20, nº3/4, 2008.
- [8] ABNT NBR 15422:2006 "Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos".
- [9] CHEIM, L., PLATTS, D., PREVOST, T., XU, S. "Furan Analysis for Liquid Power Transformers", IEEE, pp. 8-21, 2012.

- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Gilbert, R., Jalbert, J., Duchesne, S., Tétreault, P., Morin, B., Denos, Y. "Kinetics of the production of chain-end groups and methanol from the depolymerization of cellulose during the ageing of paper/oil system. Part 2: Thermally-upgraded insulation papers" Cellulose, November, 2009.
- [14] Jalbert, J., Gilbert, R., Denos, Y., Gervais, P. "Methanol: a Novel Approach to Power Transformer Asset Management" IEEE Transactions on Power Delivery, 2012.
- [15] Jalbert, J., Gilbert, R., Tétreault, 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.
- [16] ABNT NBR 8148:1998 "Papéis e papelões celulósicos, Novos e envelhecidos, para fins elétricos - Medida do grau de polimerização viscosimétrico médio - Método de ensaio".
- [17] ABNT NBR 6869:1989 "Líquidos isolantes elétricos - Determinação da rigidez dielétrica (eletrodos de disco)".
- [18] ABNT NBR 10710:2006 "Líquido isolante elétrico - Determinação do teor de água".
- [19] ABNT NBR 7148:2001 "Petróleo e produtos de petróleo - Determinação da massa específica, densidade relativa e API - Método do densímetro".
- [20] ABNT NBR 6234:1963 "Método de ensaio para a determinação de tensão interfacial de óleo-água".
- [21] ABNT MB 101:1962 "Determinação do índice de neutralização de produtos de petróleo (por fenolftalina)".
- [22] ABNT NBR 12133:1991 "Líquidos isolantes elétricos - Determinação do fator de perdas dielétricas e da permissividade relativa (constante dielétrica) - Método de ensaio".
- [23] ABNT NBR 11341:2004 "Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland".
- [24] ABNT NBR 10441:2007 "Produtos de petróleo - Líquidos transparentes e opacos - Determinação da viscosidade cinemática e cálculo da viscosidade dinâmica".
- [25] ABNT NBR 11349:1990 "Produto de petróleo - Determinação do ponto de fluidez - Método de ensaio".
- [26] ABNT NBR 10505:2012 "Óleo mineral isolante — Determinação de enxofre corrosivo".
- [27] ASTM D-2140:2008 "Standard Practice for Calculating Carbon-Type Composition of Insulating Oils of Petroleum Origin".
- [28] ABNT NBR 15349:2006 " Óleo mineral isolante – Determinação de 2-furfural e seus derivados (método por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC))".
- [29] 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°3, pp 790-794, 2011.
- [30] Xiang, J., Li, J., Zhang, Z. "Influence of Water Content on the Aging Performance of Natural Ester-paper Insulation". International Conference on High Voltage Engineering and Application, Shanghai, China, September 17-20, 2012.
- [31] Liao, R., Liang, S., Yang, L., Hao, J., Li, J. "Comparison of Ageing Results for Transformer Oil-paper Insulation Subjected to Thermal Ageing in Mineral Oil and Ageing in Retardant Oil". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 19 (1). February, 2012.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Claudio Adriano Deger possui Graduação em Química Pela Universidade Federal do Paraná (2001) e Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia pelo PRODETEC (2010), atualmente trabalha como Pesquisador no LACTEC atuando nas áreas de Química Analítica, Química Ambiental e Novos Materiais.

Guilherme Barrachina Stocco possui Graduação em Engenharia Química pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (2002) e Mestrado na Área de Engenharia de Materiais pelo PIPE-UFPR (2009). Atualmente é Pesquisador do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento –LACTEC e Professor das Faculdades de Tecnologia Tupy - Sociesc.

Guilherme Cunha da Silva possui Graduação em Engenharia Industrial Elétrica pela FURB (1997), mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE - UFPR (2000), doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE - UFPR (2005) e especialização em Administração Estratégica e Gestão da Qualidade pelo IBPEX (2008). É pesquisador no Departamento de Tecnologia em Materiais do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento.

Heloisa Nunes da Motta é Engenheira Química com mestrado (2000) e doutorado (2005) em Engenharia e Ciências dos Materiais pela UFPR e especialização em Engenharia de Processamento de Petróleo pela UERJ (2008). Atualmente é pesquisadora do LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, na Divisão de Química do Departamento de Tecnologia de Materiais.

Joseane Valente Gulmine possui graduação em Química, Licenciatura e Bacharelado, pela UFPR (1996), mestrado (1999) e doutorado (2004) no PIPE-UFPR. Atualmente é pesquisadora do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC.

Juliano de Andrade possui graduação em Engenharia Química pela UFPR (2002), mestrado (2005) e doutorado (2010) em Engenharia de Materiais pela UFPR. Atualmente é Pesquisador no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC.



Larissa Mildemberger possui graduação em Química pela Universidade Federal do Paraná (2011). Atualmente é mestranda pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais (PIPE-UFPR), atuando na área de dielétricos e transformadores de potência no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC.

Marilda Munaro possui graduação em Química pela UFPR (1993), mestrado e doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais pelo PIPE-UFPR (2000, 2007). Atualmente é pesquisadora do Instituto de Tecnologia Para o Desenvolvimento.

Mario Carlos Andreoli é Engenheiro Químico pela Faculdade de Engenharia Industrial (1985). Funcionário da CTEEP há 26 anos atuando na área de tratamento anticorrosivo, certificação de ISO 9001 e óleo ascarel.

Rodrigo Soares Ferreira é Graduado em Química pela UFPR (2002). Possui mestrado em Química pela UFPR (2006). Professor do curso de Tecnologia em Polímeros da Universidade Tecnológica Tupy - Sociesc. Atua como gerente da divisão de química no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC.

Vitoldo Swinka Filho é Bacharel em Física pela UFPR (1992), Mestre em Física pela UFPR (1996) e Doutor em Engenharia e Ciência de Materiais pelo PIPE-UFPR (2000). Pesquisador do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC. Professor Adjunto do Departamento de Mecânica da UFPR.

Viviane Vicentim Calixto possui graduação em Química (Bacharelado e Licenciatura - UFPR 2005). Atualmente é técnica de laboratório na área de fluídos isolantes e lubrificantes utilizados em transformadores no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC. Tem experiência na área de águas e efluentes.