



Avaliação da Qualidade da Secagem de Transformadores de Distribuição na Fábrica

Eng. Luis Ricardo Alfaro Gamboa
Eng. Marcelo Antonio Ravaglio
LACTEC
gamboa@lactec.org.br

Eng. Nuno Gustavo Adonis
COPEL Distribuição
ngadonis@copel.com

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar as técnicas de avaliação da qualidade do processo de secagem de transformadores de distribuição (TDs) em fábrica. Também sugere que se especifique um limite de umidade residual (1%) com base nas normas que definem a expectativa de vida dos TDs.

Nos transformadores de potência (TFs) novos, o teor de umidade residual máximo especificado por muitas concessionárias, no Brasil, é de 0,5 %. Entretanto, os teores médios encontrados pelo LACTEC em TDs novos, adquiridos tanto pela COPEL como por outros usuários, são de 2,5 %.

Estudos realizados no âmbito da *CIGRÉ* mostram que se a umidade passa de 1,0 % para 3,0 %, a taxa de envelhecimento do papel isolante é acelerada em aproximadamente 6 vezes.

O trabalho mostra como a expectativa de vida normal dos TDs (20,5 anos) conforme a norma ANSI/IEEE C57.91-1995 “*Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers*”, resultou de estudos do *EPRI*, realizados em corpos de prova (TDs e bobinas de TFs) com papel isolante com teores de umidade bastante baixas, entre 0,2 e 0,4 % (Ref. 4).

Não havendo especificação de valores limites para o teor de umidade em TDs novos, a secagem usual em fábrica se restringe à colocação da parte ativa em estufas sem vedação adequada, com temperaturas entre 100 e 130°C, por tempos que variam de acordo com as dimensões do TD. Depois, a parte ativa é retirada da estufa e montada no tanque junto com as buchas e demais acessórios em ambiente não controlado. Nesta etapa (de meia hora a duas horas) antes do enchimento com óleo, o papel absorve umidade do ambiente. Em TFs são aplicados processos de controle mais eficientes e caros.

A COPEL aguarda a adequação dos seus principais fornecedores para exigir um teor máximo de umidade residual de 1% nos seus TDs .

O trabalho apresenta um resumo dos métodos atualmente empregados para a medição do teor de umidade de TDs isolados com papel-óleo e aponta técnicas aplicáveis para se controlar, durante o processo de fabricação, a umidade da isolação ainda não impregnada com óleo. A adoção de teores limites de umidade em TDs novos por outras concessionárias teria reflexos econômicos, motivando fabricantes a investir em seus processos com alguma expectativa de retorno, algo que hoje não ocorre.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador de Distribuição, Secagem, Expectativa de Vida.

1. INTRODUÇÃO

Os TDs têm sido objeto de preocupação principalmente pelas altas taxas de falha que apresentam. Embora boa parte opere normalmente abaixo de suas características nominais, sua vida útil, no Brasil, é bastante inferior à esperada (20,5 anos) por guias de carregamento como o ANSI/IEEE C57.91-1995 “*Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers*” (Ref. 1). O critério de fim-de-vida é dado por características relacionadas com a degradação do papel isolante empregado em sua fabricação. A primeira característica a ser considerada foi a resistência à tração, seguida do Grau de Polimerização – GP. Estes dois ensaios são de natureza pontual porque requerem amostras de papel de uma determinada região da isolação, nem sempre representativa da região mais degradada. Hoje existem técnicas indiretas baseadas em amostragem de óleo e ensaios elétricos baseados em fenômenos de polarização dielétrica, ambas fortemente influenciadas pela presença de umidade no sistema papel-óleo. Todas estas técnicas foram desenvolvidas inicialmente para TFs.

É importante destacar que o guia ANSI/IEEE C57.91/1995, ao levar em conta os estudos do EPRI (Ref. 4) unificou as duas normas existentes até aquela data e que tratavam separadamente os transformadores até 500 kVA, onde os TDs se enquadravam, dos transformadores com potência superior a 500 kVA. Isto porque a perda de vida resultou ser independente do tamanho do transformador, desde que a isolação fosse a mesma. A expectativa de vida de 20,5 anos foi obtida com um fator de segurança 5. É oportuno considerar que esta margem está relacionada com aspectos tais como a existência de materiais não uniformes aplicados na fábrica e a um controle difícil de fatores inerentes a um processo de fabricação essencialmente manual, contrariamente aos protótipos empregados nesses estudos onde, por exemplo, o teor de umidade das amostras (bobinas e TDs completos de fabricantes conceituados) não ultrapassou 0,4 %. Observar que no gráfico da figura 1, a taxa de envelhecimento igual 1, usada como referência, é válida para o teor de umidade de 0,3 %.

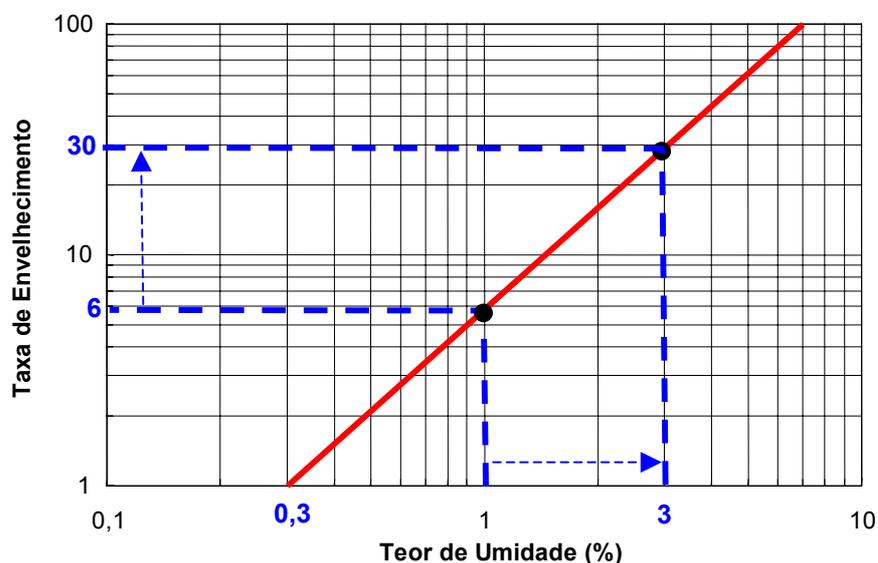


FIGURA 1 -TAXA DE ENVELHECIMENTO EM FUNÇÃO DA UMIDADE DO PAPEL (FABRÉ-PICHON, CIGRÉ, 1960)

O gráfico ilustra (em azul) que um acréscimo do teor de umidade de 1 % para 3 %, eleva em 5 vezes a taxa de envelhecimento do papel (passando de 6 para 30). Esta comparação mostra que a margem de segurança do guia de carregamento (fator 5) fica neutralizada para boa parte dos TDs em operação, adquiridos com teores de umidade muito acima da referência de 0,3 %.

O teor de umidade médio provocado pela degradação térmica do papel isolante em TFs em operação é de 0,075 % ao ano. Portanto, um acréscimo 1,5% sobre o teor inicial é esperado após 20 anos de

operação. Teores acima de 3 % são considerados perigosos, mesmo para as classes de 34,5 e 13,8 kV do sistema de distribuição. Uma vez que nos TDs novos da COPEL os teores encontrados são, em média de 2,5 %, a importância de se controlar o teor residual já na fábrica é fundamental.

A degradação do papel isolante provoca a perda de suas propriedades isolantes e mecânicas. Estas últimas são perdidas mais facilmente. Cabe lembrar que os esforços mecânicos a que estão submetidos os TDs são severos (curtos-circuitos externos e repetitivos na rede de BT ou nas instalações dos consumidores), uma vez que os tempos de interrupção para curtos-circuitos de poucas vezes a corrente nominal podem ser bastante longos. Forças de atração e repulsão, proporcionais ao quadrado da corrente, aparecem entre as espiras e os enrolamentos do transformador, respectivamente, solicitando mecanicamente o papel isolante (apenas a isolação entre as espiras das bobinas de AT é executada com fio esmaltado). Estes esforços podem provocar defeitos tais como o afrouxamento de calços e deformações nas bobinas, o que diminui a suportabilidade mecânica do TD para uma solicitação posterior e assim, sucessivamente. Nestas condições, com as mudanças provocadas na geometria dos enrolamentos, a falha do TD pode ocorrer tanto por uma solicitação mecânica como elétrica.

Solicitações elétricas podem aparecer no enrolamento de BT por transferência capacitiva de sobretensões devidas a descargas atmosféricas na rede de AT ou pelo aparecimento de tensões induzidas diretamente na rede de BT durante descargas atmosféricas próximas.

2. ENVELHECIMENTO DO PAPEL ISOLANTE

A celulose que compõe o papel isolante é um composto orgânico polimérico, cujas moléculas consistem em longas cadeias de anéis de glicose (monômeros). A resistência mecânica é proporcional ao comprimento destas cadeias.

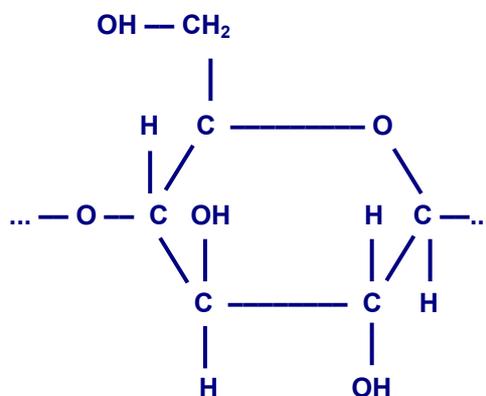


FIGURA 2 – MOLÉCULA DE GLICOSE

Um parâmetro importante para caracterizar a degradação do papel isolante é o Grau de Polimerização (GP), definido pelo número médio de anéis de glicose na molécula. Tipicamente varia entre 1000 e 1400 para um papel novo. Devido aos processos de secagem em fábrica, o GP da isolação de um transformador é menor que em papel novo e não é raro se especificar um valor mínimo de 800.

Um GP na faixa de 100 a 250 serve como critério de fim-de-vida. Os mecanismos de envelhecimento do papel são basicamente três e estão associados aos processos de hidrólise (água), oxidação (oxigênio) e pirólise (calor). Todos eles promovem a quebra de ligações e portanto: **mais água**.

Os TDs são selados (sem sistema de respiro), de modo que a oxidação de origem externa pode ser desprezada. Mesmo assim, o processo de oxidação da celulose acontecerá se o óleo isolante sofrer degradação, gerando compostos oxidantes. No óleo isolante dos TFs, usam-se aditivos anti-oxidantes para retardar sua degradação e também há monitoração periódica de sua acidez (impraticável em TDs).

Considerando-se um TD com vedação eficiente, a umidade já contida na isolação é que deverá merecer o maior interesse, sendo desejável um valor inicial baixo.

A temperatura é o agente de degradação mais estudado e o que gerou os critérios de cálculo perda de vida útil dos guias de carregamento. Entretanto, numa pesquisa publicada em Outubro de 2005, especialistas da Siemens (na fábrica de Nuremberg) mostraram que para as temperaturas normais de operação dos transformadores (na faixa de 75 a 95° C) o principal fator de envelhecimento é a umidade presente na isolação e não a temperatura (Ref. 3).

Estes estudos reforçam a importância de se limitar o teor de umidade residual dos TDs novos e aumentam a necessidade de pesquisar as técnicas de medição deste parâmetro, uma vez que ao se especificar valores limites também devem ficar definidos os métodos adequados de ensaio.

São apresentadas a seguir algumas técnicas de medição do teor de umidade de transformadores isolados com papel-óleo. Existem também técnicas destinadas à avaliação da umidade do papel, após a secagem, antes da impregnação com óleo isolante, e que o fabricante pode empregar para ajustar seu processo de secagem em função de cada projeto de transformador, conforme especificação do cliente.

3. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

Já foram citados os métodos resistência à tração e grau de polimerização, GP, para papel isolante de TFs. Ambos os métodos são invasivos (requerem da retirada de amostras de papel) e pontuais (representam uma parte restrita da isolação), não sendo adequados a TDs. Métodos alternativos, aplicáveis a TDs novos, na fábrica, serão detalhados a seguir.

3.1. Tensão de Retorno - Espectro de Polarização

Este ensaio é realizado com um instrumento denominado RVM – sigla do inglês *Recovery Voltage Meter*. Para entender a finalidade do ensaio de tensão de retorno é necessário ter em conta que os ensaios convencionais para avaliar a qualidade da isolação em corrente contínua (Resistência de Isolamento) e em 60 Hz ($\tan \delta$), não têm sensibilidade para quantificar a umidade da isolação. Para conseguir observar o efeito da umidade no papel impregnado com óleo isolante é necessário excitar a isolação por tempos muito longos e de maneira especial. Uma descrição do modelo empregado para entender a influência da umidade neste ensaio e em ensaios dielétricos correlatos (itens 3.2 e 3.3), para os quais também há instrumentação específica, será necessária. Primeiro, devemos distinguir vários processos de polarização que ocorrem nos materiais isolantes quando excitados num campo elétrico para depois ver como isto se apresenta nos ensaios, em função da umidade e da temperatura.

a) Processos de Polarização – aspectos gerais

Alguns processos de polarização resultam somente da orientação de cargas no campo elétrico aplicado pela fonte de tensão (processos elásticos, sem perdas, extremamente rápidos, da ordem de 10^{-14} s), não sendo relevantes para nosso propósito. Outros, como é o caso da polarização interfacial (quando mais de um material isolante está na presença do campo externo) são mais lentos porque sua resposta envolve o deslocamento de cargas até a região de fronteira dos materiais envolvidos, no caso dos transformadores: papel e óleo isolante. O tempo para cada processo se desenvolver depende da permissividade e resistividade dos materiais que formam este “sanduíche dielétrico”. Cada uma destas propriedades contribui com valores de parâmetros mais usuais no estudo dos materiais dielétricos: capacitância e resistência de polarização, respectivamente. Na figura 3, os diferentes processos de polarização são identificados pelos ramos Rp_1-Cp_1 , Rp_2-Cp_2 , etc. O produto RC de cada ramo representa o tempo necessário para que tal processo se desenvolva em termos de carga ou descarga. Este tempo é denominado de tempo de relaxação, τ . Destes processos o mais importante para nosso estudo é a polarização interfacial, um processo que apresenta perdas e é afetado fortemente pela presença de água.

Com a umidade, a capacitância de polarização aumenta várias vezes, uma vez que a constante dielétrica da água é muito superior à dos materiais (papel e óleo) constituintes do *sanduíche* dielétrico (Ref. 5). Porém a resistência é afetada mais fortemente pela baixa resistividade da água, diminuindo em centenas de vezes, de modo que o tempo de relaxação ($\tau = R_p \times C_p$), como um todo, fica sensivelmente reduzido, acelerando, assim, a resposta deste processo. Em termos práticos, um aumento de 1% no teor de umidade do papel pode acelerar a resposta em mais de 10 vezes. O tempo de resposta depende também da temperatura da isolação, que acelera a mobilidade das cargas elétricas e, portanto, os processos de polarização nos materiais isolantes. Desta forma, os valores deste ensaio são corrigidos para uma temperatura de referência, usualmente de 20 °C.

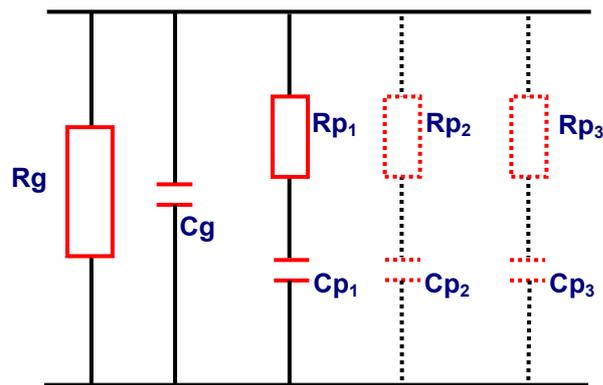


FIGURA 3 – CIRCUITO EQUIVALENTE DA ISOLAÇÃO

b) Circuito de medição.

Para uma determinada frequência de excitação e temperatura do material, ocorrerá ressonância. Nos processos com perdas, esta frequência representa um valor de pico para as perdas. Entretanto, ao não ser conhecida esta frequência o RVM realiza uma varredura baseada em tempos de carga e descarga, através da operação das chaves Ch_1 e Ch_2 , mostradas na figura 4. Um eletrômetro é necessário para medir as tensões obtidas, uma vez que os voltímetros usuais não têm impedâncias suficientemente elevadas para medir, sem interferir nos processos internos de carga e descarga da isolação, representando uma carga. O eletrômetro interno do RVM é praticamente um circuito aberto (com impedância de 2.000 T Ω), apresentando uma corrente de fuga de apenas 1 pA para 2 kV CC.

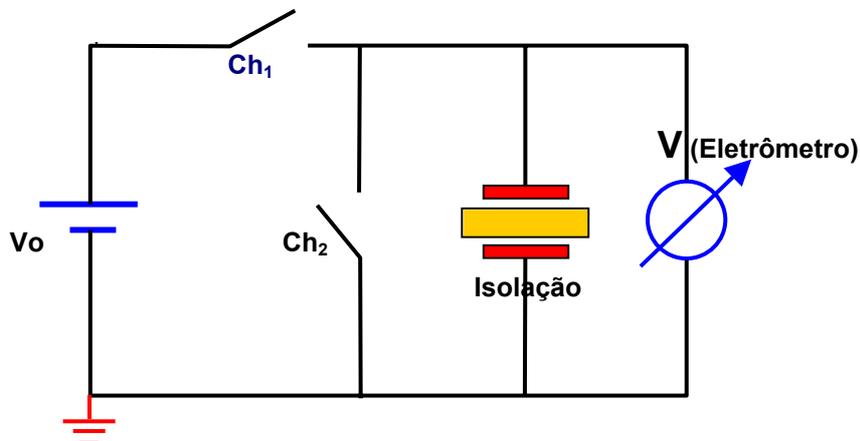


FIGURA 4 - CIRCUITO DE ENSAIO COM O RVM

c) Ensaio de Tensão de Retorno

Fechando-se a chave Ch_1 , uma tensão V_0 é aplicada à isolação sob teste durante um tempo t_c . Em TDs, um V_0 entre 500 V e 1.000 V se aplica ao enrolamento secundário, contra o enrolamento primário aterrado junto com a massa. Na figura 4 o circuito equivalente da isolação foi simplificado por um capacitor. Completado o tempo t_c , abre-se Ch_1 e imediatamente fecha-se Ch_2 , curto-circuitando assim a isolação por um tempo t_d (50 % de t_c) para descarga da isolação. Esta descarga será completa ou parcial, dependendo da relação entre t_d e o tempo de relaxação dos processos de polarização iniciados. A seguir, é aberta a chave Ch_2 e o eletrômetro passa a registrar uma **tensão de retorno**. A figura 5 mostra o perfil da tensão durante o ensaio. Na figura 5 foi registrada a tensão de descarga, que é a que usualmente observaríamos num circuito RC, se não fechássemos a chave Ch_2 para curto-circuitar a isolação.

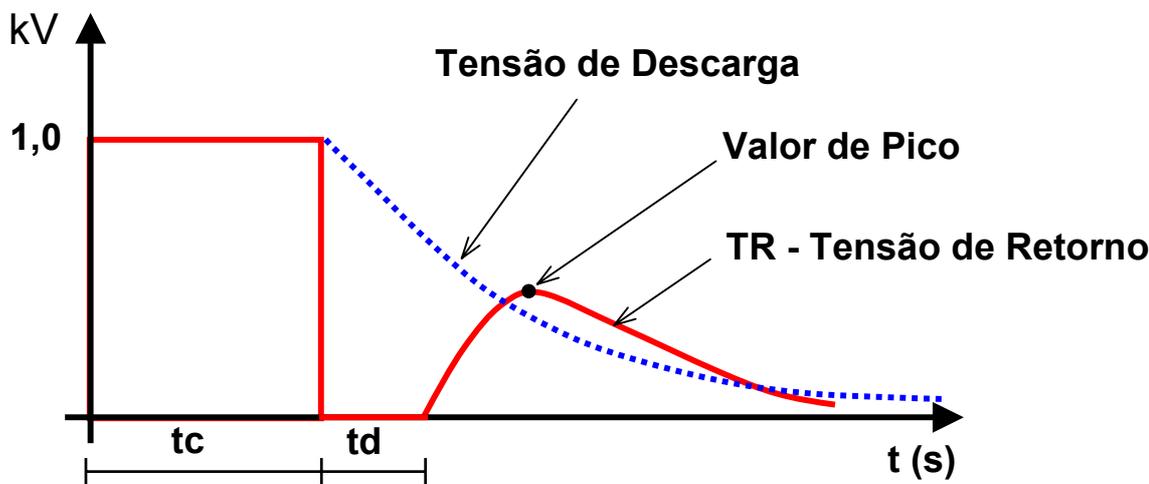


FIGURA 5 – DESENVOLVIMENTO DA TENSÃO DE RETORNO

d) Espectro de Polarização

Repetindo o procedimento ilustrado na figura 5 para outros tempos de carga e mantendo-se a relação $t_c/t_d=2$, obtém-se uma família de curvas de tensão de retorno (TR_1, TR_2, \dots, TR_n) conforme figura 6. A envoltória dos picos destas curvas é chamada de Espectro de Polarização. O maior pico desta envoltória é obtido por interpolação e representa a resposta global, um tempo dominante da isolação, que está associado diretamente ao seu teor de umidade.

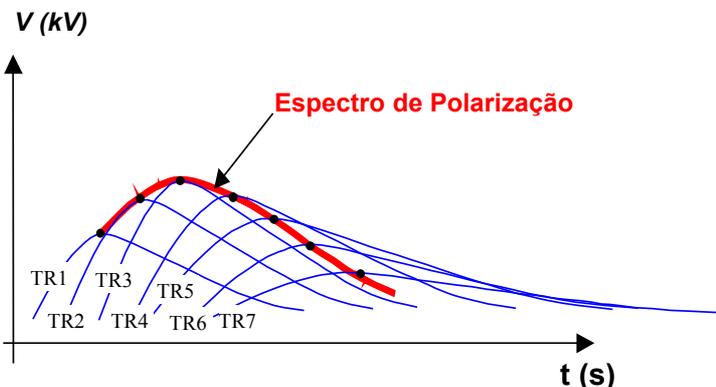


FIGURA 6 – ESPECTRO DE POLARIZAÇÃO E TENSÕES DE RETORNO

Se a umidade estiver distribuída uniformemente na isolamento, o formato da curva apresentará apenas um pico, caso contrário, aparecerão outros, representando respostas mais rápidas ou lentas, de acordo com regiões mais ou menos úmidas que a obtida para o pico predominante. Quando a superfície isolante é exposta à umidade ambiente aparece um segundo pico. O método é empregado para avaliar a qualidade dos processos de manutenção e recuperação de transformadores, onde a isolamento fica exposta ao ambiente, sem controle da umidade, por tempo prolongado.

A figura 7 mostra como se apresentam as respostas no RVM para o caso típico de distribuição uniforme de umidade (em vermelho) e para uma distribuição não uniforme (em azul), que pode ocorrer na fábrica, quando a secagem é eficiente para as camadas finas e expostas da isolamento, porém o papel mais espesso apresenta secagem ainda insuficiente. Nos transformadores em serviço, um pico extra na região mais rápida da curva é indicativo óleo isolante degradado.

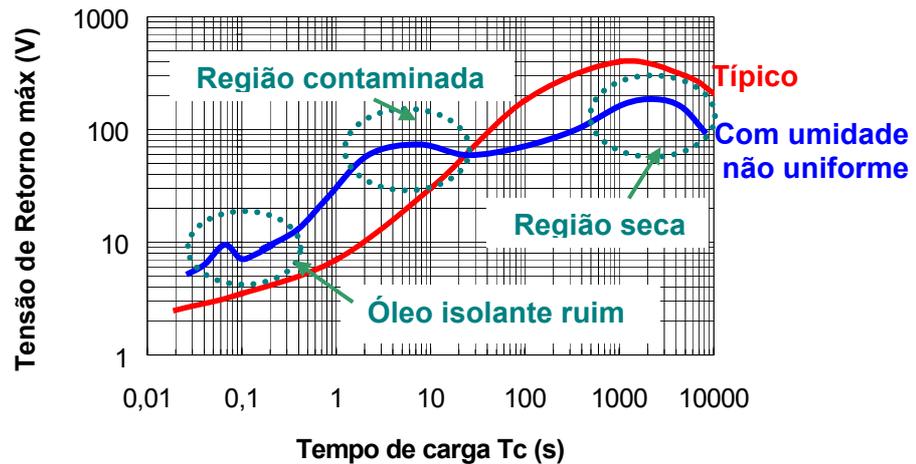


FIGURA 7 – ESPECTRO DE POLARIZAÇÃO TÍPICO DE UM TRANSFORMADOR

d) Ensaio de Tensão de Retorno e Degradação do Papel

Ensaio de envelhecimento acelerado em papel Kraft têm permitido comparar técnicas de medição diferentes como a tensão de retorno e o grau de polimerização. A figura 8 mostra o efeito da degradação do papel (com conseqüente geração de água) durante tempos de 4.000, 2000 e 500 horas a 120 °C. Os graus de polimerização correspondentes foram de 400, 600 e 1.200. A figura mostra o deslocamento para a esquerda, bastante significativo (escala logarítmica), da curva obtida para estas três situações com o RVM.

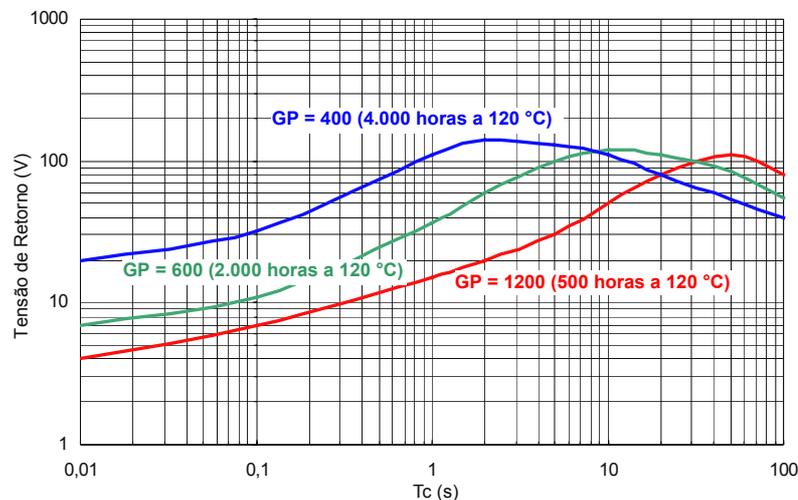


FIGURA 8 – ENVELHECIMENTO ACCELERADO DE PAPEL KRAFT (ENSAIOS A 60°C)

e) Ensaio de Tensão de Retorno em TDs da Copel

A figura 9 mostra resultados obtidos em TDs adquiridos recentemente pela Copel Distribuição. O valor de 1% na figura 9a foi obtido solicitando-se ao fabricante uma secagem otimizada para esta unidade.

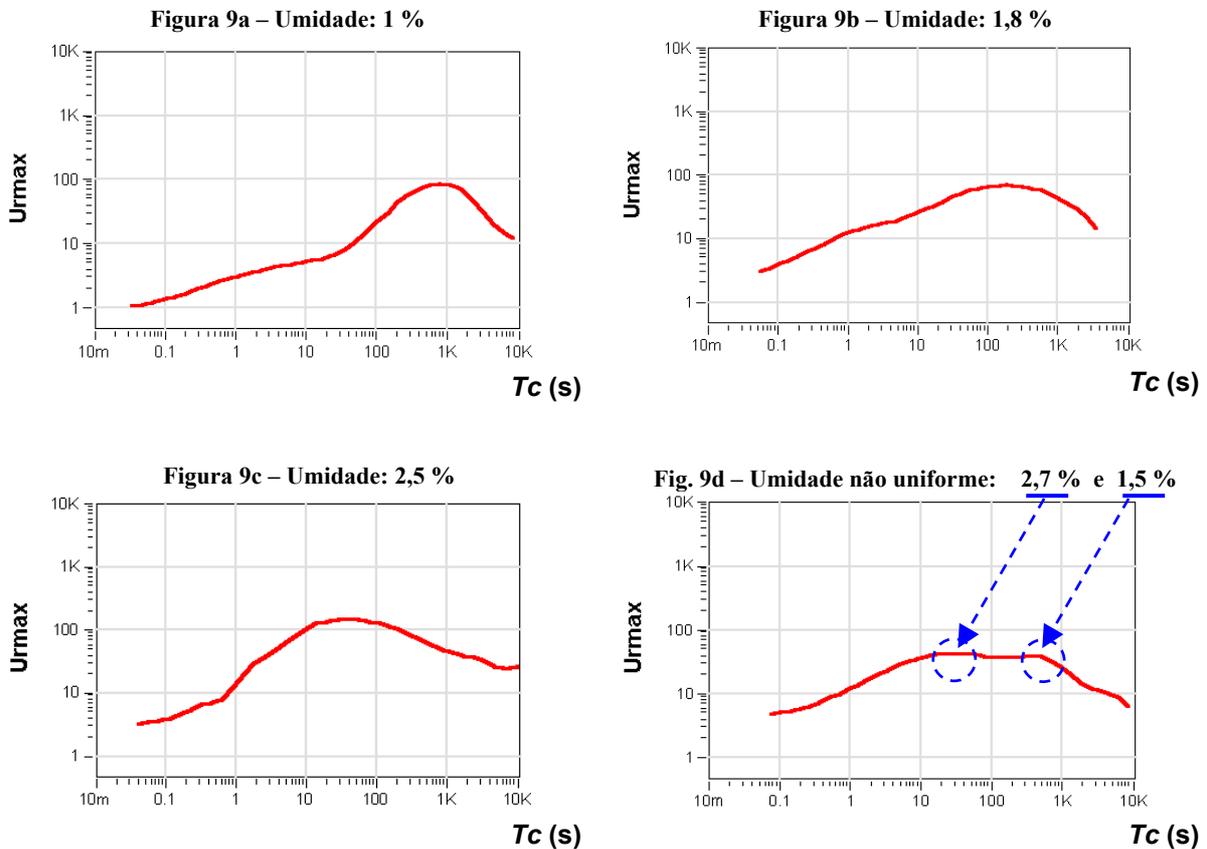


FIGURA 9 – TEOR DE UMIDADE EM TDs DA COPEL NOVOS COM O MÉTODO DA TENSÃO DE RETORNO

3.2. Espectrografia Dielétrica no Domínio da Freqüência (FDS)

Consiste na aplicação de uma tensão senoidal, usualmente $200 V_{pico}$, de freqüência variável, entre 0,1 mHz e 1 kHz em 20 pontos, para obter as componentes da impedância (complexa) na forma de um espectro. Este procedimento permite correções em função da condutividade do óleo isolante (se conhecida) no teor de umidade do papel impregnado com óleo e de parâmetros dimensionais do transformador, especialmente da geometria da isolação entre os enrolamentos de alta e baixa tensão. Experiências recentes realizadas no Lactec têm mostrado resultados compatíveis entre o método FDS (modelo IDA 200, da Programma) e o método do RVM (modelo 5461, da Tettex), para vários transformadores de potência e distribuição. Entretanto, é importante considerar que quando a umidade não está uniformemente distribuída na isolação do transformador, os métodos apontarão valores com alguma discrepância porque o método de FDS é configurado para medir exclusivamente a resposta da isolação entre os enrolamentos de alta e baixa tensão (as correntes de fuga entre cada enrolamento e a massa aterrada são desviadas do medidor). No caso do RVM, a medição requer que todos os enrolamentos não excitados estejam aterrados junto à massa do transformador (não permite que fiquem flutuando, acoplados capacitivamente ao enrolamento excitado pelo terminal de alta tensão do instrumento). Assim, conforme já comentado, a medição incluirá também as respostas entre o

enrolamento excitado e a massa, em paralelo com a resposta entre o enrolamento excitado e os demais, aterrados. As curvas das medições realizadas em unidades com teor de umidade variando entre 0,18 % e 3,51 % são apresentadas no gráfico da figura 10.

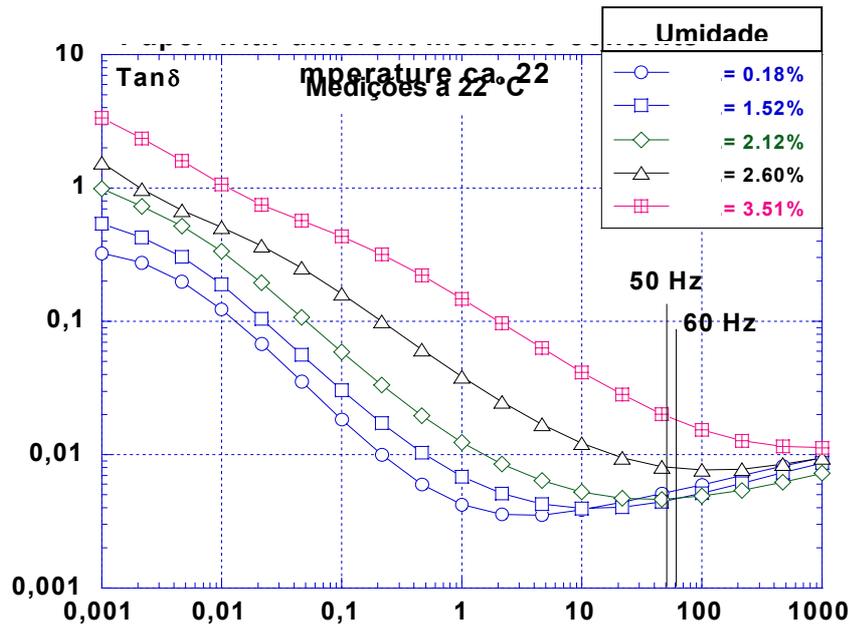


FIGURA 10 – PERDAS DIELÉTRICAS ($\tan \delta$) EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA (EM Hz) – FDS

3.3. Correntes de Polarização e Despolarização (PDC)

Este método permite avaliar a umidade do sistema papel óleo a partir da resposta da isolação, no domínio do tempo, a degraus de tensão de até 2 kV, entre 2.000 s e 10.000 s. Um acessório do instrumento empregado para este ensaio mede a condutividade do óleo, para análise mais detalhada do sistema isolante. O princípio é similar ao método da tensão de retorno, porém, a análise é realizada sobre a resposta a um longo degrau de tensão de carga, U_0 , seguido de um curto-circuito parcial. O instrumento empregado (figura 11) aplica a tensão U_0 entre os enrolamentos do transformador sob ensaio e mede a corrente de polarização i_{pol} , durante o tempo T_p . Depois, muda-se a posição da chave S para aplicar um curto-circuito durante o qual se monitora a corrente de despolarização i_{despol} . O perfil destas duas correntes é analisado para se obter o teor de umidade.

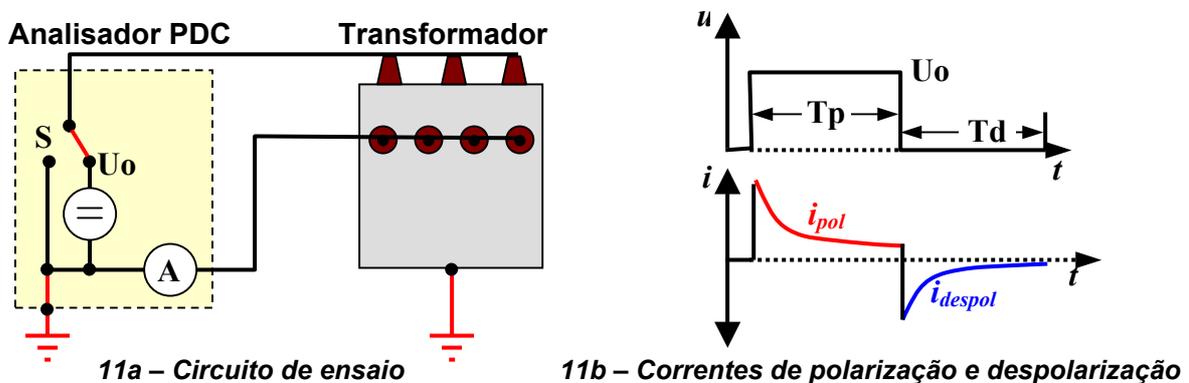


FIGURA 11 – MÉTODO PDC (DESCRIÇÃO NO TEXTO)

A exemplo do método FDS, o método PDC indica também outros parâmetros tais como $\tan \delta$ e espectro de polarização (se a umidade estiver distribuída uniformemente na isolação), bem como o ajuste do teor de umidade em função de parâmetros de projeto dos enrolamentos de AT e BT

(proporção de espaçadores, canais de circulação e barreiras de papelão, com relação ao óleo isolante nessa região).

3.4. Umidade Relativa da Superfície Isolante – URSI

Esta técnica consiste em remover o óleo do transformador e inserir um gás (nitrogênio ou ar seco) para medir a umidade do gás. A medição é feita de forma indireta, eletricamente, por meio de uma ponte, onde um dos braços é um capacitor construído com material cuja capacitância é função da umidade. É necessário aguardar pelo menos 24 horas para que a umidade do gás esteja em equilíbrio com a da superfície da isolação. O ensaio é aplicado na fábrica, após a remoção do óleo isolante e inserção de gás para o transporte dos TFs. O inconveniente é que a umidade obtida com este método não é a da parte mais interna da isolação, devido à lenta difusão da umidade do interior das camadas mais espessas até a superfície em contato com o gás. Nos TFs em operação o processo completo é demorado e oneroso, piorando estes fatores para as potências maiores.

Por estas razões (custo, demora e problemas de interpretação) e, mais recentemente, pelo aparecimento de técnicas como as apresentadas em 3.1, 3.2 e 3.3, o método da URSI está sendo cada vez menos empregado nos TFs.

3.5. Umidade do papel vs umidade do óleo isolante

A literatura (Ref. 6) apresenta gráficos (curvas de Nielsen) para a obtenção do teor de umidade do papel isolante a partir do teor de umidade do óleo isolante. A simples análise, este método precisa apenas da retirada de uma amostra de óleo, registrar a temperatura do ponto de amostragem, obter seu teor de umidade e, a partir das curvas de equilíbrio, obter a umidade do papel isolante. Assim, para um óleo isolante com umidade de 15 ppm, o papel estará com teores de aproximadamente 2 % ou 4 %, para temperaturas da amostra de 60 ou 30 °C, respectivamente, conforme ilustra a figura 12.

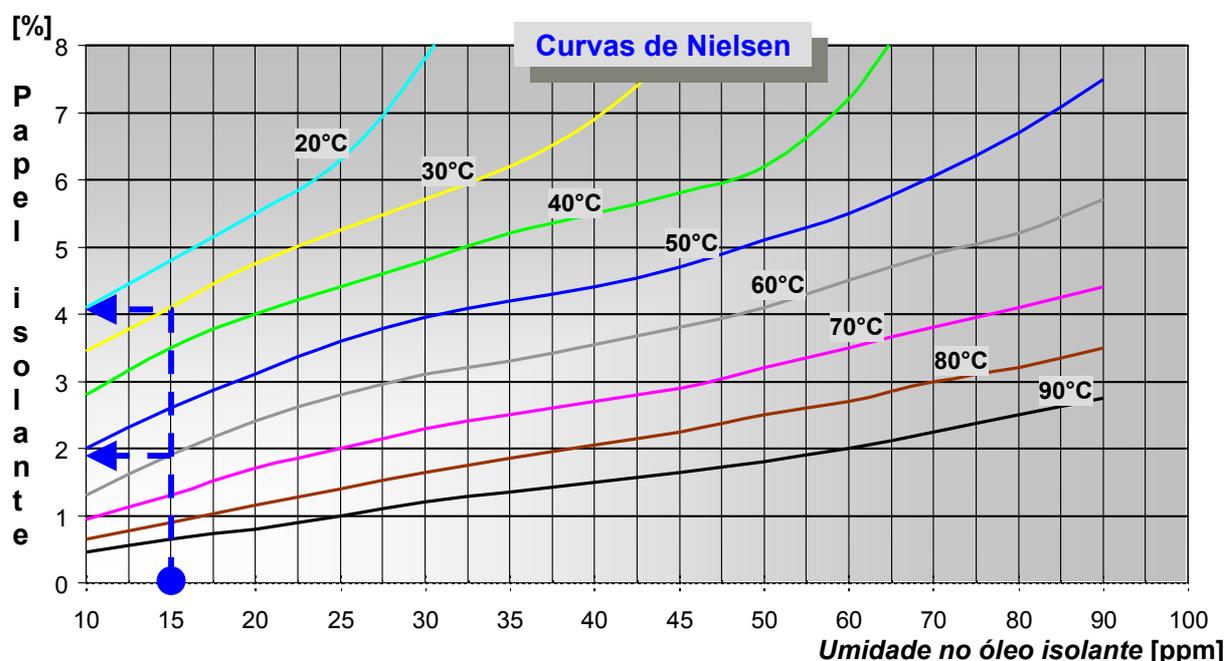


FIGURA 12 – CURVAS DE EQUILÍBRIO DE UMIDADE NO SISTEMA PAPEL-ÓLEO

Vários são os cuidados a serem tomados para que este método seja aplicável. Em operação, a temperatura do transformador é variável e a condição de equilíbrio é demorada, principalmente para

temperaturas baixas, situação em que a difusão de umidade se torna mais lenta (meses), especialmente para os papéis isolantes com maior espessura (papelão). Mesmo para temperaturas da ordem de 70 °C, o tempo para se estabelecer uma condição de equilíbrio papel-óleo é de aproximadamente 4 dias. Com base nisto existem procedimentos específicos para TFs em operação (Ref. 6).

No caso de TDs novos, o fabricante tem condições de viabilizar o método com o auxílio de uma pequena estufa para avaliar o processo de secagem de um determinado protótipo em fabricação. Um dos fornecedores da Copel está incorporando esta técnica.

3.6. Teor de Furfural (2Fal) no óleo isolante

O 2Fal é o mais representativo de uma família de *furfuraldeídos*, compostos encontrados no óleo isolante que resultam da degradação do papel isolante. Seu teor representa o comportamento global, a partir da amostra de uma pequena quantidade de óleo do transformador. Há estudos que correlacionam o GP com o 2Fal de modo que as concessionárias têm dado preferência a este último por não ser invasivo.

Atualmente, o teor de 2Fal é incluído nos diagnósticos de envelhecimento de TFs das principais concessionárias. A Copel emprega este ensaio nos seus TDs submersíveis. Casos de degradação acentuada do papel isolante geram concentrações de 2Fal superiores a 1 mg por kg de papel.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

– Conforme a norma ANSI/IEEE57.91-1995, os dados sobre perda de vida útil de transformadores com isolamento papel-óleo é igual para TDs e TFs. A norma foi baseada em estudos com amostras com teores de umidade $\leq 0,4$ %. Entretanto, em 95 unidades TDs novos (vários fabricantes) testados pelo Lactec o teor médio foi de 2,5 %. Isto eleva a taxa de envelhecimento do transformador (figura 1), que na situação de operação nominal teria uma expectativa de vida de 20,5 anos. É importante notar que a média de vida dos TDs do sistema Copel, adquiridos sem o controle de umidade proposto neste trabalho, é de 14 anos, conforme mostra a referência 7. Esta referência apresenta causas de perda de vida útil relacionadas com a qualidade de outros materiais isolantes aplicados nos TDs. É o caso da qualidade do verniz usado no fio esmaltado do enrolamento de AT destes transformadores, que nem sempre atende a classe térmica de 180 °C, tradicionalmente requerida.

– Nas temperaturas de operação normal de TDs a hidrólise é o fator de degradação que predomina. Assim, o controle do teor de umidade residual nos TDs novos, na fábrica, é fundamental.

– Métodos de secagem otimizados, como os aplicados em TFs podem ser adaptados para a linha de fabricação de TDs, existindo hoje processos alternativos ao uso de estufa simples como termo-vácuo, aquecimento por circulação de corrente, etc. O custo-benefício da opção tem relação com estratégias de mercado.

– É importante especificar um teor de umidade não superior a 1% em TDs novos. Este valor está sendo adotado pela Copel com base em especificações internacionais e no fato de que em TFs atualmente o limite é de 0,5 %, apesar das dificuldades maiores de secagem (espessuras e volumes maiores de papel). A adoção de critérios semelhantes por outras concessionárias estimularia investimentos para aplicação de processos de secagem mais eficientes nos TDs.

– É conveniente definir um ou mais métodos de medição – *RVM*, *FDS* ou *PDC* – para avaliar, por exemplo, um TD de cada projeto construtivo. Outros métodos (item 3.5) são viáveis, em fábrica.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ANSI/IEEE C57.91-1995. “*Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers*”.
- 2 FABRE J.; Pichon A. “Deteriorating Processes and Products of Paper in Oil. Application to Transformers”. CIGRE, Paper 137, Paris, 1960. CEMIG: ED-3.40 - *Estudo de Distribuição - Viabilidade Econômica de Redes Protegidas 15 kV*. Belo Horizonte / MG, dezembro/1998.
- 3 HÖHLEIN e A. J. Kachler. “Aging of Cellulose at Transformer Service Temperatures. Part 2. Influence of Moisture and Temperature on Degree of Polymerization and Formation of Furanic Compounds in Free-Breathing”. IEEE Electrical Insulation Magazine Sep/Oct 2005, Vol. 21, No. 5.
- 4 ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. “Basic Research on Transformer Life Characteristics”, EPRI EL 2622 Final Report, Set 1982.
- 5 GAMBOA, L. A. “Espectro de Polarização em Transformadores de Potência”. XIII SNPTEE, FL, 1995.
- 6 SOKOLOV, V. V.; Vanin, B. V. “In-Service Assessment of Water Content in Power Transformers” Conference of Doble Clients. 1995, Sec. 8-6.
- 7 RAVAGLIO, M.; SCHAEFER, J.; GAMBOA L.; ADONIS N.; VALENÇA, M. “Avaliação da Vida Útil dos Transformadores da COPEL Distribuição. SENDI, Brasília, 2004.