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

Mariana G. Portella, Vitoldo S. Filho, Guilherme. C. da Silva, Douglas A. Batista, Cleberson S. Ribeiro, Daiane C. Sabec, Guilherme B. Stocco, Mario C. Andreoli e Érick A. Campos

***Resumo* – O sistema de isolamento constitui uma das partes mais importantes 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 do transformador, por meio da análise do 2-FAL dissolvido em óleo mineral. Foram desenvolvidos estudos de envelhecimento térmico com o objetivo de comparar a 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 deste material.**

***Palavras-chave* – Compostos Furânicos, Degradação Química, Grau de Polimerização, Papel Kraft Isolante, Transformador.**

I. 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 MW [1]. Paralelo ao largo uso da eletricidade, surge 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 prestado [2].

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 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 utilizado [2]. Assim, há constante preocupação no desenvolvimento de diferentes técnicas de sua análise e de sua fabricação, como os papéis termoestabilizados, para obtê-los com maior qualidade para suportar os múltiplos estresses 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 volumétrica do papel isolante. Tal diagnóstico pode vir a permitir a aproximação da necessidade de substituição do equipamento, evitando as quedas de energia por sua falha [2].

Durante a vida útil de transformadores de potência, o sistema de isolamento fica sujeito a uma série de processos de desgaste e envelhecimento. Efeitos de fadiga térmica, química, elétrica e mecânica, tais como pontos quentes, sobreaquecimento, sobretensões 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 preditiva [4].

Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo 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°C e 125°C. Nas 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.

Constituinte principal do papel isolante, a celulose é um polímero formado por longas cadeias de anéis de glucose,

Os autores agradecem às Instituições CTEEP e ANEEL pelo apoio financeiro, de infraestrutura e de fomento para a realização deste trabalho de pesquisa.
G. C. Silva trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC (e-mail: gcsilva@lactec.org.br);
M. C. Andreoli trabalha na CTEEP (e-mail: mandreoli@cteep.com.br).

conectadas umas às outras por ligações glicosídicas. A presença de oxigênio e umidade, além da operação sob condições de altas temperaturas promove a degradação deste material, com a quebra das ligações glicosídicas, abertura dos anéis e conseqüente diminuição do grau de polimerização. Essa degradação química (pirolítica, hidrolítica ou oxidativa) produz, entre outras substâncias, compostos furânicos, em especial o furfuraldeído (2-FAL), produto mais estável e solúvel no óleo [5].

A degradação da glucose por pirólise, de maneira geral, requer a perda de três moléculas de água e uma de formaldeído (ou, como alternativa a esta, uma molécula de monóxido de carbono e outra de hidrogênio). É bastante influenciada por fatores físicos, como temperatura, atmosfera local, cristalinidade da celulose e presença de metais ou outras impurezas [5].

Outros quatro compostos furânicos - 5-metil-2-furfuraldeído (5-MF), 2-acetilfurano (2-ACF), 5-hidroximetilfurfuraldeído (5-HMF) e álcool furfurílico (2-FOL) - podem ser formados, principalmente, pela degradação oxidativa do papel. Esta oxidação é catalisada por radicais, tipo hidroxila, que são produzidos devido à decomposição do peróxido de hidrogênio, o qual é formado pela reação com o oxigênio dissolvido em água, que entra no equipamento a partir de falhas de vedação dos elastômeros que unem as diferentes partes do transformador. Esta reação é catalisada pela presença de cátions metálicos, como Cu^{+} e Cu^{2+} ou Fe^{2+} ou Fe^{3+}, constantes no enrolamento do transformador [5].

A presença de umidade no interior de um equipamento também promove a degradação do isolamento sólido, uma vez que aumenta a concentração de prótons H^{+}. Tal reação promove a dissociação de ácidos carboxílicos e a conseqüente hidrólise ácida de ligações internas da molécula polimérica. Esta hidrólise é seguida de uma série de outras reações de desidratação catalisadas pela presença de ácido, sendo liberadas cerca de três moléculas de água, para cada unidade de glucose rompida [5].

Em campo, de acordo com o estudo realizado por Diogo [6], algumas constatações interessantes puderam ser obtidas pela simples análise estatística dos dados de compostos furânicos para os transformadores de uma determinada concessionária de energia elétrica. Foi verificada uma tendência de envelhecimento mais acentuado para os transformadores com ciclo de carregamento alto (elevadores), em relação aos interligadores/abaixadores e os reatores de derivação. Além disso, verificou-se também uma variação na concentração de compostos furânicos em óleo, da ordem de 90% (aproximadamente), para equipamentos devidamente selados.

Segundo o mesmo estudo [6], a formação de compostos furânicos no óleo pode ser analisada sob dois tipos de envelhecimento distintos, os quais:

- Envelhecimento prematuro. Para os equipamentos que possuem idade cronológica até 20% superior àquela esperada pela análise da concentração de furanos em óleo;
- Final de vida. Quando tais equipamentos já se encontram sob operação a mais de 20 anos e cuja concentração de compostos furânicos vem sendo monitorada com periodicidade anual ou semestral. Nestes casos, a isolação sólida já está, comumente, comprometida e o perfil do teor de furanos apresenta crescimentos desproporcionais, com elevações abruptas da concentração.

Identificado o estado de envelhecimento do equipamento por meio da análise de compostos furânicos, muitas vezes torna-se necessário uma intervenção de modo a coletar amostras de papel isolante para verificação de seu grau de polimerização. Deve-se, ainda, estudar os motivos possíveis que o levaram a esta situação, com a avaliação criteriosa do carregamento histórico, máximas temperaturas, tratamentos e reparos anteriores, características do óleo, entre outros. Neste sentido, o diagnóstico completo tem caráter confirmatório em relação ao estudo da concentração de furanos em óleo na averiguação da vida útil remanescente do transformador [6].

De forma geral, tem-se, portanto, que a concentração de compostos furânicos no óleo mineral é dependente de uma série de fatores, tais como a temperatura de operação do equipamento, o tipo de papel empregado no isolamento sólido (Kraft, Nomex, termoestabilizados), o tipo de óleo mineral (inibido ou não inibido), o grau de envelhecimento do óleo, verificado, principalmente, pelo índice de acidez, a razão entre os volumes de isolamento sólido/líquido, que é dependente do tipo de transformador sob estudo, o teor de umidade no óleo e no papel e o teor de oxigênio dentro do equipamento [5]. Com base nestas informações, ao longo dos últimos anos, uma série de pesquisadores tem buscado o estabelecimento de uma relação matemática absoluta que seja capaz de relacionar o aparecimento de 2-FAL no isolamento líquido e o grau de polimerização do isolamento sólido, de modo a prever o tempo de vida de determinado equipamento sem que seja necessária a remoção deste de sua operação.

A partir da década de 80, diversos estudos objetivaram uma comparação entre o valor do DP do isolamento sólido e os resultados das análises de compostos furânicos em óleo, de modo a estabelecer um coeficiente de correlação entre ambos. Dentre os trabalhos mais importantes estão os desenvolvidos pelos pesquisadores DePablo, Burton, Vuarchex e Chendong. Nas Equações (1) a (4) são apresentadas as relações matemáticas desenvolvidas pelos pesquisadores e na Figura 1 são apresentadas as curvas logarítmicas de correlação para cada um dos estudos [7].

DePablo

$$DP.([2\text{-}FAL] + 2{,}3) = 1850 \quad (1)$$

Burton

$$\text{Log}\,[2\text{-}FAL] = 2{,}5 - 0{,}005.DP \quad (2)$$

Vuarchex

$$\text{Log}\,[2\text{-}FAL] = 2{,}5 - 0{,}0049.DP \quad (3)$$

Chendong

$$\text{Log}\,[2\text{-}FAL] = 1{,}5 - 0{,}0035.DP \quad (4)$$

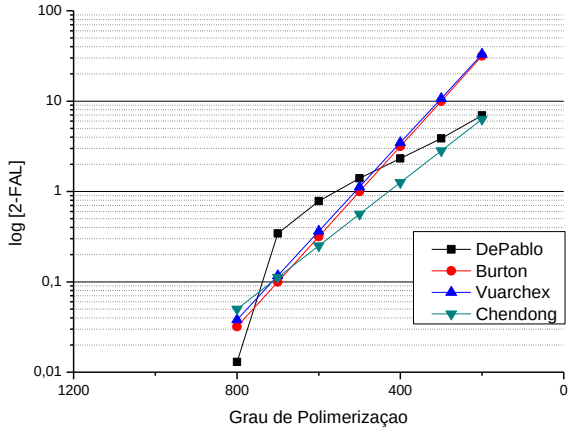

Figura 1. Curvas logarítmicas da correlação entre DP e concentração de 2-FAL.

Estudos subseqüentes, porém, comprovaram que a complexidade do sistema impede o estabelecimento de uma relação global entre ambos os parâmetros, uma vez que a concentração do 2-FAL, efetivamente presente no óleo para cada estado de envelhecimento do isolamento sólido, é dependente de uma série de parâmetros, os quais [5]:

- A velocidade de formação de 2-FAL. Este parâmetro é dependente de fatores como o projeto do transformador; materiais utilizados em sua construção (tipo de papel e de óleo mineral); históricos do equipamento (possível recuperação ou troca do isolamento líquido ou limpeza interna); e das condições de operação do mesmo;
- A velocidade de degradação do 2-FAL no óleo mineral. Este parâmetro é fortemente dependente da temperatura de operação do equipamento;
- O perfil de distribuição do 2-FAL entre o papel e o óleo mineral. Para cada valor de 2-FAL, não existe um valor exato de DP correspondente, mas distribuições longitudinais, axiais e radiais de valores de DP entre a zona superior e inferior do enrolamento. E, novamente, estas distribuições de valores são uma função dos perfis de temperatura, umidade e oxigênio dissolvido do interior do transformador.

Um estudo estatístico desenvolvido na Europa [5], abrangeu 5005 transformadores espalhados por 4 países de Europa, constatando-se uma série de padrões de referência, como por exemplo:

- O aumento da idade do transformador significou um aumento da quantidade de equipamentos com maior concentração de 2-FAL, principalmente, para aqueles em que não fora constatada qualquer substituição ou regeneração do isolamento líquido;
- Os transformadores de baixa tensão e/ou baixa potência foram os que apresentaram maior concentração de 2-FAL no óleo mineral;
- A produção de 2-FAL foi mais efetiva em transformadores com isolamento líquido não inibido ou de maior polaridade, para as mesmas condições experimentais.

Apesar da alta estabilidade do composto 2-FAL em óleo mineral, consequente da degradação do isolamento sólido, vem sendo sugerida na literatura uma análise mais complexa destes compostos, com ênfase especial para o 2-FOL [8]. Neste estudo, por exemplo, foi apresentada uma comparação da degradação térmica do papel termoestabilizado e convencional, ambos do tipo Kraft. Pelas análises do DP, 2-FOL e 2-FAL, para amostras de papel termoestabilizado envelhecidas ao longo de 24 h, sob diferentes temperaturas (de 90 °C a 240 °C), foi identificado o 2-FOL como o composto de maior concentração no fluido. Já para as amostras de papel convencional o 2-FAL continuou se mostrando o indicador ideal na realização deste tipo de manutenção preventiva. Verificou-se, porém, a necessidade de um estudo em longo prazo do composto em si e da evolução de sua concentração em amostras envelhecidas, tanto em campo como em laboratório, para a certificação da metodologia de análise.

II. EXPERIMENTAL

A. *Caracterização do 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 norma [9].

B. *Caracterização do 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) [10] e por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) [11].

C. *Envelhecimento do sistema papel/óleo*

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, 111 amostras, submetidas a duas diferentes temperaturas (100 °C e 125 °C), durante um intervalo de tempo de até 240 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.

D. *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 111 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 nitrogênio 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 51 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) 60 amostras de papel Kraft convencional foram preparadas após previamente secas em estufa sob vácuo a 100 °C/ 2 h, sendo realizado ensaio de grau de polimerização antes e depois da secagem. O papel convencional e o papel 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 51 amostras utilizando tiras de 2 cm de largura e 4 m de comprimento, previamente enroladas. Como padrão de referência foram preparadas 9 amostras contendo massa de papel convencional semelhante à utilizada no papel termoestabilizado; e, v) foram preparadas 111 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. Trata-se de amostras de papel termoestabilizado, papel convencional e, também, de papel convencional como equivalente de massa do papel termoestabilizado.
- 108 amostras, sujeitas ao envelhecimento em estufa a 100 °C e 125 °C, respectivamente, durante até 240 dias. Trataram-se de 50 amostras de papel termoestabilizado, 50 de papel convencional e 8 de papel convencional como equivalente de massa do papel termoestabilizado.

Todo este processo de envelhecimento foi baseado na literatura pesquisada [3] 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.

E. Análise do envelhecimento do óleo/papel

O envelhecimento acelerado dos sistemas óleo/papel foi preparado para ser desenvolvido ao longo de 240 dias, sendo retiradas periodicamente amostras de isolamento convencional e termoestabilizado, submetidas às temperaturas de 100°C e 125°C.

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 15349/2006 [12]. 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 grau de polimerização, de acordo com a ABNT NBR IEC 60450: 2009 [13]. 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.

III. Resultados e Discussão

A. Caracterização do Isolamento Líquido – Óleo isolante

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 Biocombustíveis [9].

B. Caracterização do Isolamento Sólido - Papel

Para a amostra de papel Kraft termoestabilizado foi possível caracterizar as bandas de celulose presentes via espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (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 2 está apresentado o espectro de infravermelho para ambas as amostras de papel Kraft, de forma comparativa.

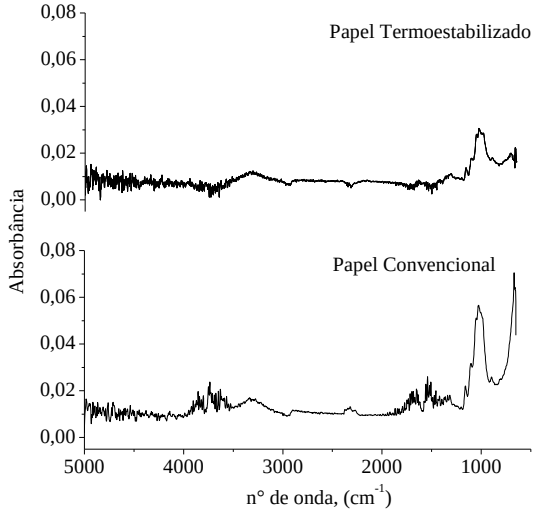

Figura 2. Caracterização das amostras de papel termoestabilizado e convencional pela análise FTIR.

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.

O isolamento sólido foi também caracterizado pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). As microscopias apresentadas na Figura 3 (a) e (b) representam a superfície dos papéis Kraft convencional (a) e termoestabilizado (b), com a ampliação de 150x. Para o detalhamento das fibras, foram ainda obtidas imagens para uma aproximação, de 1000x, conforme apresentado na Figura 3 (c) e (d).

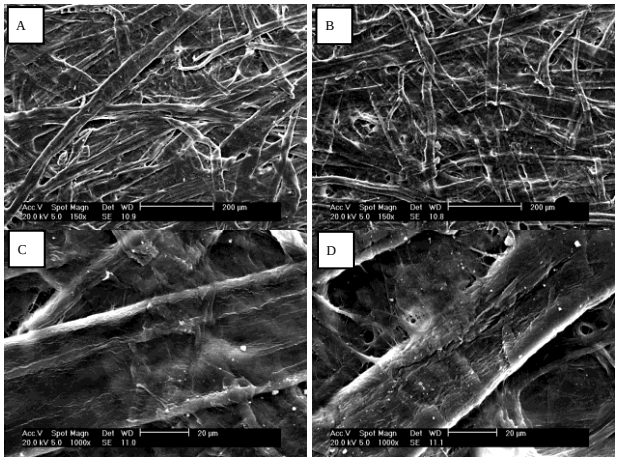

Figura 3. Caracterização das amostras de papel pela análise de MEV, conforme: (a) convencional, 150x; (b) termoestabilizado, 150x; (c) convencional, 1000x; (d) termoestabilizado, 1000x.

Na análise microscópica geral dos papéis novos, conforme representado na Figura 3 pode ser observada uma fase densa, intercalada com um emaranhado de fibras de diferentes dimensões e ordens de grandeza. Para as imagens com ampliação de 1000x (Figura 3c. e 3d.), nota-se uma maior concentração de estrias nas fibras do papel isolante convencional (em relação ao termoestabilizado), evidenciando a tendência de maior fragilidade do primeiro.

C. Envelhecimento do Sistema OMI/ Papel

A análise do óleo mineral e papéis envelhecidos permitiram a evidência das alterações das características de ambos, quando submetidos ao estresse térmico. Neste sentido, os resultados obtidos propiciaram o desenvolvimento de um estudo comparativo da formação dos compostos furânicos em óleo, frente à diminuição do grau de polimerização do papel isolante, com a influência de diferentes tempos de envelhecimento e sob diferentes condições de temperatura. Na Figura 4 estão apresentadas as curvas de envelhecimento dos sistemas para a temperatura de 100 °C e na Figura 5 para a temperatura de 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-hidroximetilfurano (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 papel Kraft convencional, paralelamente à rápida degradação do material, houve a formação e a dissolução em óleo de todos os 5 compostos, com predomínio do 2-FAL, que atingiu valores altos e até superiores aos encontrados em equipamentos reais. Analisando ponto a ponto, acredita-se que a obtenção de valores de concentração do composto muito acima do encontrado em campo pode ser justificada uma vez que a degradação do papel isolante apresentou valores muito acentuados para os primeiros 50 dias do estudo desenvolvido a 100 °C e para os primeiros 25 dias do trabalho a 125 °C. Valores de DP na faixa de 250 a 200, correlacionados a concentrações de 2-FAL acima de 10 $mg.L^{-1}$,em campo, provocariam parada imediata de máquina para manutenção corretiva.

Analisando ainda, a Figura 5, é 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 [5].

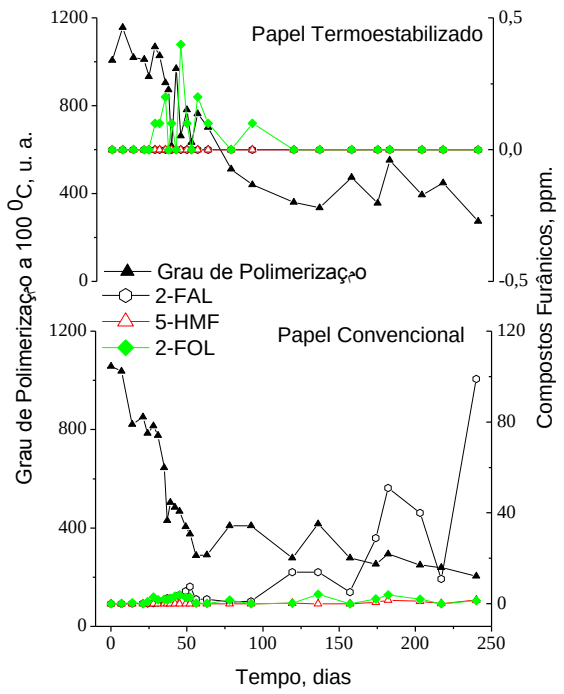

Figura 4. Curva de envelhecimento do sistema óleo/papel a 100 °C.

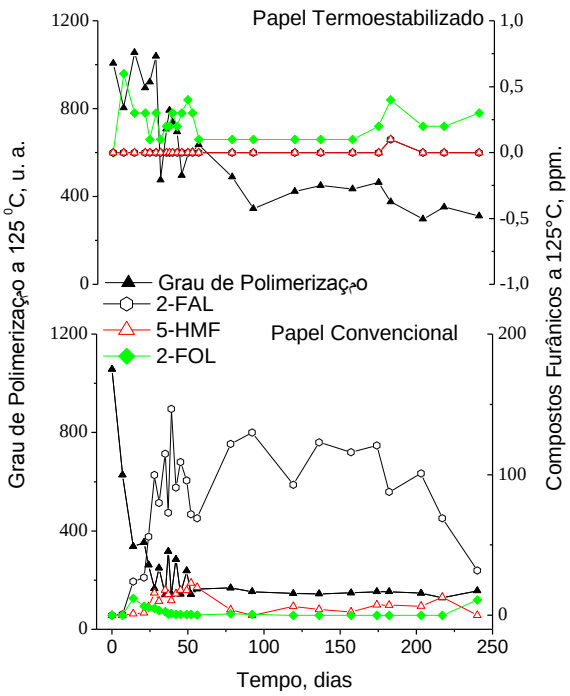

Figura 5. Curva de envelhecimento do sistema óleo/papel a 125 °C.

Outro padrão detectado foi o revelado no estudo da formação do 2-FOL em óleo. De acordo com as Figuras 4 e 5 a evolução do composto ao longo do envelhecimento pode ser notada logo para as primeiras amostras retiradas da estufa, confirmando o estudo de Martins [8]. 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.

De modo a permitir uma análise mais apurada e comparativa para ambos os compostos (2-FAL e 2-FOL) frente à degradação do DP, bem como estabelecer uma curva base para guiar as atividades de manutenção preventiva, foram construídas curvas logarítmicas para o envelhecimento, conforme o desenvolvido, anteriormente, por diversos pesquisadores. Na Figura 6, estão apresentadas as curvas logarítmicas para o envelhecimento de papel termoestabilizado (2-FOL) e, na Figura 7, para o estudo de papel convencional (2-FAL).

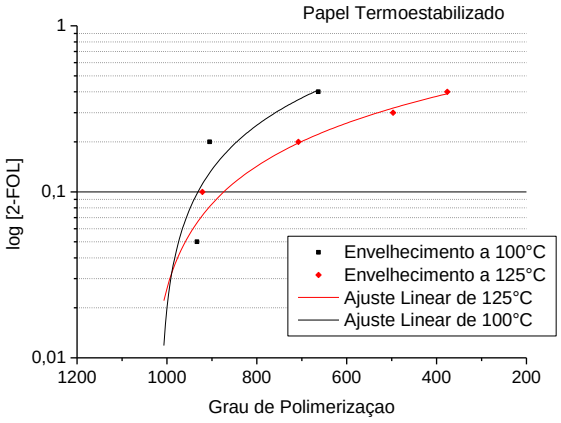

Figura 6. Curva logarítmica da correlação entre DP e concentração de 2-FOL para o estudo de envelhecimento do papel termoestabilizado.

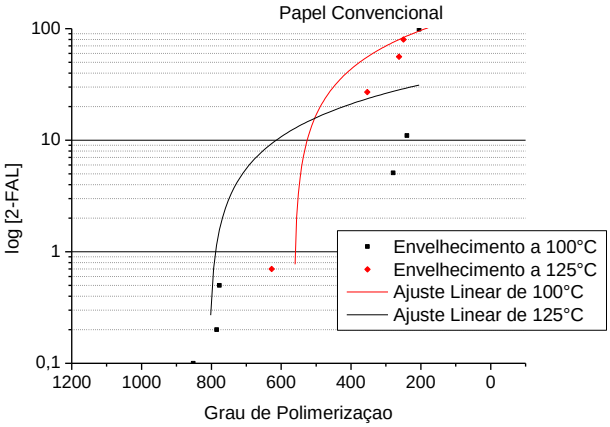

Figura 7. Curva logarítmica da correlação entre DP e concentração de 2-FAL para o estudo de envelhecimento do papel convencional.

De acordo com as curvas logarítmicas de correlação entre o DP e a concentração de compostos furânicos foi possível observar uma série de padrões que qualificam o envelhecimento em questão. Em primeiro lugar, notou-se que, diferente dos estudos desenvolvidos por outros pesquisadores, a utilização no logaritmo com base 10 e ajuste linear não permitiram a formação de uma reta para os dados obtidos. Sendo assim, atribuiu-se que este não foi o melhor ajuste, uma vez que uma equação de correlação pode ser de mais complexa aplicação.

Além disso, para o papel termoestabilizado, especificado na Figura 6, a não-linearidade das curvas, bem como o crescimento gradual das mesmas indicam a degradação lenta e constante do material sólido, paralelamente à formação do

2-FOL. Comparativamente, para 100 °C e 125 °C, foi possível notar um comportamento padrão, bastante semelhante, sendo apenas otimizada a formação do composto com o incremento de temperatura. Mais do que isso, para DP abaixo de 600, notou-se que a curva tendeu à estabilização. Isso significa que, mesmo para valores muito baixos de 2-FOL, há a possibilidade de haver papel termoestabilizado em condições de alta degradação.

Quanto ao papel convencional, retratado na Figura 7, notou-se uma degradação mais acentuada do isolamento sólido, com formação de grandes quantidades de 2-FAL. Para as diferentes condições de temperatura, novamente o comportamento de ambas as curvas se mostrou bastante semelhante. Diferente do termoestabilizado, as curvas de degradação do papel convencional e formação do 2-FAL apresentaram, ainda, um caráter ascendente, com tendência à estabilização apenas para valores de DP abaixo de 200, quando normalmente já houve parada de máquina.

Sob as curvas, é possível, ainda, verificar uma equação global que serve de auxílio na manutenção preditiva de transformadores. Porém, conforme verificado na literatura, o isolamento sólido, além de apresentar uma degradação heterogênea, não pode ser estudado apenas quanto à formação de compostos furânicos, uma vez que diversos outros fatores exercem influência significativa na degradação. Isto pôde ser comprovado com a aplicação das equações de correlação desenvolvidas por diversos pesquisadores, conforme detalhado na Tabela 1Tabela.

Tabela 1. Aplicação das Equações de Correlação para o Papel Convencional

2-FAL	Envelhecimento a 100 °C – Papel Convencional Grau de Polimerização				
	Real	DePablo	Burton	Vuarchez	Chen-dong
0,1	852	712	700	735	714
0,2	785	685	640	673	628
0,5	777	617	560	592	515
0,8	409	561	519	550	456
1,1	410	514	492	522	417
5,1	279	243	358	386	226
11	240	137	292	318	131
99	205	18	101	123	-142
2-FAL	Envelhecimento a 125 °C – Papel Convencional Grau de Polimerização				
	Real	DePablo	Burton	Vuarchez	Chen-dong
0,7	628	578	531	562	473
27	354	63	214	238	20
56	263	32	150	174	-71
80	250	22	119	142	-115
122	169	15	83	105	-168
130	153	14	77	99	-175

Conforme apresentado na Tabela 1, há uma discordância bastante significativa entre os dados reais, obtidos ao longo do estudo desenvolvido e a aplicação das equações de correlação sugeridas na literatura. É possível notar, inclusive, que houve uma variação bastante grande entre os valores do DP previsto pelos quatro pesquisadores, o que comprovou a inexistência de uma equação matemática direta entre os dados em questão.

Apesar da inexistência de uma equação matemática que correlacionasse os dados de DP e a formação de compostos furânicos, ainda assim é possível traçar um perfil aproximado do isolamento sólido dos equipamentos amostrados. Porém, apesar da obtenção de um breve histórico das máquinas, não foi possível a identificação do tipo de isolamento sólido (papel Kraft convencional ou termoestabilizado), o que dificultou a verificação dos dados obtidos. Acredita-se, porém, que transformadores com idade inferior a 5 anos sejam isolados por material termoestabilizado ou por uma mistura de ambos. Equipamentos mais antigos, especialmente aqueles que apresentaram a formação de 2-FAL devem apresentar isolamento convencional e, portanto, necessitam de um acompanhamento maior, devido à fragilidade do mesmo.

IV. Conclusões

Produtos indicadores da degradação do papel isolante em equipamentos elétricos, os compostos furânicos foram avaliados frente à diminuição do grau de polimerização do isolamento sólido, de modo a desenvolver um estudo comparativo entre ambos os tipos de materiais existentes e que propiciasse uma análise diferenciada dos ensaios de manutenção de transformadores.

Em um primeiro momento, foi analisado o parâmetro furfuraldeído (2-FAL), o qual é largamente utilizado pelas concessionárias de energia. O 2-furfuraldeído apresentou um comportamento padrão, com o aumento de sua concentração com o tempo de envelhecimento. Para o papel convencional, obtiveram-se resultados semelhantes à realidade das concessionárias de energia, especialmente para as amostras submetidas a 100°C; para o estudo conduzido com estufa a 125°C, a concentração encontrada para o produto ultrapassou bastante o histórico dos equipamentos, revelando a significativa degradação do papel convencional sujeito a estas condições. O isolamento sólido termoestabilizado, do contrário, apresentou baixíssima formação do composto para as temperaturas de estudo, sendo detectado apenas através dos ensaios colorimétricos. Neste caso, a degradação do papel se deu de forma mais lenta e gradual, apesar do aparecimento de alguns picos pouco relevantes nas curvas resultantes das análises de DP.

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 evolução da concentração da substância revelaram um comportamento confirmatório deste mecanismo. A formação do composto através do tempo apresentou um padrão ondulatório, exibindo a dissolução deste em óleo e, em seguida, a dimerização do 5-HMF 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. Confirmando algumas pesquisas da literatura, o envelhecimento do papel termoestabilizado levou a dissolução do composto logo para as primeiras amostras retiradas da estufa, mesmo para a menor temperatura em desenvolvimento. Além disso, em momento algum os resultados obtidos apresentaram picos inexplicáveis ou ainda comportamento heterogêneo da concentração do produto em óleo mineral isolante. Pelo contrário, as curvas de evolução do 2-FOL para o isolamento em questão sempre tiveram um aumento suave, gradual e constante, paralelamente à degradação dos materiais envolvidos. No mais, tal resposta imediata do óleo em relação à degradação térmica incipiente do papel termoestabilizado se mostra bastante interessante, do ponto de vista da manutenção. Uma vez que já foi verificada a dissolução de 2-FOL em óleo para DP a partir de 900, o acompanhamento do estado do papel pode ser desenvolvido logo no início da vida útil do transformador, permitindo o desenvolvimento de um diagnóstico mais completo, diminuindo significativamente a ocorrência de falhas e interrupções no fornecimento de energia.

Somando ambos os resultados para óleo e papel, foram desenvolvidas ainda curvas logarítmicas de correlação entre o DP e os compostos furânicos. Analisando os dados obtidos em comparação com as curvas logarítmicas de correlação desenvolvidas por outros pesquisadores, comprova-se a inexistência de uma equação matemática global que relacione os resultados de ensaio da concentração de compostos furânicos e o estado do isolamento sólido através do DP.

Sendo assim, conclui-se que as curvas obtidas podem ser utilizadas como base para manutenção preditiva dos equipamentos elétricos, mas não fornecem valores absolutos de previsão do estado real do isolamento sólido. A análise do comportamento da formação de 2-FOL para papel termoestabilizado e 2-FAL para papel convencional através do envelhecimento garantirá, portanto, um resultado mais apurado, uma vez que seja considerado, no estudo, o histórico da concentração dos furanos no OMI da máquina.

V. Agradecimentos

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

VI. Referências Bibliográficas

[1] ANEEL, "Relatório da Agência Nacional de Energia Elétrica - 10 anos," Brasília, DF, Brasil, 2008.

[2] L. Tulio, "Estudo do envelhecimento acelerado de óleo vegetal isolante em escala laboratorial," Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia do Paraná, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

[3] D. A. Batista, "Desenvolvimento de metodologia colorimétrica para dosagem de compostos furânicos em óleo mineral isolante," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

[4] P. O Fernandes, "*Apostila de Manutenção de Transformadores através do Controle do Óleo Isolante Mineral*," Westinghouse do Brasil, Divisão de Serviços Industriais, 1988.

[5] M. A. Martins, "Furfuraldeído - Um Indicador Prático da Degradação Térmica do Papel Kraft de Transformadores," Ciência e Tecnologia de Materiais, vol. 19, pp. 25-33, Jan. 2007.

[6] A. C. Diogo, "Avaliação da Vida Útil de Transformadores por Cromatografia Líquida," in 1997 XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.

[7] H. Lütke, I. Höhlein and A.J. Kachler, "Transformer Ageing Research on Furanic Compounds," in 2002 CIGRÈ.

[8] M. A. Martins, "Monitorização da degradação térmica do papel isolante usado em transformadores: Papel Thermally Upgraded Versus Papel Kraft," Ciência e Tecnologia dos Materiais, vol. 19, pp. 14-18, Jan. 2007.

[9] *ANP Resolução da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustívei*,Resolução ANP n° 36, 2008.

[10] G. Samistraro, G. I. B. Muniz, P. de Peralta-Zamora e G. Cordeiro, "Previsão das propriedades físicas do papel Kraft por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) e regressão por mínimos quadrados parciais (PLS)," Química Nova, vol. 32, pp.6, Jul. 2009.

[11] S. A. Quadros, "Papel Nomex Utilizado em Transformadores: Avaliação das Características e Degradação Térmica," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

[12] *ABNT NBR 15349, Óleo Mineral Isolante - Determinação de 2-furfural e seus derivados*, Norma Técnica ABNT, 2006.

[13] *ABNT NBR IEC 60450, Medição do Grau de Polimerização Viscosimétrico Médio de Materiais Celulósicos Novos e Envelhecidos para Isolação Elétrica*, Norma Técnica ABNT, 2009.