



XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2010 – 22 a 26 de novembro

São Paulo - SP - Brasil

Estudo Comparativo do Envelhecimento Químico Acelerado de Papel Kraft Termoestabilizado e Convencional

Mariana Gaivão Portella	Vitoldo Swinka Filho	Guilherme Cunha da Silva
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
mariana.portella@lactec.org.br	vitoldo@lactec.org.br	cunha@lactec.org.br
Douglas Antonio Batista	Cleberon Santos Ribeiro	Mário Carlos Andreoli
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
batista@lactec.org.br	cleberon.s@lactec.org.br	mandreoli@cteep.com.br

Palavras-chave

Compostos Furânicos
Degradabilidade Química
Grau de Polimerização
Papel Kraft
Transformador

RESUMO

O sistema de isolamento compõe a parte mais importante do transformador elétrico. Uma vez que a tecnologia desenvolvida até o presente momento não permite a regeneração do papel kraft durante a operação do equipamento, a qualidade deste material é o elemento chave da predição da vida útil deste, por meio da análise do 2-FAL dissolvido em óleo mineral. Os estudos de envelhecimento térmico desenvolvidos objetivaram a comparação da formação de compostos furânicos, obtidos através da técnica de HPLC com detecção UV, e o decaimento do DP viscosimétrico, tanto para isolamento sólido convencional como termoestabilizado. Para o papel termoestabilizado, o composto 2-FOL foi verificado como um parâmetro complementar na previsão do estado do papel isolante nos estágios mais incipientes da degradação química.

1. INTRODUÇÃO

Do início do século XX para os dias de hoje, a eletricidade tornou-se uma das formas de energia mais utilizadas pela humanidade, possuindo o Brasil em 2007 uma capacidade instalada de 100,3 mil MW¹. Paralelo ao largo uso da tecnologia, surgiu a dependência da sociedade moderna ao conforto, à comodidade e à praticidade disponibilizados, bem como a susceptibilidade da mesma às falhas do sistema elétrico, obrigando o avanço das pesquisas no sentido de melhorar a qualidade do serviço prestado².

Um equipamento de fundamental importância tanto na geração quanto na distribuição de eletricidade, o transformador de potência é uma máquina estática que permite a transferência de energia de um circuito para o outro, mantendo a frequência de transmissão e podendo variar os valores de corrente e tensão^{3,4}. A principal parte deste tipo de equipamento é o seu sistema de isolamento constituído, basicamente, por um líquido isolante (comumente a base de óleo mineral) e uma isolação sólida, frequentemente o papel Kraft. Não passível de regeneração o papel é, praticamente, o elemento responsável pela definição da vida útil do transformador, diferente do óleo que pode ser tratado ou regenerado até o ponto de poder ser novamente utilizado². Assim, há constantes preocupações no desenvolvimento de diferentes técnicas de sua análise e de sua fabricação, como os papéis termoestabilizados, para obtê-los com maior qualidade para suportar o multiestressamento a que estão sujeitos no interior do equipamento elétrico. Estes tipos de papéis possuem parte de sua estrutura modificada, de modo a aumentar a resistência à degradação térmica e oxidativa, aumentando, consequentemente, o tempo de utilização do transformador. Do mesmo modo, houve o aumento no interesse sobre os estudos que visassem à manutenção preditiva e preventiva dos equipamentos elétricos. Como exemplo, pode-se citar a investigação das características químicas do óleo mineral de forma a evidenciar o estado de degradação do papel isolante em seu “bulk”. Tal diagnóstico pode vir a permitir a aproximação da necessidade de substituição do equipamento, evitando as quedas de energia por sua falha².

Durante a vida útil de transformadores de potência, o sistema de isolamento fica sujeito a uma série de processos de desgaste e envelhecimento, devido a ocorrências de operação normal do equipamento. Efeitos de fadiga térmica, química, elétrica e mecânica, tais como pontos quentes, sobre aquecimentos, sobre tensões e vibrações acabam resultando no aparecimento de significativas alterações tanto no papel isolante, como no óleo mineral. A fim de garantir a eficiência da máquina elétrica, evitando paradas repentinas, devem ser desenvolvidos estudos e programas que visem o monitoramento das características do sistema, permitindo assim a implantação de programas de manutenção preventiva e preditiva⁴.

Neste sentido, o presente trabalho visou a caracterização e o estudo comparativo de dois diferentes tipos de isolamento sólido (Papel Kraft Convencional e Termoestabilizado), através do envelhecimento acelerado de ambos em sistemas papel/ óleo mineral, submetidos às temperaturas de 100 e 125°C. Sob as amostras envelhecidas, foram realizados uma série de ensaios, entre os quais a análise da formação de compostos furânicos em óleo e a diminuição do grau de polimerização (DP) do papel isolante. Como resultado principal, destaca-se a utilização do álcool furfurílico (2-FOL) como parâmetro complementar na manutenção preventiva e preditiva de máquinas elétricas, uma vez que o composto apresentou variação de sua concentração para os estágios mais incipientes de degradação do isolamento sólido.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 ISOLAMENTO LÍQUIDO – OMI

Para o desenvolvimento da etapa experimental do trabalho, foi utilizado óleo mineral isolante (OMI), tipo A (de base naftênica predominante), por ser um material largamente utilizado em equipamentos de transmissão e geração de energia.

De modo a verificar as características do líquido isolante sob estudo, antes do início das atividades experimentais, foram realizados os ensaios de caracterização do material, conforme previsto em norma⁵.

2.2 ISOLAMENTO CELULÓSICO SÓLIDO

Como matérias primas foram utilizadas amostras de papéis Kraft isolante, com as seguintes características técnicas:

- papel Kraft termoestabilizado de espessura 0,075 mm;
- papel Kraft convencional de espessura 0,1 mm.

A caracterização destes materiais foi realizada por meio de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)⁶.

2.3 ENVELHECIMENTO DO SISTEMA ÓLEO/ PAPEL

Seguindo algumas linhas de pesquisa estudadas em trabalhos semelhantes, optou-se por desenvolver um envelhecimento acelerado do sistema óleo/ papel de modo a estudar as características de cada uma das matérias primas sujeitas à degradação. Para isto, foram preparadas dentro de frascos de vidro de 250 mL, 67 amostras, submetidas a duas diferentes temperaturas (100 °C e 125 °C), durante um intervalo de tempo de até 63 dias.

De modo a aproximar ainda mais os sistemas a um transformador de potência, optou-se por utilizar placas de cobre junto do sistema papel/óleo, o qual atuou como um catalisador no processo de envelhecimento acelerado.

2.3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras do sistema foram acondicionadas dentro de frascos de vidro de 250 mL, com a utilização dos seguintes materiais em suas devidas quantidades e preparação: i) como recipiente das amostras foram utilizados frascos de vidro de 250 mL, do tipo frasco para DBO (com tampa de vidro esmerilhada), da marca comercial Corning. Os frascos e tampas foram identificados e secos em estufa, a 100 °C/1 h, antes da preparação das amostras; ii) para o OMI foi utilizado um volume de 210 mL de óleo novo em cada uma das 67 amostras sob estudo. De modo a remover o oxigênio presente na matéria prima, depois de acondicionado nos devidos frascos, o óleo passou por um sistema de borbulhamento com N₂ durante o período de 10 minutos. Após o borbulhamento, os frascos foram fechados com as tampas esmerilhadas e as amostras armazenadas sob abrigo da luz natural; iii) foram preparadas 31 amostras com papel Kraft termoestabilizado. Sendo o papel disponibilizado em tiras de 2 cm de largura. Para cada uma das amostras foram utilizadas tiras de 4 m de comprimento, previamente enroladas para a sua inserção no interior do frasco. Antes da preparação das amostras, o papel foi seco em estufa sob vácuo a 100 °C/ 2 h, sendo realizado ensaio de DP antes e depois da secagem; iv) 36 amostras de papel Kraft convencional foram preparadas após previamente secas em estufa sob vácuo a 100 °C/ 2 h, sendo realizado ensaio de DP antes e depois da secagem. Os papéis convencional e termoestabilizado foram adquiridos no mercado, porém, não foi possível obtê-los de mesma espessura devido a diferenças de fabricação do material. Como o mecanismo de degradação do papel se dá de forma mais superficial do que volumétrica, foi optado preparar 31 amostras utilizando tiras de 2 cm de largura e 4 m de comprimento, previamente enroladas. Como padrão de referência foram preparadas 5 amostras contendo massa de papel convencional semelhante à utilizada no papel termoestabilizado; e, v) foram preparadas 67 placas de cobre de 1 cm de largura e 2 cm de comprimento, como catalisador do envelhecimento térmico. Estas foram previamente lixadas com lixa grossa (150) e lixa fina (400), e limpas com carbureto de silício e acetona, de modo a remover a fuligem.

Após a preparação das amostras, estas foram divididas em 4 grupos, conforme:

- três amostras de branco, sujeitas a um envelhecimento na temperatura ambiente e abrigadas da luz durante 63 dias. Tratou-se de amostras de papel termoestabilizado, papel convencional e, também, de papel convencional como equivalente de massa do papel termoestabilizado.

- 64 amostras, sujeitas ao envelhecimento em estufa a 100 °C e 125 °C, respectivamente, durante até 63 dias. Trataram-se de 30 amostras de papel termoestabilizado, 30 de papel convencional e 4 de papel convencional como equivalente de massa do papel termoestabilizado.

Todo este processo de envelhecimento foi baseado na literatura pesquisada³ e teve como objetivo básico simular algumas das condições encontradas no transformador e acelerar o mecanismo de degradação do papel para ser diagnosticado pelas técnicas de análise propostas.

2.3.2 PROGRAMAÇÃO DO ENVELHECIMENTO ACELERADO

O envelhecimento acelerado dos sistemas óleo/papel foi preparado para ser desenvolvido ao longo de 63 dias ou 9 semanas, conforme o seguinte cronograma:

- semana 1: retirada de 2 amostras de cada estufa (uma amostra de papel termoestabilizado e outra amostra de papel convencional, para cada temperatura).
- semana 2: retirada de 2 amostras de cada estufa (uma amostra de papel termoestabilizado e outra amostra de papel convencional, para cada temperatura).
- semana 3: retirada de 4 amostras de cada estufa (duas amostras de papel termoestabilizado e duas amostras de papel convencional, para cada temperatura).
- semana 4: retirada de 5 amostras de cada estufa (duas amostras de papel termoestabilizado, duas amostras de papel convencional e uma amostra de papel convencional, como equivalente de massa do papel termoestabilizado, para cada temperatura).
- semana 5: retirada de 6 amostras de cada estufa (três amostras de papel termoestabilizado e três amostras de papel convencional, para cada temperatura).
- semana 6: retirada de 4 amostras de cada estufa (duas amostras de papel termoestabilizado e duas amostras de papel convencional, para cada temperatura).
- semana 7: retirada de 4 amostras de cada estufa (duas amostras de papel termoestabilizado, duas amostras de papel convencional e uma amostra de papel convencional, como equivalente de massa do papel termoestabilizado, para cada temperatura).
- semana 8: retirada de 2 amostras de cada estufa (uma amostra de papel termoestabilizado e outra amostra de papel convencional, para cada temperatura).
- semana 9: retirada de 2 amostras de cada estufa (uma amostra de papel termoestabilizado e outra amostra de papel convencional, para cada temperatura).

2.3.3 ANÁLISE DO ENVELHECIMENTO DO ÓLEO/ PAPEL

Após o envelhecimento acelerado, as amostras foram devidamente armazenadas em frascos fechados de vidro âmbar de 250 mL, previamente identificados com o tipo de papel utilizado (termoestabilizado ou convencional), temperatura da estufa e tempo de envelhecimento. Estas amostras foram analisadas quanto à presença de compostos furânicos dissolvidos, formados em função da degradação do isolamento sólido.

A concentração dos compostos furânicos dissolvidos foi determinada por Cromatografia Líquida de Alta Pressão e Alta Resolução (HPLC), de acordo com a norma ABNT NBR 15349/2006⁷. As amostras foram preparadas pelo método de extração líquido/ líquido, sob condições controladas de temperatura e umidade do ar (20 °C e 8%, respectivamente). A coluna utilizada para análise foi a “UV Carbamate Analysis”, C18, 4,6 x 250 mm, 5 µm.

Assim como as amostras de óleo, as amostras de papel foram isoladas do sistema em sacos plásticos pequenos, devidamente identificados. Para cada uma das amostras foi realizado o ensaio de DP, de acordo com a ABNT NBR IEC 60450:2009⁸. Os ensaios realizados foram verificados quanto ao decaimento do DP para cada uma das temperaturas e comparativamente para os diferentes tipos de papel, frente à formação de compostos furânicos em óleo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA MATERIA PRIMA

3.1.1 OMI

Os resultados obtidos para o OMI revelaram um material de boa qualidade e de acordo com o padrão para óleo novo estabelecido pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis⁵.

3.1.2 ISOLAMENTO CELULÓSICO SÓLIDO

Para a amostra de papel Kraft termoestabilizado, foi possível caracterizar as bandas de celulose presentes, via FTIR. Porém, uma vez que a técnica não é a ideal para a investigação de compostos em concentrações muito baixas, não foi possível notar quaisquer modificações químicas realizadas no processo de tratamento térmico do material.

De forma semelhante, foi realizada a caracterização do papel Kraft convencional, observando, também, apenas as bandas de celulose. Na Figura 1 está apresentado o espectro de infravermelho para ambas as amostras de papel Kraft, de forma comparativa.

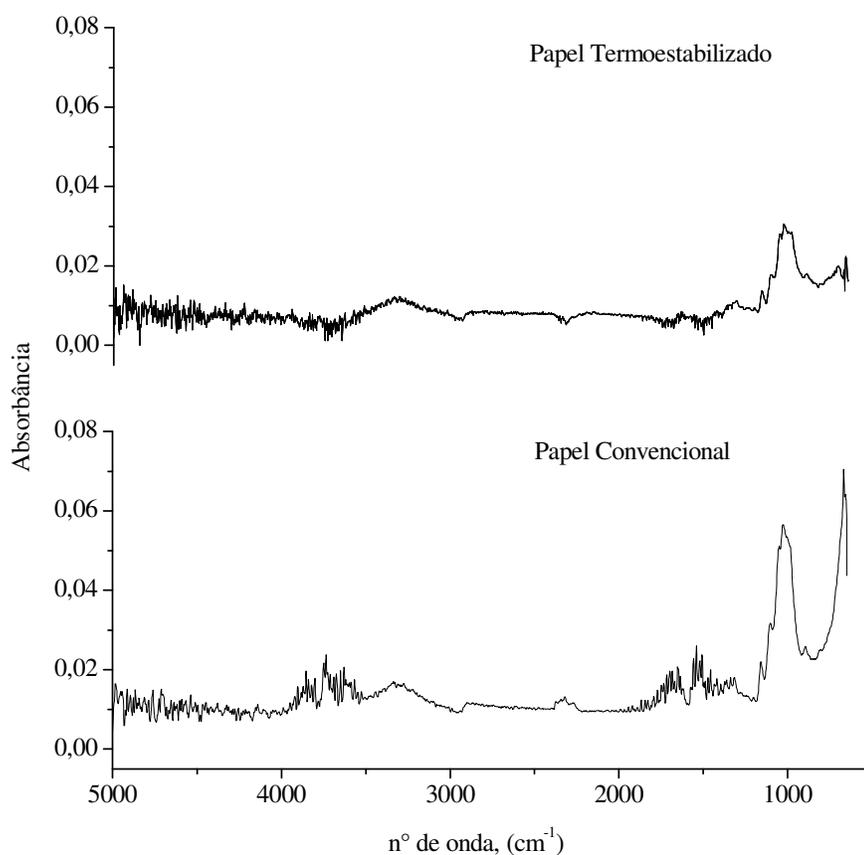


Figura 1

Caracterização das amostras de papel termoestabilizado e convencional pela análise FTIR.

Observando ambos os espectros pode ser verificada a semelhança entre as respectivas curvas, corroborando com a afirmação de que não foi possível identificar pela técnica as modificações ou compostos presentes no tratamento termoestabilizado do papel. As pequenas diferenças verificadas são decorrentes das condições locais de análise (presença de ruídos, dióxido de carbono, umidade do ar) e são insignificantes para a resolução do equipamento.

3.2 ENVELHECIMENTO DO SISTEMA ÓLEO/ PAPEL

Os resultados obtidos propiciaram o desenvolvimento de um estudo comparativo da formação dos compostos furânicos em óleo, frente à diminuição do DP do papel isolante, com a influência de diferentes tempos de envelhecimento e sob diferentes condições de temperatura. Também, foi possível realizar uma avaliação comparativa dos dois tipos de isolamento sólido, verificando a resposta de cada um destes às condições impostas. Nas Figuras 2 e 3, está apresentado o decaimento do DP ao longo do tempo, comparativamente às curvas cumulativas de envelhecimento, para cada uma das temperaturas de estudo.

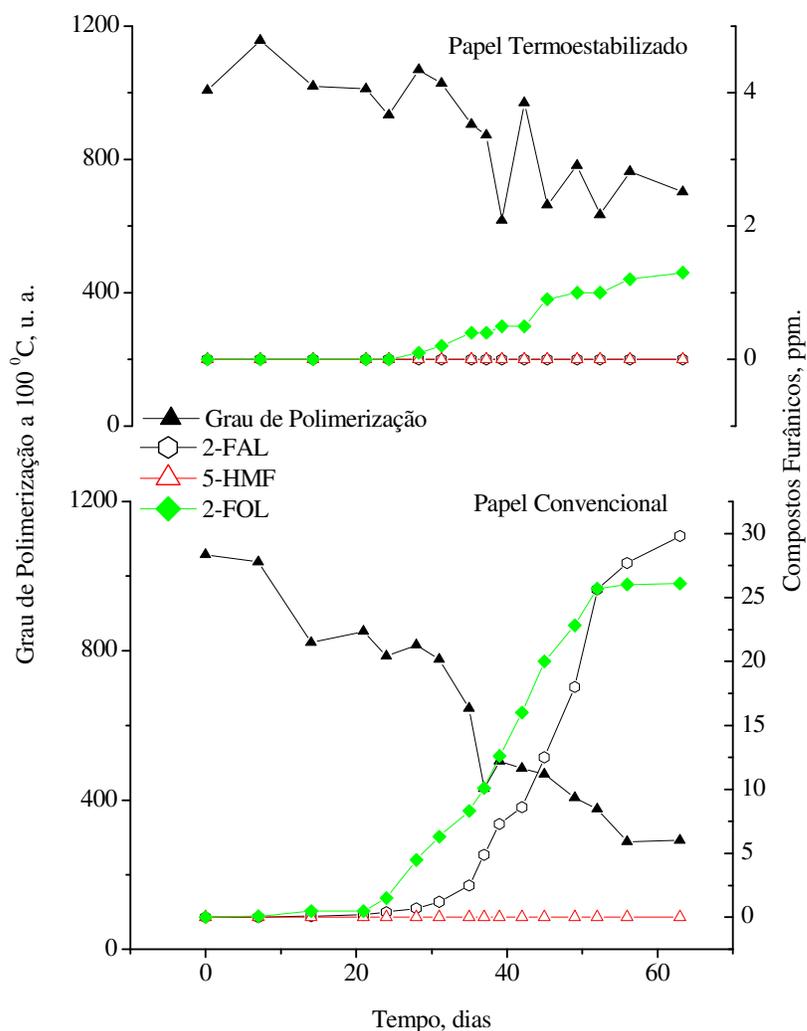


Figura 2
Curva de envelhecimento do sistema óleo/papel a 100 °C.

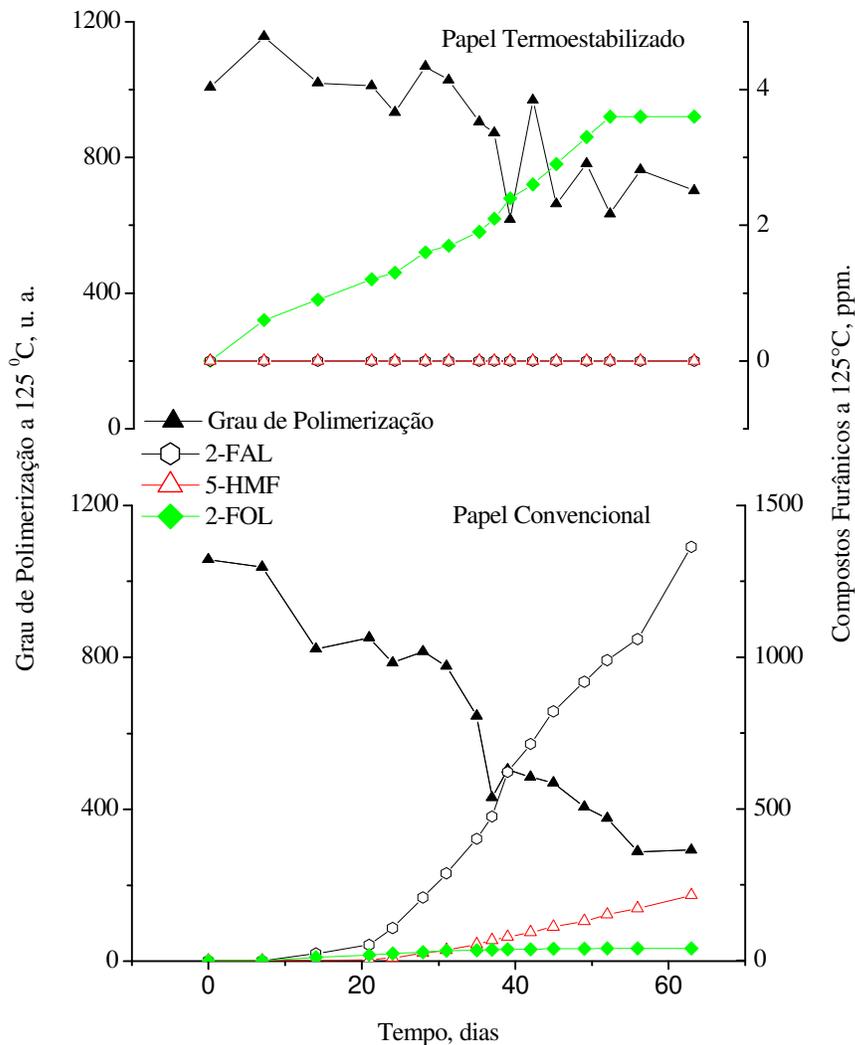


Figura 3

Curva de envelhecimento do sistema óleo/papel a 125 °C.

A análise dos resultados, de uma maneira geral, comprovou a maior resistência do papel termoestabilizado em relação ao convencional. Para o envelhecimento em ambas as temperaturas foi possível notar a maior resistência à degradação do material estabilizado termicamente, o que resultou no dobro do valor do DP para o mesmo tempo e temperatura de envelhecimento. Para as diferentes temperaturas, também foi possível verificar que a degradação do papel se deu de forma bastante lenta e gradual, apesar do aparecimento de alguns picos pouco relevantes nas curvas resultantes.

Quanto ao aparecimento de compostos furânicos, de forma bastante semelhante aos ensaios de DP, a resposta das amostras preparadas com o papel convencional se apresentaram de forma mais rápida. Para os compostos 2-furfuraldeído (2-FAL) e 5-hidroxi metilfurano (5-HMF), não houve formação em nenhuma das amostras de papel termoestabilizado, sendo necessário um estudo mais prolongado para que seja retratada a vida útil de um transformador de potência. Em contrapartida, para o isolamento sólido convencional, uma vez que este foi mais susceptível ao envelhecimento, já foi possível notar a variação na sua concentração logo no início do envelhecimento, para ambas as temperaturas. Além disso, os resultados obtidos apresentaram valores de 2-FAL elevados, semelhantes ou superiores aos históricos apresentados pelas concessionárias de energia do país, que costumam considerar altos os valores em torno de 10 mg/kg para equipamentos em operação a mais de 20 anos.

Analisando ainda, a Figura 3, foi possível notar que a evolução da curva de concentração do composto 5-HMF apresentou um comportamento oscilatório. Este padrão foi consequente das reações em cadeia que culminam com a formação do 2-FAL, apresentadas por MARTINS (2007)⁹.

Outro padrão detectado foi o revelado no estudo da formação do 2-FOL em óleo. De acordo com as Figuras 2 e 3, a evolução do composto ao longo do envelhecimento pode ser notada logo para as primeiras amostras retiradas da estufa, confirmando o estudo de MARTINS, 2007¹⁰. Diferente do revelado para os demais, neste caso, o papel termoestabilizado apresentou resposta à degradação inclusive para o estudo sob 100 °C.

Quanto ao papel convencional, para o envelhecimento a 100 °C e 125 °C houve a formação do composto, porém as curvas apresentaram comportamento decrescente. As concentrações analisadas foram baixas em relação aos resultados obtidos para os dois principais compostos, 2-FAL e 5-HMF. Este comportamento revelou a estabilidade química de ambos em relação ao 2-FOL.

3. CONCLUSÕES

O 2-FAL apresentou um comportamento padrão, com o aumento de sua concentração com o tempo de envelhecimento. Para o papel convencional, foram obtidos resultados semelhantes ao constatado pelas frequentes análises realizadas pelas concessionárias de energia, especialmente para as amostras submetidas a 100 °C.

Para o estudo conduzido a 125 °C, a concentração encontrada para o produto ultrapassou o histórico dos equipamentos em cerca de 96%, revelando a significativa degradação do papel convencional sujeito a estas condições. O isolamento sólido termoestabilizado, ao contrário, não apresentou a formação do composto 2-FAL para nenhuma das temperaturas de estudo. Neste caso, a degradação do papel aconteceu de forma mais lenta e gradual, apesar do aparecimento de alguns picos pouco relevantes nas curvas resultantes das análises de DP.

O segundo composto em importância, o 5-HMF, também foi cuidadosamente analisado ao longo do estudo de envelhecimento desenvolvido. Uma vez que o produto se forma durante a reação em cadeia de formação do 2-FAL, as curvas de sua evolução revelaram um comportamento confirmatório deste mecanismo. De acordo com os testes, a sua formação ao longo do tempo apresentou um padrão ondulatório, certificando a sua dissolução no óleo, seguindo-se pela sua dimerização em 2-FAL. A análise deste comportamento confirmou a hipótese de que os sistemas estavam sendo degradados por via hidrolítica. Quanto à degradação dos sistemas em si, de forma bastante semelhante ao 2-FAL, o 5-HMF apresentou valores acentuados para o envelhecimento do papel convencional, não sendo alterado, em nenhuma das temperaturas de estudo, para o isolamento termoestabilizado.

Dentre os parâmetros analisados, o composto que obteve resposta mais rápida e inovadora ao estudo desenvolvido foi o 2-FOL. O envelhecimento do papel termoestabilizado levou à sua dissolução logo nas primeiras horas, mesmo para a menor temperatura em desenvolvimento. As curvas de evolução do 2-FOL, na metodologia adotada, aumentaram gradativamente, enquanto que a concentração dos demais compostos analisados (2-FAL e 5-HMF) permaneceu nula e inalterada para grande parte do estudo, paralelamente à degradação dos materiais envolvidos.

Uma vez que já foi verificada a dissolução de 2-FOL em OMI para DP a partir de 900, a investigação do estado do papel pode ser acompanhada a partir deste parâmetro, logo no início da vida útil do transformador, permitindo o desenvolvimento de um diagnóstico mais completo, diminuindo significativamente a ocorrência de falhas e as interrupções no fornecimento de energia.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CTEEP, FINEP, CNPq, LACTEC e à ANEEL, pela confiança, infraestrutura e apoio financeiro para a execução deste projeto de pesquisa.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E/OU BIBLIOGRAFIA

- 1 ANEEL. Relatório da Agência Nacional de Energia Elétrica - 10 anos, 2008, Brasília, Brasil.
 - 2 Tulio, L. (2008). Dissertação de Mestrado. Instituto de Engenharia do Paraná, Brasil, 2008.
 - 3 Batista, D. A. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Brasil, 2005.
 - 4 FERNANDES, P. O; Apostila de Manutenção de Transformadores através do Controle do Óleo Isolante Mineral. Westinghouse do Brasil, Divisão de Serviços Industriais, 1988.
 - 5 ANP N° 36/2008. Resolução da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis n° 36 de 2008. Brasil.
 - 6 Samistraro, G.; Muniz, G. I. B.; de Peralta-Zamora, P.; Cordeiro, G. Quím. Nova, 2009, 32, 6.
 - 7 ABNT NBR 15349. Óleo Mineral Isolante - Determinação de 2-furfural e seus derivados, 2006, Rio de Janeiro, RJ.
 - 8 ABNT NBR IEC 60450. Medição do Grau de Polimerização Viscosimétrico Médio de Materiais Celulósicos Novos e Envelhecidos para Isolação Elétrica, 2009, Rio de Janeiro, RJ.
 - 9 Martins, M. A. (2007). Furfuraldeído - Um Indicador Prático da Degradação Térmica do Papel
 - 10 Kraft de Transformadores. Ciência e Tecnologia de Materiais , 19, 25-33.
- Martins, M. A. (2007). Monitorização da degradação térmica do papel isolante usado em transformadores: Papel "Thermally Upgraded" Versus Papel Kraft. Ciência e Tecnologia dos Materiais , 19, 14-18.