



# **ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA UMIDADE NA POSSIBILIDADE DE FALHAS DE TRANSFORMADORES**

**Victor Sokolov  
José Mak  
Armando Bassetto Filho**

**Julho, 2000**

## 1. INTRODUÇÃO

O interesse das concessionárias de eletricidade em aprofundar os conhecimentos quanto à contaminação de transformadores de potência por umidade tem crescido nos últimos anos por uma série de razões. Pode-se citar as seguintes, dentre as principais:

- **População considerável de transformadores envelhecidos e contaminados com umidade.** A principal consequência desse fato é a incerteza de como carregar o transformador com confiabilidade, sabendo-se o efeito da água na aceleração da taxa de envelhecimento do isolamento sólido [1], a possível redução na rigidez dielétrica com o aumento da porcentagem de saturação da água no óleo [2] e o risco de formação de bolhas em altas temperaturas [3, 4].
- **Incerteza na eficácia dos métodos disponíveis para avaliar a saúde do transformador.** A simples avaliação do teor de água numa amostra de óleo coletada rotineiramente não permite determinar o nível de umidade dos enrolamentos do transformador. Há sempre dúvidas quanto ao estabelecimento de quais transformadores estão mais úmidos, devendo ser secos prioritariamente. Ou mesmo, quais os níveis aceitáveis de teor de água para prevenir falhas e estabelecer as condições admissíveis para o carregamento confiável tanto em regime normal quanto em contingências.

## 2. OBJETIVOS

Os principais objetivos do estudo foram:

- Levantar dados de ensaios de campo para determinação de condições mais propícias para a medição do nível de água do isolamento sólido de transformadores energizados.
- Analisar a influência da umidade na possibilidade de falhas durante contingências envolvendo os transformadores do plano piloto.
- Correlacionar às influências do envelhecimento térmico e por contaminação do transformador.
- Avaliar os principais parâmetros para o desenvolvimento de modelo envolvendo falhas de transformadores em contingências e emitir diagnósticos com base no modelo desenvolvido.

## 3. PREMISSAS BÁSICAS DO LEVANTAMENTO DE CAMPO

A solubilidade da água no óleo aumenta com a elevação da temperatura. Conseqüentemente, aumenta o teor de água no óleo, pois o isolamento sólido,

composto por papel Kraft, passa a liberar água para o óleo visando a atingir o equilíbrio. Dada a maior atração da água pelo papel em detrimento ao óleo, quase que a totalidade da água existente no transformador fica retida no papel. Enquanto o isolamento sólido pode conter dezenas de litros d'água, o óleo possui apenas algumas centenas de mililitros.

Quanto maior for a temperatura do óleo será mais fácil avaliar o teor de água do isolamento sólido, pois o teor de água do óleo tenderá a aumentar, e os erros de dispersão dos dados de campo tenderão a diminuir. Entretanto, é necessário avaliar as condições críticas de campo, pois aumentos bruscos de temperatura podem gerar a formação de bolhas.

A fim de aumentar a temperatura do óleo e causar o aumento de seu teor de água para estudo do teor de umidade do isolamento sólido, investigaram-se duas possibilidades: o fechamento das válvulas inferiores dos radiadores e o isolamento dos radiadores com lona plástica, quando for impraticável o fechamento das válvulas em razão da possibilidade de causar quebra nas válvulas e risco de vazamentos. No segundo caso, os radiadores deveriam ser envolvidos com lona plástica preta.

A lona plástica preta não deveria causar nenhuma alteração no poder de absorção e dissipação de calor do transformador, mas tão-somente impedir o movimento de convecção do óleo através dos radiadores.

Em estudo feito com transformadores de potência e de distribuição, foram considerados os seguintes valores de emissividade [5]:

**Tabela 1** - Valores de Emissividade

| COR              | Preto | Cinza Claro | Alumínio | Branco |
|------------------|-------|-------------|----------|--------|
| Radiação Solar   | 0,97  | 0,73        | 0,4      | 0,14   |
| Radiação Interna | 0,97  | 0,95        | 0,3      | 0,97   |

No transformador operando em carga, ocorre a geração de calor interno em razão das perdas nos enrolamentos e no núcleo, assim como a radiação solar durante o dia. Para análise das trocas de calor, supôs-se que todo calor interno gerado seria transmitido pelo tanque ao exterior. A essa quantidade de calor, somou-se o calor devido à radiação não refletida pelo tanque.

Conforme experiência de Montsinger [6] para transformadores de pequena potência, de tanque liso, 55% do calor interno deveria ser dissipado pela superfície do tanque, por radiação, sendo os 45% restantes dissipados por convecção. Para transformadores de maior potência, com radiadores, ventilação forçada, etc., pôde-se prever que a porcentagem relativa à convecção fosse bem maior, graças à não proporcionalidade entre a potência do transformador e suas dimensões externas.

Na análise feita a seguir, considerou-se o ambiente a 30°C e, todo o tanque do transformador a uma temperatura média constante de 60°C e radiação solar de 1 kW/m<sup>2</sup> [7]. Para cálculo das potências irradiadas foi utilizada a fórmula de Stefan-Boltzman:

$$W_R = k E (T_i^4 - T_0^4) \quad (1)$$

Onde:  $W_R$ : potência irradiada em W/m<sup>2</sup>

k: constante  $0,57 \times 10^{-7}$

$T_i$ : temperatura do tanque 333 K

$T_0$ : temperatura ambiente 303 K

E: emissividade da cor

Tomou-se como referência um transformador de 25 MVA, com as seguintes características:

Fabricante - Transformadores União S.A.

Potência ativa = 25 MW (cos  $\varphi$  = 1)

Perdas internas (0,5%) = 150 kW

Superfície total de irradiação = 80 m<sup>2</sup>

Superfície de insolação considerada = 40 m

Radiação solar incidente = 40 kW/m<sup>2</sup> (1 kW/m<sup>2</sup> x 40 m<sup>2</sup>)

Para pintura cor de alumínio, considerou-se:

Radiação solar absorvida = 0,4 x 40 kW = 16 kW

Potência total a ser dissipada = 150 kW + 16 kW = 166 kW.

Do total a ser dissipado (166 kW), deverão ser irradiados:

$$W_R = 0,57 \times 10^{-7} \times 0,3 (333^4 - 303^4) = 66 \text{ W/m}^2$$

Potência total irradiada = 66 W/m<sup>2</sup> x 80 m<sup>2</sup> = 5300W, que corresponde a 3% do total a ser dissipado. Os restantes 97% deverão ser dissipados por convecção.

Para cor branca:

Radiação solar absorvida = 0,14 x 40 = 6 kW

Potência total dissipada = 150 + 06 = 156kW

Potência irradiada = 214 W/m<sup>2</sup> x 80 m<sup>2</sup> = 17100 W (11% do total).

Para cor cinza claro:

Radiação solar absorvida = 0,73 x 40 = 29 kW

Potência total dissipada = 150 + 29 = 179 kW

Potência irradiada = 209 W/m<sup>2</sup> x 80 m<sup>2</sup> = 16750 W (9% do total).

Para cor preta:

$$\text{Radiação solar absorvida} = 0,97 \times 40 = 39 \text{ kW}$$

$$\text{Potência total dissipada} = 150 + 39 = 189 \text{ kW}$$

$$\text{Potência irradiada} = 212 \text{ W/m}^2 \times 80 \text{ m}^2 = 16930 \text{ W (9\% do total)}.$$

Comparativamente, estudou-se um transformador de 75 kVA:

Fabricante - Toshiba - Iman S.A.

$$\text{Potência ativa} = 64 \text{ kW (cos } \varphi = 0,85)$$

$$\text{Perdas internas} = 1300 \text{ W}$$

$$\text{Superfície total de irradiação} = 2,8 \text{ m}^2 = 185 \text{ W (10\% do total)}.$$

Para pintura cor de alumínio, obteve-se:

$$\text{Radiação solar absorvida} = 0,4 \times 1400 = 560 \text{ W}$$

$$\text{Potência total dissipada} = 1300 + 560 = 1860 \text{ W}$$

$$\text{Potência irradiada} = 66 \text{ W/m}^2 \times 2,8 \text{ m}^2 = 185 \text{ W (10\% do total)}.$$

Para cor branca:

$$\text{Radiação solar absorvida} = 0,14 \times 1400 = 196 \text{ W}$$

$$\text{Potência total dissipada} = 1300 + 196 = 1496 \text{ W}$$

$$\text{Potência irradiada} = 214 \text{ W/m}^2 \times 2,8 \text{ m}^2 = 600 \text{ W (40\% do total)}.$$

Para cor cinza claro:

$$\text{Radiação solar absorvida} = 0,73 \times 1400 = 1022 \text{ W}$$

$$\text{Potência total dissipada} = 1300 + 1022 = 2320 \text{ W}$$

$$\text{Potência irradiada} = 209 \text{ W/m}^2 \times 2,8 \text{ m}^2 = 586 \text{ W (25\% do total)}.$$

Para cor preta:

$$\text{Radiação solar absorvida} = 0,97 \times 1400 = 1358 \text{ W}$$

$$\text{Potência total dissipada} = 1358 + 1300 = 2658 \text{ W}$$

$$\text{Potência irradiada} = 214 \text{ W/m}^2 \times 2,8 \text{ m}^2 = 600 \text{ W (23\% do total)}.$$

Com base nos dados obtidos, concluiu-se que o efeito convectivo torna-se preponderante para transformadores de maior potência, quando o calor a ser dissipado por radiação deve ser bem inferior à quantidade do calor dissipado por convecção. Para o transformador de 25 MVA considerado, o valor irradiado correspondeu 9% do total a ser dissipado tanto para cor cinza claro quanto para cor preta.

#### **4. PROCEDIMENTOS PARA DIAGNÓSTICO DO TEOR DE UMIDADE DOS ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES ENERGIZADOS**

- Retirou-se amostra de óleo isolante (amostra inicial) para ensaios de teor de água, rigidez dielétrica, tensão interfacial e teor de aromáticos e foram anotadas as temperaturas da amostra, do óleo e dos enrolamentos, bem como a corrente de carga em condições normais de operação do transformador.
- Desligou-se o “trip” de temperatura do óleo. Quando o “trip” dos enrolamentos estava regulado para temperaturas inferiores a 120 °C, este também foi desligado. Assim, foi possível garantir a continuidade em operação do transformador. Todas as temperaturas durante o aquecimento do transformador estavam de acordo com a Norma Brasileira NBR 5416/97 "Procedimentos para Carregamento de Transformadores de Potência" [8], que estabelece as temperaturas máximas confiáveis de 105 °C para o óleo e de 140 °C para os enrolamentos.
- Efetuou-se o aquecimento do transformador por meio do fechamento das válvulas inferiores dos radiadores (fechou-se no máximo 90% do curso da válvula). Em caso de necessidade técnica, efetuou-se o encapsulamento dos radiadores com lona plástica e/ou desligamento da ventilação.
- A nova temperatura de operação ficou de 10 a 20 °C acima da curva normal de temperatura em razão das condições encontradas no campo.
- Instalou-se termômetro padrão externo com conversão dos valores por procedimento normalizado para referência e verificação de eventuais desvios dos termômetros instalados no transformador.
- Foram retiradas amostras de óleo isolante (um litro por amostra) para ensaios de teor de água e rigidez dielétrica após ter sido atingido o nível de aquecimento necessário, cerca de quatro horas após a retirada da amostra inicial.
- Repetiu-se a amostragem em intervalos regulares, variando de duas a quatro. O processo completo variou de quatro a 48 horas. Anotaram-se as temperaturas da amostra, do óleo e dos enrolamentos. A corrente de carga foi anotada a cada hora, no período de supervisão por componentes da equipe.
- Durante o aquecimento do transformador, anotaram-se as temperaturas da amostra, do óleo e dos enrolamentos, assim como a corrente de carga.
- Ao final do período de ensaio, retirou-se amostra de óleo isolante para ensaios de teor de água e rigidez dielétrica. Foram anotadas as temperaturas da amostra, do óleo e dos enrolamentos, assim como a corrente de carga.
- Normalizaram-se as condições que foram impostas para aquecimento do transformador (válvulas, encapsulamento e ventiladores).

- Refizeram-se as condições operativas normais do “trip” da temperatura do óleo e dos enrolamentos.

## **5. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS PRINCIPAIS FONTES DE CONTAMINAÇÃO DE ÁGUA**

Há três fontes principais de acúmulo de água no isolamento de transformadores:

- Umidade residual da “estrutura grossa” do isolamento, composta por madeira e papelão isolante.
- Ingresso da atmosfera.
- Envelhecimento da celulose e do óleo.

### **5.1 Umidade Residual**

No processo de fabricação do transformador, teores elevados de umidade (2-4%) podem permanecer em alguns componentes do isolamento sólido, principalmente plásticos, o que pode exigir maior tempo de secagem em relação a materiais celulósicos, como o “pressboard”. Com o tempo, esta umidade pode passar para o óleo e aumentar o teor de água das partes que compõem a “estrutura fina” do isolamento, composta pelas folhas de papel isolante que recobrem os condutores de cobre dos enrolamentos, assim como os calços [9].

### **5.2 Contaminação com Umidade Atmosférica**

A umidade atmosférica é a principal fonte de contaminação do transformador. Três mecanismos agem neste processo: sorção da água em razão da exposição direta do isolamento ao ar; ingresso de umidade no tanque na forma de fluxo molecular graças à diferença de concentração da água na atmosfera e no óleo do tanque do transformador; e o fluxo viscoso do ar úmido no transformador sob ação da diferença da pressão atmosférica e a do interior do tanque [9].

A interpretação analítica desses mecanismos permitiu a Griffin et al. [9] chegarem às seguintes conclusões:

- O fluxo molecular é praticamente desprezível. Este mecanismo pode permitir a entrada de grande quantidade de água somente enquanto o transformador estiver sendo tratado sob vácuo.
- O principal mecanismo de entrada de água é o fluxo viscoso de ar úmido através da “selagem de baixa qualidade” sob ação do gradiente de pressão. Os “pontos sensíveis” são o encabeçamento de buchas, selagem do tubo de explosão, vazamentos no percurso do óleo forçado entre o transformador e seu sistema de resfriamento. Todos esses pontos tendo problemas de selagem podem agir como “bombas de vapor d’água”.

- Quantidades significativas de água “viva” podem ser bombeadas para dentro do transformador num curtíssimo espaço de tempo (algumas horas), quando ocorre queda rápida de pressão (após queda rápida de temperatura) combinada com selagem insuficiente recoberta com água de chuva. Este fenômeno é particularmente perigoso, quando o transformador é armazenado parcialmente preenchido com óleo sem sistema de preservação.
- A taxa de contaminação de transformadores abertos com água é significativa, embora seja limitada.

### **5.3 Decomposição de Materiais Isolantes**

A decomposição da celulose conduz à formação de derivados de furano (furfural), o que está relacionado com a geração de água – três moléculas de água por átomo elementar. Entretanto, a quantificação desse processo requer estudo especial, pois as descobertas de diferentes autores divergem significativamente.

## **6. DISTRIBUIÇÃO DA UMIDADE NA ESTRUTURA DO ISOLAMENTO**

Os componentes do sistema isolante sólido-líquido de transformadores podem ser divididos em três grupos [9]:

- 1) **“Estrutura grossa”** compreende cerca de 50% da massa total do isolamento sólido, porém tem muito pouca contribuição na migração da umidade em razão da elevada constante de tempo (alguns anos) do processo de difusão.
- 2) **“Estrutura fina fria”**, que opera na temperatura do óleo: cilindros isolantes de “pressboard”, cartolas, etc. Estes componentes representam de 20 a 30% da massa total. São os principais locais de armazenamento de água. A força motriz de migração de umidade é a diferença de concentração de água na fronteira entre o óleo e o isolamento sólido.
- 3) **“Estrutura fina quente”**, que opera à temperatura próxima à do condutor (isolamento das espiras). Cerca de 5% da sua massa está a temperaturas elevadas, isto é, os chamados pontos quentes. Aí pode haver três forças motrizes de umidade: gradiente de concentração de água, gradiente de temperatura e gradiente de pressão de vapor (vapor + gás).

A experiência tem demonstrado que a maior parte da umidade fica armazenada nos componentes do segundo grupo. Cerca de 10% em massa desse grupo (a parte mais fria) forma certas zonas “frias” com teor de entre 1-1,5% acima da média. Os componentes desse grupo são a fonte principal da contaminação do óleo a temperaturas elevadas, quando a concentração de umidade nas camadas superficiais de celulose torna-se maior que aquela do óleo adjacente.

O teor de umidade nos componentes do terceiro grupo é muito menor do que o do segundo, embora seu efeito danoso possa ser maior na ocorrência de temperaturas maiores.

## 7. EQUILÍBRIO DE UMIDADE

Há duas formas de vapores de sorção e gases nas substâncias e meios [9]:

*Absorção – quando moléculas de gás (vapor) tornam-se parte da substância;*

*Adsorção – a adesão de moléculas de vapor de gás na superfície de corpos sólidos ou líquidos.*

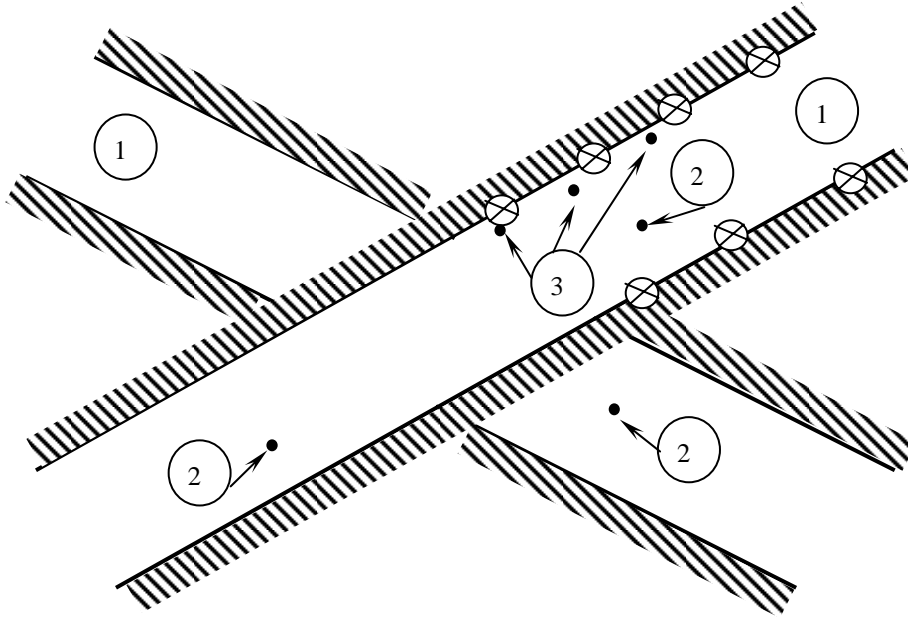
Moléculas adsorvidas ainda são moléculas de gás (vapor), porém com movimento limitado. Elas se constituem em gás bidimensional no corpo do adsorvente em constante movimento em sua superfície. De tempo em tempo, há moléculas que se libertam e se tornam novamente parte de gás tridimensional constituindo o meio adsorvato, novo com moléculas livres tomando seu lugar, sendo, portanto o equilíbrio da adsorção dinâmico por natureza. O equilíbrio praticamente não ocorre.

## 8. ADSORÇÃO DE VAPOR D'ÁGUA EM MATERIAL CELULÓSICO

Este caso de adsorção tem características específicas por causa da porosidade do material e da presença de grupos polares na atração e adsorção das moléculas de água. Os grupos polares tornam a celulose muito ativa na atração e adsorção de moléculas de água. O processo de adsorção é praticamente instantâneo em qualquer lugar atingido pelo vapor, mas o processo da difusão do próprio vapor é retardado por causa do avanço lento das moléculas de água através do labirinto dos microcapilares. Portanto dificilmente se obtém o equilíbrio geral. A dessorção é o processo ainda mais lento, pois requer certa energia de ativação, ao passo que a adsorção é seguida pela evolução de certa energia.

A água de sorção é de característica dinâmica: as moléculas de água adsorvidas são mantidas em intenso movimento em torno de centros ativos das moléculas de celulose (grupos -OH nos anéis de glicose) adquirindo energia cinética suficiente, liberam-se e seu lugar é logo ocupado por outra molécula de água. O processo é mostrado na figura 1.

O equilíbrio dinâmico compreende intercâmbio constante de moléculas de vapor entre água livre e sítios ativos e, sobretudo entre sítios ativos adjacentes, de modo que praticamente nenhuma molécula fique livre. O primeiro mecanismo ocorre basicamente, quando o teor de umidade  $W < W_0$ , onde  $W_0$  é teor de umidade condicional igual ao valor imaginário, quando todos os sítios ativos estariam ocupados por uma molécula adsorvida (é a chamada “camada monomolecular” ou “monocamada”). O segundo mecanismo dá-se, quando o teor de umidade  $W > W_0$ . Moléculas de água (e gases) transitam entre microcapilares e macrocapilares preenchidos com óleo independentemente (fluxo molecular). A difusão leva ao crescimento exponencial da água adsorvida ao equilíbrio. A temperatura acelera o processo [9].



**FIGURA 1** – Adsorção de moléculas de vapor d’água em sítios ativos de material celulósico em microcapilares:

- (1) - Microcapilares;
- (2) - Moléculas de água livre;
- ⊗ - Sítios ativos nas fronteiras capilares;
- (3) - Moléculas de gás adsorvidas nos sítios ativos.

## 9. EQUAÇÃO DE SORÇÃO

A isoterma de sorção pode ser expressa pela seguinte equação, conhecida da física molecular:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{K \cdot \varphi}{(1 - \varphi) \cdot (1 - \varphi + K \cdot \varphi)} = Y = \frac{K \cdot x}{(1 - x) \cdot (1 - x - Kx)} \quad (2)$$

Onde  $Y=W/W_0$  – número de “monocamadas” condicionais adsorvidas  
 $X=\varphi=P/P_s$  – umidade relativa;

**P** – pressão de vapor;

**P<sub>s</sub>** – pressão de vapor na saturação;

**K** – função da temperatura representando a taxa de probabilidades para uma molécula escapar: superfície de água livre e um sítio ativo do material adsorvido.

Há duas aproximações da equação (2) muito usadas em engenharia de sistemas de potência [9]: a de Piper e a de Fessler [10], que se baseiam na aproximação de Freundlich's  $W = A p,^\alpha$  onde A é função da temperatura. As expressões são as seguintes:

$$\text{Piper - } W=[P \exp. (-21.92 + 6850/T)]^{0.75} \quad (3)$$

$$\text{Fessler- } W=2.173 \times 10^{-7} \times P^{0.6685} \times \exp. (4725.6/T) \quad (4)$$

Onde P, mm Hg – pressão de vapor;

W, % - teor de água;

T, K – temperatura termodinâmica.

Ambas as expressões subestimam o teor de umidade em concentrações baixas e superestimam-no em concentrações até 10%. A equação (2) apresenta maior concordância com dados experimentais.

Na tabela 2, pode-se observar estimativas comparativas dos parâmetros de equilíbrio tanto usando as equações (2, 3 e 4) quanto dados experimentais [9]. Pode-se notar que todos os resultados estão bastante próximos quanto a teores de água mais baixos (cerca de 2 a 4%) e bastante diferentes para valores mais elevados.

**Tabela 2** - Estimativa Comparativa de Parâmetros de Equilíbrio: Papel Kraft, 70 °C

| Umidade no Papel, % | Parâmetros | Equação Empírica |         | Experimentos |             | Teórico (2)** |
|---------------------|------------|------------------|---------|--------------|-------------|---------------|
|                     |            | Piper            | Fessler | Oommen [11]* | Sokolov [9] |               |
| 1                   | P mm HG    | 7                | 8.1     | 9.3          | 8           | 8             |
|                     | φ, %       | 3.0              | 3.4     | 4            | 3.46        | 3.42          |
| 2                   | P mm HG    | 17.7             | 22.2    | 28           | 20          | 20            |
|                     | φ, %       | 7.5              | 9.5     | 12           | 8.5         | 8.5           |
| 3                   | P mm HG    | 30.4             | 40      | 56           | 46.7        | 49            |
|                     | φ, %       | 13               | 17.1    | 24           | 20          | 21            |
| 4                   | P mm HG    | 44.7             | 60.7    | 88.8         | 70.1        | 58.4          |
|                     | φ, %       | 19.1             | 25.9    | 38           | 30          | 25            |

\* Sorção pela polpa de madeira

\*\* teor de água de 4% em monocamada

## 10. SOLUBILIDADE DA ÁGUA NO ÓLEO. EQUILÍBRIO NO SISTEMA “CELULOSE – ÓLEO”

O óleo é o meio de transferência de água no transformador. A água está presente no óleo de forma solúvel, bem como na forma hidratada sendo absorvida por produtos polares de envelhecimento. As partículas de fibra no óleo também contêm certa quantidade de água. O teor de água do óleo é diretamente proporcional à concentração relativa de (saturação relativa) até o ponto de saturação [12]. A relação de saturação da água - temperatura [ $W_s - T$ ] é expressa pela fórmula

$$W_s = W_0 \exp. (- B / T)$$

Onde  $W_0$  e  $B$  são constantes, normalmente diferentes para óleos distintos, sobretudo graças a diferenças no teor de aromáticos. Alguns dados sobre as constantes de solubilidade estimadas e teor saturado de água são apresentados na tabela 3.

**Tabela 3** - Constantes de Solubilidade Estimadas e Teor Saturado de Água [9]

| Óleos | Aromáticos<br>$C_A$ , % | $W_0$               | B    | Solubilidade, PPM |       |       |
|-------|-------------------------|---------------------|------|-------------------|-------|-------|
|       |                         |                     |      | 20 °C             | 40 °C | 70 °C |
| 1     | 5                       | $16.97 \cdot 10^6$  | 3777 | 42.8              | 97.5  | 279   |
| 2     | 8                       | $23.08 \cdot 10^6$  | 3841 | 46.8              | 108   | 316   |
| 3     | 16                      | $22.76 \cdot 10^6$  | 3783 | 56.2              | 128.3 | 369.2 |
| 4     | 21                      | $13.16 \cdot 10^6$  | 3538 | 75                | 162   | 436   |
| 5     | Silicone                | $1.9525 \cdot 10^6$ | 2733 | 174               | 314.7 | 675.4 |

O surgimento de produtos polares de envelhecimento aumenta a solubilidade da água. A resposta ao envelhecimento de diferentes óleos é distinta. De acordo com dados disponíveis, a “água total” no óleo envelhecido é duas vezes maior que a água dissolvida. A temperaturas elevadas, certa quantidade de água “hidratada” pode ser transferida para água dissolvida.

## 11. MIGRAÇÃO DA ÁGUA SOB INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE UMIDADE E TEMPERATURA. POTENCIAL DE “UMIDADE”

Em geral, há três forças motrizes para ativar a transferência de água: o gradiente de concentração de umidade, o gradiente de temperatura e o gradiente de pressão.

O mecanismo de transferência de água através de microcapilares e através do óleo em macrocapilares, compreendendo todas as três forças motrizes, é o movimento molecular, que é regido por lei similar à lei de Ohm para a corrente elétrica, onde o “potencial de transferência de umidade” [9]:

$$\varphi_w = \frac{P}{\sqrt{T}} \quad (5)$$

O “**potencial de umidade**” desempenha papel análogo ao do potencial elétrico. Uma mudança da pressão de vapor P ou da temperatura T significa o advento do potencial de transferência de umidade e movimento de umidade. Diante da equação (5), a segunda lei de Flick pode ser apresentada de forma essencialmente simplificada. Para casos unidimensionais importantes praticamente, ela fica:

$$\frac{\lambda}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 \varphi_w}{\partial x^2} = \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (6)$$

Onde:  $\lambda$ -condutividade de umidade de um material que é sua qualidade específica e não depende nem da concentração de umidade  $\omega$  nem da temperatura; assim o ensaio em apenas uma temperatura escolhida é necessário para determinar  $\lambda$ ;  $\rho$ -densidade do material.

A difusão de um material (seu coeficiente de difusão D) pode ser apresentado (usando a equação 2) como:

$$D = \frac{\lambda}{\rho \sqrt{T}} \cdot \frac{\partial P}{\partial \omega} \quad (7)$$

## 12. MIGRAÇÃO DA UMIDADE NO ISOLAMENTO PRINCIPAL DE TRANSFORMADORES

O óleo é um meio de transferência. O aumento da temperatura do óleo conduz à redução da saturação relativa e ao aparecimento da diferença da concentração de água na superfície do óleo – isolamento. Dessa forma, o gradiente de umidade no “pressboard” está em contradição com o gradiente de temperatura. Este fenômeno relaxa os processos de transferência de umidade, isto é, tanto o de sorção quanto o de desorção. A irregular distribuição da água pelas camadas com elevada concentração na vizinhança das camadas superficiais contrabalança de certa forma o obstáculo mencionado à sorção [9].

É viável usar valor constante para a Difusão **D**. Assim a quantidade de água adsorvida pode ser estimada razoavelmente usando a segunda lei de Flick [13]

$$\Delta W_a \cong (W_e - W_o) \cdot \left\{ 1 - F(Z) \right\}, \%$$

Onde **W<sub>e</sub>** e **W<sub>o</sub>** – teor de água no equilíbrio e residual; **Z** – parâmetro de difusão.

$$Z = D \cdot t / d^2 \quad (8)$$

**D** – difusão, m<sup>2</sup>/s

**d** – espessura do isolamento, m

A função de difusão  $F(z)$  tem forma de série. O processo pode ser quantificado por meio da soma dos expoentes, havendo o número das constantes de tempo. Entretanto, se o teor de água a ser alcançado ( $W$ ) for elevado o suficiente ( $W/W_e > 0.5$ ), a função pode ser simplificada a um expoente com constante.

$$T = d^2/\pi^2 D \quad (9)$$

Esta equação pode ser usada para estimativa do processo. Da mesma forma, pode-se determinar a quantidade dessorvida:

$$\Delta W_d \cong (W - W_e) \cdot \{1 - F(z)\}, \% \quad (10)$$

As equações (7) e (10) subestimam e superestimam respectivamente a quantidade de água adsorvida e dessorvida no sistema “óleo –celulose”, uma vez que a concentração de umidade e o valor de  $W_e$  estão diminuindo (pela sorção) e aumentando (pela dessorção).

O coeficiente de difusão  $D$  depende da estrutura da celulose, temperatura e teor de água. Há várias equações empíricas, porém apenas um valor convencional pode ser usado para aplicação prática. Griffin et al. [9] utilizam a seguinte simplificação:

$D = 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$  para estimativa da contaminação de água do isolamento diretamente a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  para estimativa da contaminação com água do isolamento diretamente exposto ao ar (instalação e reparos).

$D = 2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  para estimativa do processo de migração da água em transformadores em operação. Os valores de  $D$  dobram com o aumento da temperatura a cada  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

O tempo para atingir o equilíbrio da água pode ser estimado aproximadamente (com subestimação) ao empregar a equação (8) (interpretação do processo por meio do primeiro expoente).

Assumindo  $D = 8 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$  a ( $\approx 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e  $d = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , tem-se

$$T_o = \frac{9 \cdot 10^{-6}}{\pi^2 \cdot 8 \cdot 10^{-14}} \cong 132 \text{ days.}$$
 Se for tomado um “pressboard” mais fino:  $d = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

e  $D = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$  ( $\approx 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ), a constante de tempo pode ser reduzida a  $\approx 7.3$  dias.

No sistema fechado de um transformador, pode-se considerar apenas aproximando do equilíbrio e o estabelecimento de certo estado estacionário. Para ativar a dessorção da umidade no óleo, a concentração de água de equilíbrio na superfície ( $W_e$ ) deve ser essencialmente menor que o questionável ( $W$ ).

### **13. MIGRAÇÃO DA UMIDADE E DISTRIBUIÇÃO ESTACIONÁRIA DA UMIDADE NO ISOLAMENTO DE ESPIRAS E BOBINAS DOS ENROLAMENTOS SOB INFLUÊNCIA DO CAMPO DE TEMPERATURA**

Os gradientes de umidade e temperatura coincidem com o isolamento do condutor. O isolamento de celulose de espiras e bobinas pode ser representado como uma parede separando o cobre da bobina do óleo externo. Há queda de temperatura através dessa parede num transformador carregado, o que resulta em queda do potencial de umidade no isolamento com distribuição inicialmente uniforme do teor de água nas camadas da parede. Daí começará a migração das moléculas de água das camadas mais internas para as mais externas até nivelar o potencial de umidade em todas as camadas. Este fenômeno resultará numa distribuição não-uniforme da água nas camadas.

Por meio da equação (2) é possível encontrar esta distribuição para uma dada queda de temperatura, teor de umidade inicial e temperatura máxima [9].

### **14. MECANISMO E CRITÉRIOS DE EVOLUÇÃO DE BOLHAS**

A água passa através de microcapilares, quando o teor de água, a temperatura e a pressão de vapor são suficientemente baixos. A elevação rápida de temperatura causa evaporação rápida da água absorvida e é seguida pelo aumento rápido da pressão de vapor nas camadas mais internas. Isto pode se tornar grande o suficiente para pressionar o óleo para fora dos macrocapilares do isolamento. Tal fenômeno pode mudar o mecanismo do movimento da água de fluxo molecular para fluxo viscoso através de macrocapilares e resultar em dois efeitos perigosos [9]:

- O surgimento de cavidades preenchidas de vapor na superfície do isolamento (as chamadas bolhas).
- Desimpregnação parcial ou total do isolamento de espiras

Os macroporos no isolamento são capilares chatos entre fibras adjacentes de celulose. A condição para pressionar o óleo para fora é:

$$P \geq 2 \sigma / d \quad (11)$$

Onde  $\sigma$  - tensão interfacial entre o óleo e a inclusão do vapor no capilar chato,  
 $d$  – interstício capilar.

Portanto, a condição para evolução de bolha depende não apenas da temperatura e do teor de água, como também da estrutura da celulose e da qualidade do óleo.

### **15. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE UMIDADE NOS ENROLAMENTOS**

Na tabela 4 estão resumidos todos os principais dados obtidos para os óleos dos transformadores estudados, incluindo o cálculo do teor de água nos

enrolamentos baseado na equação (4). Na tabela 5, são apresentados em ordem decrescente os teores de água dos enrolamentos para os diferentes tipos de sistemas de preservação de óleo (bolsa, membrana e sílica).

A partir dos dados da tabela 4, foram feitas comparações entre os sistemas selados com bolsa ou membrana e o sistema de sílica (figuras 2-6). Na figura 2, pode-se observar o teor de umidade dos enrolamentos em relação à idade dos transformadores. Embora a figura mostre grande dispersão dos dados, foram feitas curvas para ilustrar as tendências do aumento do teor de umidade para os sistemas de bolsa/membrana e sílica. Vale ressaltar que a dispersão dos dados para os transformadores com o sistema bolsa/membrana foi tão significativa que a curva obtida é quase paralela ao eixo horizontal, referente à idade. Isto reforça o aspecto meramente ilustrativo da curva.

Do total de transformadores estudados, cerca de 67% está com altos teores de umidade nos enrolamentos entre 2% e 4%. Em torno de 60% dos transformadores com membrana ou bolsa estão com teores de umidade nos enrolamentos entre 2 e 4%, sendo que a idade da maioria desses equipamentos é inferior a 25 anos. Em torno de 75% dos transformadores com sílica estão com teores de umidade nos enrolamentos entre 2 e 4%, e a idade da maioria é acima de 25 anos. Dentre os transformadores com sílica, duas unidades estão com mais de 4%: GUA-3/TR2, com 5,87% e ANR/TR2, com 4,18% (tabela 5).

Em razão da grande dispersão de dados e de altos teores de umidade dos enrolamentos dos transformadores com bolsa/membrana, apesar de mais novos em comparação com os de sílica, pode-se afirmar que, em geral, o desempenho desse sistema não foi melhor que o do sistema com sílica na base de dados estudada.

A figura 3 apresenta a comparação entre teor de umidade dos enrolamentos e teor de água do óleo. Embora também tenha ocorrido grande dispersão de dados neste caso, é possível notar que os sistemas de preservação bolsa/membrana e sílica apresentaram curvas médias muito próximas entre si. Os dados da figura reforçam que o teor de água no óleo só se torna indicador efetivo quanto ao teor de umidade dos enrolamentos, quando avaliados juntamente às temperaturas do óleo, como se fez no procedimento de campo.

Na figura 4, pode-se observar a comparação entre teor de umidade dos enrolamentos e rigidez dielétrica do óleo. Mais uma vez nota-se grande dispersão dos dados, porém a rigidez dielétrica reduz-se à medida que aumenta o teor de água dos enrolamentos. Na comparação entre teor de água e rigidez dielétrica do óleo (figura 5), a dispersão dos dados é menor, pois estão sendo comparadas duas grandezas no mesmo tipo de material. Em ambas as figuras, as curvas médias dos dois tipos de sistema de preservação são bastante próximas entre si.

A comparação entre teor de água do óleo e idade dos transformadores (figura 6) apresenta tendência para os sistemas bolsa/membrana e sílica comparáveis às observadas na figura 2.

**Tabela 4 – Relação Alfabética sobre Características dos Transformadores com Sistemas de Preservação de Bolsa, Membrana e Sílica**

| <b>TRANSFORMADORES COM BOLSA</b>    |       |                             |                |              |                |        |                        |                    |              |        |       |            |                  |            |
|-------------------------------------|-------|-----------------------------|----------------|--------------|----------------|--------|------------------------|--------------------|--------------|--------|-------|------------|------------------|------------|
| SE                                  | Trafo | Tipo de Conservação de óleo | Ano Fabricação | Idade (anos) | Potência (MVA) | Tensão | Umidade do Enrolamento | Teor de água (ppm) | Rigidez (kV) | data   | hora  | Fabricante | Tipo             | Nº Série   |
| ANR                                 | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 74             | 26           | 18,75          | 138    | 2,37                   | 12                 | 91,0         | 29/mar | 13:00 | BBC        | TD3LF            | SP-4.265   |
| ARR-2                               | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 78             | 22           | 18,75          | 138    | 2,44                   | 17                 | 85           | 21/fev | 12:00 | TUSA       | TLTR-15000 /1388 | 8.099      |
| ARR-2                               | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 75             | 25           | 18,75          | 138    | 3,26                   | 24                 | 30           | 21/fev | 12:00 | ASEA       | TMY-33           | 55.884     |
| ARU                                 | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 79             | 21           | 18,75          | 138    | 1,65                   | 11                 | 86           | 17/mar | 09:00 | TUSA       | TLLN-7251/138B   | 500.537    |
| ARU                                 | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 82             | 18           | 18,75          | 138    | 1,09                   | 7                  | 88           | 17/mar | 09:00 | TUSA       | TLLN-7251/138B   | 500.974    |
| FRM                                 | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 78             | 22           | 18,75          | 138    | 1,58                   | 7                  | 70           | 15/mar | 09:00 | TUSA       | TLTR-15000/1388  | 8.097      |
| FRM                                 | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 78             | 22           | 18,75          | 138    | 2,11                   | 12                 | 84           | 15/mar | 09:00 | TUSA       | TLTR-15000/1388  | 8.096      |
| GUA-1                               | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 81             | 19           | 30             | 138    | 2,48                   | 18                 | 85           | 13/mar | 08:30 | TRAFO      | TUC-25-30/138/15 | 48.976     |
| GUA-2                               | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 94             | 6            | 33             | 138    | 2,63                   | 14                 | 70           | 14/mar | 08:00 | TRAFO      | TUC23/33,3       | KA0984A002 |
| GUA-2                               | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 93             | 7            | 33             | 138    | 2,05                   | 10                 | 79           | 14/mar | 08:00 | TRAFO      | TUC-25/33,3      | KA768A001  |
| ITH-1                               | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 95             | 5            | 33             | 138    | 1,67                   | 9                  | 85           | 17/mar | 09:00 | TRAFO      | TUC25/33,3       | KA1165A001 |
| ITH-1                               | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 87             | 13           | 30             | 138    | 2,65                   | 23                 | 56           | 17/mar | 09:00 | ASEA       | TMY-33           | 58.501     |
| LAP                                 | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 80             | 20           | 18,75          | 138    | 2,35                   | 18                 | 64           | 24/fev | 09:00 | TOSHIBA    |                  | 59.847     |
| LAP                                 | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 80             | 20           | 18,75          | 138    | 3,81                   | 12                 | 90           | 25/fev | 16:00 | TOSHIBA    |                  | 60.392     |
| LEM                                 | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 79             | 21           | 18,75          | 138    | 2,36                   | 13                 | 89           | 22/jan | 14:00 | ASEA       | TMY-33           | 57.561     |
| LEM                                 | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 79             | 21           | 18,75          | 138    | 2,87                   | 18                 | 48           | 22/fev | 14:00 | ASEA       | TMY-33           | 57.562     |
| LIM-2                               | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 75             | 25           | 18,75          | 138    | 1,16                   | 9                  | 89           | 28/fev | 08:00 | ASEA       | TMY-33           | 55.882     |
| LIM-4                               | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 82             | 18           | 30             | 138    | 0,9                    | 8                  | 90           | 24/fev | 09:00 | BBC        | TD3LF            | 15.304     |
| LIM-4                               | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 81             | 19           | 18,75          | 138    | 2,17                   | 11                 | 92           | 24/fev | 09:00 | ASEA       | TMY-33           | 58.500     |
| MOG-2                               | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 79             | 21           | 18,75          | 138    | 3,55                   | 31                 | 33           | 14/fev | 09:00 | ASEA       | TMY-33           | 57.735     |
| PSS-1                               | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 76             | 24           | 18,75          | 138    | 2,6                    | 10                 | 89           | 29/fev | 09:00 | TUSA       | TLTR-15.000/1388 | 8.070      |
| VGS                                 | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 76             | 24           | 18,75          | 138    | 1,81                   | 11                 | 99           | 03/mar | 10:00 | TUSA       | TLTR-15.000/1388 | 8.074      |
| <b>TRANSFORMADORES COM MEMBRANA</b> |       |                             |                |              |                |        |                        |                    |              |        |       |            |                  |            |
| ATI                                 | TR-1  | Membrana e sílica           | 76             | 24           | 30             | 138    | 1,51                   | 8                  | 86           | 09/mar | 09:30 | TUSA       | KLRM-1545T/138   | 500.373    |
| ATI                                 | TR-2  | Membrana e sílica           | 71             | 29           | 30             | 138    | 1,78                   | 19                 | 56           | 09/mar | 09:50 | TUSA       | KLRM-1545T/138   | 500.372    |

### TRANSFORMADORES COM BOLSA

| SE    | Trafo | Tipo de Conservação de óleo | Ano Fabricação | Idade (anos) | Potência (MVA) | Tensão | Umidade do Enrolamento | Teor de água (ppm) | Rigidez (kV) | data   | hora  | Fabricante | Tipo                | Nº Série   |
|-------|-------|-----------------------------|----------------|--------------|----------------|--------|------------------------|--------------------|--------------|--------|-------|------------|---------------------|------------|
| RIC-3 | TR-1  | Membrana e sílica           | 92             | 8            | 33             | 138    | 2,73                   | 19                 | 38           | 09/fev | 08:25 | TRAFO      | TUC-25/33,3-145/15R | KA0629A001 |

### TRANSFORMADORES COM SÍCA

|       |      |            |    |    |       |     |      |    |    |        |       |         |                    |           |
|-------|------|------------|----|----|-------|-----|------|----|----|--------|-------|---------|--------------------|-----------|
| ANG   | TR-1 | Sílica gel | 65 | 35 | 10    | 138 | 2,2  | 15 | 64 | 28/fev | 14:00 | ASEA    | TOT-6509           | 20.238    |
| ANG   | TR-2 | Sílica gel | 65 | 35 | 10    | 138 | 2,65 | 19 | 76 | 28/fev | 10:00 | ASEA    | TOT-6509           | 11.681    |
| ANR   | TR-2 | Sílica gel | 70 | 30 | 18,75 | 138 | 4,18 | 26 | 36 | 28/mar | 13:00 | ITEL    | PTOE               | 17.480    |
| BER-1 | TR-1 | Sílica gel | 56 | 44 | 10    | 138 | 2,76 | 20 | 56 | 16/mar | 08:00 | GE      | OA/FA-T            | B51684    |
| BER-1 | TR-2 | Sílica gel | 68 | 32 | 12,5  | 138 | 3,48 | 25 | 38 | 16/mar | 08:00 | AEG     | TLRF-10000/138     | 8.018     |
| BJP   | TR-1 | Sílica gel | 72 | 28 | 18,75 | 138 | 3,2  | 13 | 79 | 13/mar | 09:00 | AEG     | TLR-15000S138      | 8038      |
| CAJ   | TR-1 | Sílica gel | 72 | 28 | 12,5  | 138 | 3,4  | 22 | 56 | 09/mar | 09:00 | ITEL    | PTOE               | 20.174    |
| CON   | TR-1 | Sílica gel | 68 | 32 | 7,5   | 88  | 2,53 | 24 | 56 | 21/fev | 08:00 | AEG     | TLR-7500/92        | 8.016     |
| CON   | TR-2 | Sílica gel | 68 | 32 | 7,5   | 88  | 3,51 | 50 | 28 | 21/fev | 08:00 | AEG     | TLR-7500/92        | 8.015     |
| GUA-1 | TR-1 | Sílica gel | 80 | 20 | 30    | 138 | 1,5  | 9  | 87 | 13/mar | 09:00 | ASEA    | TMY-33             | 57.558    |
| GUA-3 | TR-1 | Sílica gel | 76 | 24 | 18,75 | 138 | 1,99 | 15 | 54 | 15/mar | 08:00 | TUSA    | TLRF-10000/138     | 8.071     |
| GUA-3 | TR-2 | Sílica gel | 75 | 25 | 18,75 | 138 | 5,87 | 65 | 18 | 15/mar | 08:00 | ASEA    | TMY-33             | 55.887    |
| JAR   | TR-1 | Sílica gel | 87 | 13 | 12,5  | 138 | 1,71 | 14 | 74 | 10/mar | 09:00 | TRAFO   | TUC-10/12,5/145/15 | 64.717-G  |
| JUQ   | TR-1 | Sílica gel | 72 | 28 | 12,5  | 138 | 2,83 | 17 | 56 | 10/mar | 08:00 | SIEMENS | KLHM 1354/138      | 500.138   |
| PAF   | TR-1 | Sílica gel | 69 | 31 | 10    | 69  | 3,07 | 15 | 86 | 31/mar | 08:00 | COEMSA  | TOFF-10/695        | 30.568    |
| PAF   | TR-2 | Sílica gel | 69 | 31 | 12,5  | 69  | 3,07 | 31 | 56 | 30/mar | 09:00 | BBC     | TYA                | SPT-1.845 |
| PIP   | TR-1 | Sílica gel | 75 | 25 | 18,75 | 138 | 3,88 | 23 | 49 | 27/mar | 13:00 | ASEA    | TMY-33             | 55.888    |
| PIP   | TR-2 | Sílica gel | 77 | 23 | 18,75 | 138 | 2,52 | 14 | 84 | 27/mar | 13:00 | ASEA    | TMY-33             | 56.487    |
| PSS-1 | TR-2 | Sílica gel | 71 | 29 | 18,75 | 138 | 2,92 | 32 | 20 | 29/fev | 09:00 | ITEL    | PTOE               | 17.483    |
| SFS   | TR-1 | Sílica gel | 56 | 44 | 12,5  | 69  | 1,58 | 10 | 83 | 29/mar | 11:00 | GE      | OA/FA-T            | B-54.840  |
| SFS   | TR-2 | Sílica gel | 56 | 44 | 12,5  | 69  | 3,88 | 46 | 31 | 29/mar | 15:00 | GE      | OA/FA-T            | B-54.839  |
| SIS   | TR-1 | Sílica gel | 74 | 26 | 12,5  | 88  | 2,82 | 17 | 76 | 16/mar | 09:00 | GE      | LN / LVF           | 5.100.594 |
| SIS   | TR-2 | Sílica gel | 74 | 26 | 12,5  | 88  | 2,51 | 12 | 85 | 16/mar | 09:00 | GE      | LN / LVF           | 5.100.595 |
| SJB-1 | TR-1 | Sílica gel | 71 | 29 | 18,75 | 138 | 3,9  | 24 | 38 | 16/fev | 09:00 | ITEL    | PTOE               | 17.482    |
| SJB-1 | TR-2 | Sílica gel | 70 | 30 | 18,75 | 138 | 3,74 | 28 | 29 | 16/fev | 09:00 | ITEL    | PTOE               | 17.481    |
| TAM   | TR-1 | Sílica gel | 65 | 35 | 10    | 138 | 3,13 | 25 | 48 | 01/mar | 10:00 | GE      | TR-92              | 5.100.224 |

| <b>TRANSFORMADORES COM SÍLICA</b> |       |                             |                |              |                |        |                        |                    |              |        |       |            |                  |           |
|-----------------------------------|-------|-----------------------------|----------------|--------------|----------------|--------|------------------------|--------------------|--------------|--------|-------|------------|------------------|-----------|
| SE                                | Trafo | Tipo de Conservação de óleo | Ano Fabricação | Idade (anos) | Potência (MVA) | Tensão | Umidade do Enrolamento | Teor de água (ppm) | Rigidez (kV) | data   | hora  | Fabricante | Tipo             | Nº Série  |
| TAM                               | TR-2  | Sílica gel                  | 57             | 43           | 10             | 138    | 1,54                   | 13                 | 74           | 01/mar | 10:00 | BBC        | T8000/1326       | 2.041     |
| TAT-1                             | TR-1  | Sílica gel                  | 68             | 32           | 9              | 88     | 2,96                   | 31                 | 28           | 22/fev | 17:00 | AEG        | TLR7500-92       | 8.017     |
| TAT-1                             | TR-2  | Sílica gel                  | 71             | 29           | 9              | 88     | 3,67                   | 34                 | 59           | 22/fev | 13:00 | GE         | TR-92            | 5.100.462 |
| UBA-1                             | TR-1  | Sílica gel                  | 85             | 15           | 18,75          | 138    | 1,41                   | 8                  | 90           | 21/mar | 09:00 | BBC        | TD3LF            | 4.263     |
| UBA-1                             | TR-2  | Sílica gel                  | 96             | 4            | 30             | 138    | 1,29                   | 5                  | 89           | 21/mar | 09:00 | SIEMENS    | TLSN-7752        | 305.088   |
| UBA-2                             | TR-1  | Sílica gel                  | 79             | 21           | 18,75          | 138    | 3,38                   | 20                 | 58           | 22/mar | 09:00 | TUSA       | TLLN-7251/138B   | 500.538   |
| VGS                               | TR-2  | Sílica gel                  | 76             | 24           | 18,75          | 138    | 1,69                   | 15                 | 81           | 02/mar | 10:00 | TUSA       | TLTR-15000 /1388 | 8.072     |
| MOG-2                             | TR-2  | Sílica gel                  | 78             | 22           | 18,75          | 138    | 1,84                   | 14                 | 72           | 14/fev | 08:00 | ITEL       | PTOE             | 32.131    |

**Tabela 5** – Relação por Ordem Decrescente dos Teores de Umidade dos Enrolamentos dos Transformadores com Sistemas de Preservação de Bolsa, Membrana e Sílica

| <b>TRANSFORMADORES COM BOLSA</b> |       |                             |                |              |                |        |                        |                    |              |        |       |            |                  |            |
|----------------------------------|-------|-----------------------------|----------------|--------------|----------------|--------|------------------------|--------------------|--------------|--------|-------|------------|------------------|------------|
| SE                               | Trafo | Tipo de Conservação de óleo | Ano Fabricação | Idade (anos) | Potência (MVA) | Tensão | Umidade do Enrolamento | Teor de água (ppm) | Rigidez (kV) | data   | hora  | Fabricante | Tipo             | Nº Série   |
| LAP                              | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 80             | 20           | 18,75          | 138    | 3,81                   | 12                 | 90           | 25/fev | 16:00 | TOSHIBA    |                  | 60.392     |
| MOG-2                            | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 79             | 21           | 18,75          | 138    | 3,55                   | 31                 | 33           | 14/fev | 09:00 | ASEA       | TMY-33           | 57.735     |
| ARR-2                            | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 75             | 25           | 18,75          | 138    | 3,26                   | 24                 | 30           | 21/fev | 12:00 | ASEA       | TMY-33           | 55.884     |
| LEM                              | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 79             | 21           | 18,75          | 138    | 2,87                   | 18                 | 48           | 22/fev | 14:00 | ASEA       | TMY-33           | 57.562     |
| ITH-1                            | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 87             | 13           | 30             | 138    | 2,65                   | 23                 | 56           | 17/mar | 09:00 | ASEA       | TMY-33           | 58.501     |
| GUA-2                            | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 94             | 6            | 33             | 138    | 2,63                   | 14                 | 70           | 14/mar | 08:00 | TRAFO      | TUC23/33,3       | KA0984A002 |
| PSS-1                            | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 76             | 24           | 18,75          | 138    | 2,6                    | 10                 | 89           | 29/fev | 09:00 | TUSA       | TLTR-15.000/1388 | 8.070      |
| GUA-1                            | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 81             | 19           | 30             | 138    | 2,48                   | 18                 | 85           | 13/mar | 08:30 | TRAFO      | TUC-25-30/138/15 | 48.976     |
| ARR-2                            | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 78             | 22           | 18,75          | 138    | 2,44                   | 17                 | 85           | 21/fev | 12:00 | TUSA       | TLTR-15000 /1388 | 8.099      |
| ANR                              | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 74             | 26           | 18,75          | 138    | 2,37                   | 12                 | 91,0         | 29/mar | 13:00 | BBC        | TD3LF            | SP-4.265   |
| LEM                              | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 79             | 21           | 18,75          | 138    | 2,36                   | 13                 | 89           | 22/jan | 14:00 | ASEA       | TMY-33           | 57.561     |
| LAP                              | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 80             | 20           | 18,75          | 138    | 2,35                   | 18                 | 64           | 24/fev | 09:00 | TOSHIBA    |                  | 59.847     |
| LIM-4                            | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 81             | 19           | 18,75          | 138    | 2,17                   | 11                 | 92           | 24/fev | 09:00 | ASEA       | TMY-33           | 58.500     |
| FRM                              | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 78             | 22           | 18,75          | 138    | 2,11                   | 12                 | 84           | 15/mar | 09:00 | TUSA       | TLTR-15000/1388  | 8.096      |

### TRANSFORMADORES COM BOLSA

| SE    | Trafo | Tipo de Conservação de óleo | Ano Fabricação | Idade (anos) | Potência (MVA) | Tensão | Umidade do Enrolamento | Teor de água (ppm) | Rigidez (kV) | data   | hora  | Fabricante | Tipo             | Nº Série   |
|-------|-------|-----------------------------|----------------|--------------|----------------|--------|------------------------|--------------------|--------------|--------|-------|------------|------------------|------------|
| GUA-2 | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 93             | 7            | 33             | 138    | 2,05                   | 10                 | 79           | 14/mar | 08:00 | TRAFO      | TUC-25/33,3      | KA768A001  |
| VGS   | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 76             | 24           | 18,75          | 138    | 1,81                   | 11                 | 99           | 03/mar | 10:00 | TUSA       | TLTR-15.000/1388 | 8.074      |
| ITH-1 | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 95             | 5            | 33             | 138    | 1,67                   | 9                  | 85           | 17/mar | 09:00 | TRAFO      | TUC25/33,3       | KA1165A001 |
| ARU   | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 79             | 21           | 18,75          | 138    | 1,65                   | 11                 | 86           | 17/mar | 09:00 | TUSA       | TLLN-7251/138B   | 500.537    |
| FRM   | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 78             | 22           | 18,75          | 138    | 1,58                   | 7                  | 70           | 15/mar | 09:00 | TUSA       | TLTR-15000/1388  | 8.097      |
| LIM-2 | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 75             | 25           | 18,75          | 138    | 1,16                   | 9                  | 89           | 28/fev | 08:00 | ASEA       | TMY-33           | 55.882     |
| ARU   | TR-2  | Bolsa e sílica gel          | 82             | 18           | 18,75          | 138    | 1,09                   | 7                  | 88           | 17/mar | 09:00 | TUSA       | TLLN-7251/138B   | 500.974    |
| LIM-4 | TR-1  | Bolsa e sílica gel          | 82             | 18           | 30             | 138    | 0,9                    | 8                  | 90           | 24/fev | 09:00 | BBC        | TD3LF            | 15.304     |

### TRANSFORMADORES COM MEMBRANA

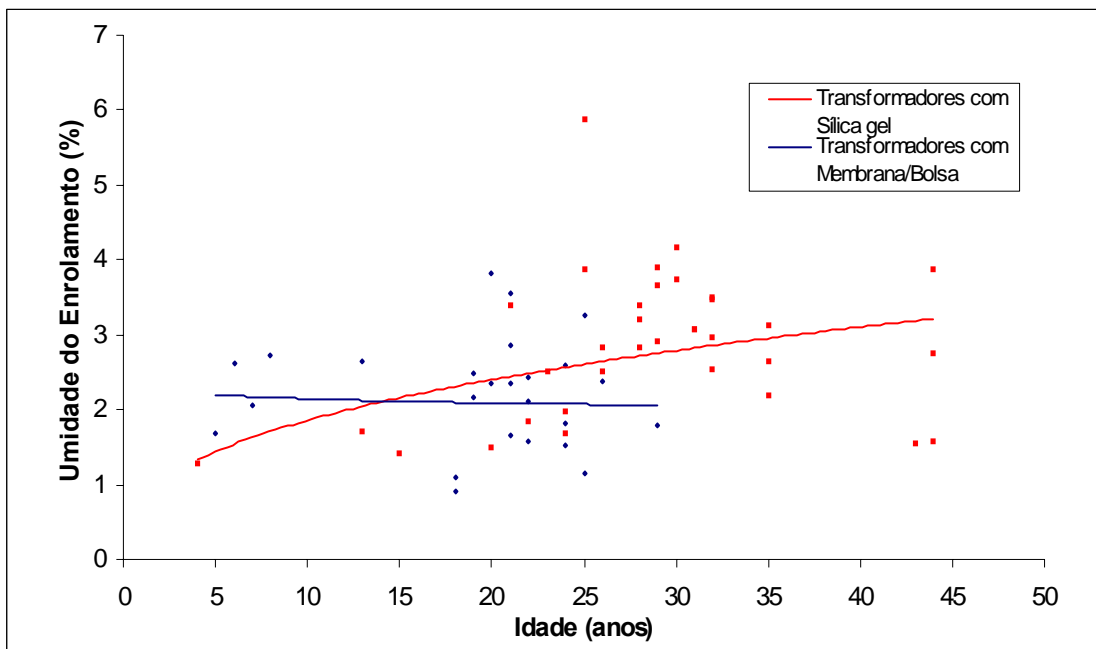
|       |      |                   |    |    |    |     |      |    |    |        |       |       |                     |            |
|-------|------|-------------------|----|----|----|-----|------|----|----|--------|-------|-------|---------------------|------------|
| RIC-3 | TR-1 | Membrana e sílica | 92 | 8  | 33 | 138 | 2,73 | 19 | 38 | 09/fev | 08:25 | TRAFO | TUC-25/33,3-145/15R | KA0629A001 |
| ATI   | TR-2 | Membrana e sílica | 71 | 29 | 30 | 138 | 1,78 | 19 | 56 | 09/mar | 09:50 | TUSA  | KLRM-1545T/138      | 500.372    |
| ATI   | TR-1 | Membrana e sílica | 76 | 24 | 30 | 138 | 1,51 | 8  | 86 | 09/mar | 09:30 | TUSA  | KLRM-1545T/138      | 500.373    |

### TRANSFORMADORES COM SILICA

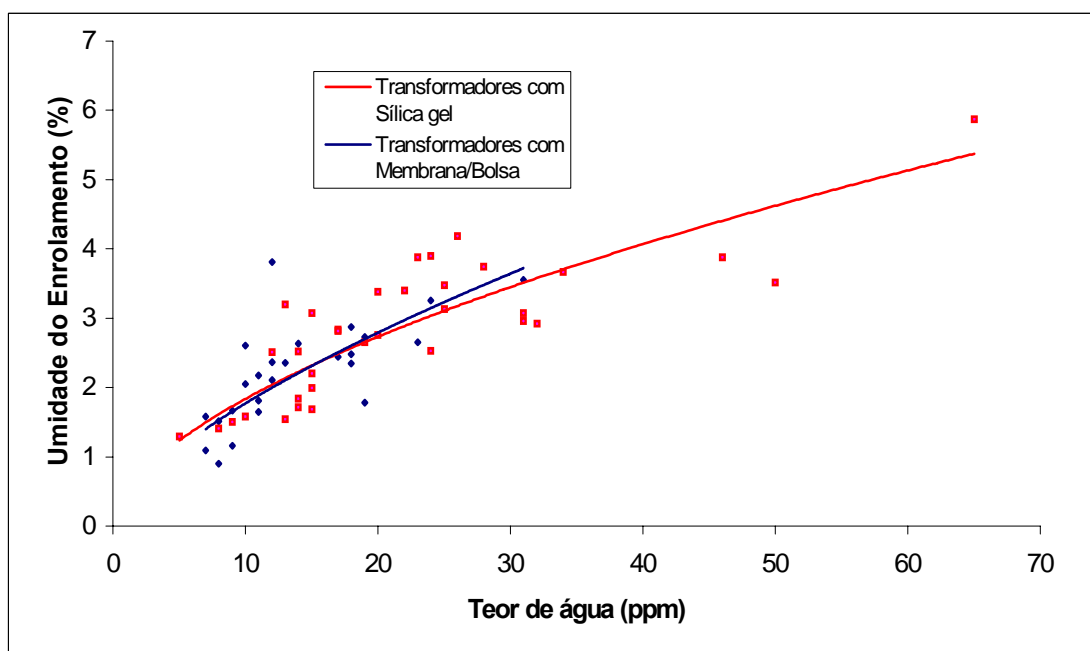
|       |      |            |    |    |       |     |      |    |    |        |       |        |                |           |
|-------|------|------------|----|----|-------|-----|------|----|----|--------|-------|--------|----------------|-----------|
| GUA-3 | TR-2 | Sílica gel | 75 | 25 | 18,75 | 138 | 5,87 | 65 | 18 | 15/mar | 08:00 | ASEA   | TMY-33         | 55.887    |
| ANR   | TR-2 | Sílica gel | 70 | 30 | 18,75 | 138 | 4,18 | 26 | 36 | 28/mar | 13:00 | ITEL   | PTOE           | 17.480    |
| SJB-1 | TR-1 | Sílica gel | 71 | 29 | 18,75 | 138 | 3,9  | 24 | 38 | 16/fev | 09:00 | ITEL   | PTOE           | 17.482    |
| PIP   | TR-1 | Sílica gel | 75 | 25 | 18,75 | 138 | 3,88 | 23 | 49 | 27/mar | 13:00 | ASEA   | TMY-33         | 55.888    |
| SFS   | TR-2 | Sílica gel | 56 | 44 | 12,5  | 69  | 3,88 | 46 | 31 | 29/mar | 15:00 | GE     | OA/FA-T        | B-54.839  |
| SJB-1 | TR-2 | Sílica gel | 70 | 30 | 18,75 | 138 | 3,74 | 28 | 29 | 16/fev | 09:00 | ITEL   | PTOE           | 17.481    |
| TAT-1 | TR-2 | Sílica gel | 71 | 29 | 9     | 88  | 3,67 | 34 | 59 | 22/fev | 13:00 | GE     | TR-92          | 5.100.462 |
| CON   | TR-2 | Sílica gel | 68 | 32 | 7,5   | 88  | 3,51 | 50 | 28 | 21/fev | 08:00 | AEG    | TLR-7500/92    | 8.015     |
| BER-1 | TR-2 | Sílica gel | 68 | 32 | 12,5  | 138 | 3,48 | 25 | 38 | 16/mar | 08:00 | AEG    | TLRF-10000/138 | 8.018     |
| CAJ   | TR-1 | Sílica gel | 72 | 28 | 12,5  | 138 | 3,4  | 22 | 56 | 09/mar | 09:00 | ITEL   | PTOE           | 20.174    |
| UBA-2 | TR-1 | Sílica gel | 79 | 21 | 18,75 | 138 | 3,38 | 20 | 58 | 22/mar | 09:00 | TUSA   | TLLN-7251/138B | 500.538   |
| BJP   | TR-1 | Sílica gel | 72 | 28 | 18,75 | 138 | 3,2  | 13 | 79 | 13/mar | 09:00 | AEG    | TLR-15000S138  | 8038      |
| TAM   | TR-1 | Sílica gel | 65 | 35 | 10    | 138 | 3,13 | 25 | 48 | 01/mar | 10:00 | GE     | TR-92          | 5.100.224 |
| PAF   | TR-1 | Sílica gel | 69 | 31 | 10    | 69  | 3,07 | 15 | 86 | 31/mar | 08:00 | COEMSA | TOFF-10/695    | 30.568    |

### TRANSFORMADORES COM SÍLICA

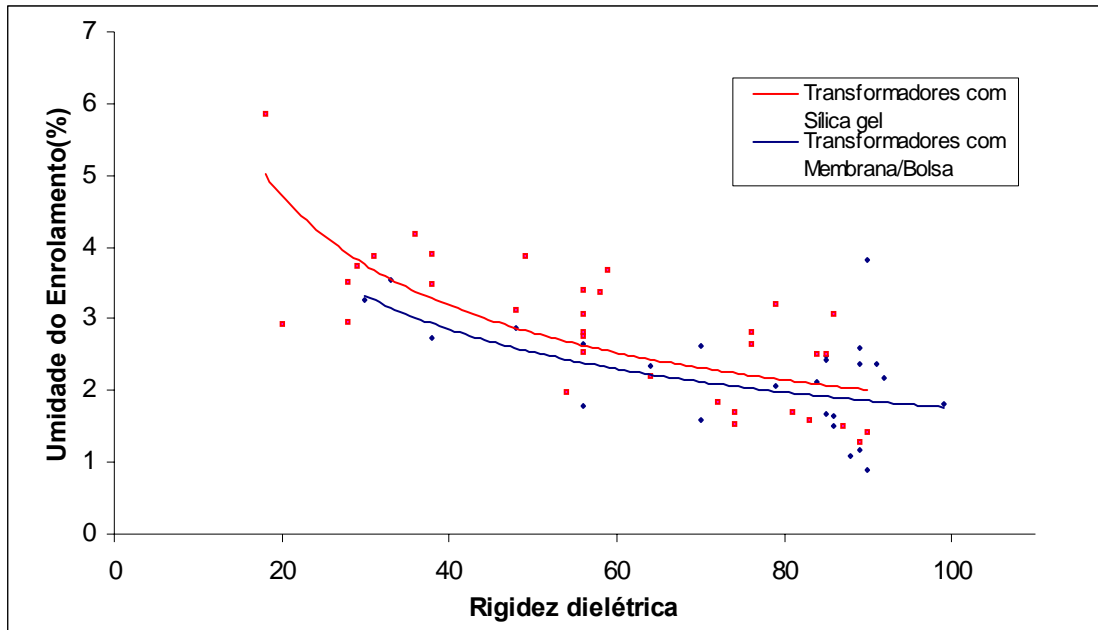
| SE    | Trafo | Tipo de Conservação de óleo | Ano Fabricação | Idade (anos) | Potência (MVA) | Tensão | Umidade do Enrolamento | Teor de água (ppm) | Rigidez (kV) | data   | hora  | Fabricante | Tipo               | Nº Série  |
|-------|-------|-----------------------------|----------------|--------------|----------------|--------|------------------------|--------------------|--------------|--------|-------|------------|--------------------|-----------|
| PAF   | TR-2  | Sílica gel                  | 69             | 31           | 12,5           | 69     | 3,07                   | 31                 | 56           | 30/mar | 09:00 | BBC        | TYA                | SPT-1.845 |
| TAT-1 | TR-1  | Sílica gel                  | 68             | 32           | 9              | 88     | 2,96                   | 31                 | 28           | 22/fev | 17:00 | AEG        | TLR7500-92         | 8.017     |
| PSS-1 | TR-2  | Sílica gel                  | 71             | 29           | 18,75          | 138    | 2,92                   | 32                 | 20           | 29/fev | 09:00 | ITEL       | PTOE               | 17.483    |
| JUQ   | TR-1  | Sílica gel                  | 72             | 28           | 12,5           | 138    | 2,83                   | 17                 | 56           | 10/mar | 08:00 | SIEMENS    | KLHM 1354/138      | 500.138   |
| SIS   | TR-1  | Sílica gel                  | 74             | 26           | 12,5           | 88     | 2,82                   | 17                 | 76           | 16/mar | 09:00 | GE         | LN / LVF           | 5.100.594 |
| BER-1 | TR-1  | Sílica gel                  | 56             | 44           | 10             | 138    | 2,76                   | 20                 | 56           | 16/mar | 08:00 | GE         | OA/FA-T            | B51684    |
| ANG   | TR-2  | Sílica gel                  | 65             | 35           | 10             | 138    | 2,65                   | 19                 | 76           | 28/fev | 10:00 | ASEA       | TOT-6509           | 11.681    |
| CON   | TR-1  | Sílica gel                  | 68             | 32           | 7,5            | 88     | 2,53                   | 24                 | 56           | 21/fev | 08:00 | AEG        | TLR-7500/92        | 8.016     |
| PIP   | TR-2  | Sílica gel                  | 77             | 23           | 18,75          | 138    | 2,52                   | 14                 | 84           | 27/mar | 13:00 | ASEA       | TMY-33             | 56.487    |
| SIS   | TR-2  | Sílica gel                  | 74             | 26           | 12,5           | 88     | 2,51                   | 12                 | 85           | 16/mar | 09:00 | GE         | LN / LVF           | 5.100.595 |
| ANG   | TR-1  | Sílica gel                  | 65             | 35           | 10             | 138    | 2,2                    | 15                 | 64           | 28/fev | 14:00 | ASEA       | TOT-6509           | 20.238    |
| GUA-3 | TR-1  | Sílica gel                  | 76             | 24           | 18,75          | 138    | 1,99                   | 15                 | 54           | 15/mar | 08:00 | TUSA       | TLRF-10000/138     | 8.071     |
| MOG-2 | TR-2  | Sílica gel                  | 78             | 22           | 18,75          | 138    | 1,84                   | 14                 | 72           | 14/fev | 08:00 | ITEL       | PTOE               | 32.131    |
| JAR   | TR-1  | Sílica gel                  | 87             | 13           | 12,5           | 138    | 1,71                   | 14                 | 74           | 10/mar | 09:00 | TRAFO      | TUC-10/12,5/145/15 | 64.717-G  |
| VGS   | TR-2  | Sílica gel                  | 76             | 24           | 18,75          | 138    | 1,69                   | 15                 | 81           | 02/mar | 10:00 | TUSA       | TLTR-15000 /1388   | 8.072     |
| SFS   | TR-1  | Sílica gel                  | 56             | 44           | 12,5           | 69     | 1,58                   | 10                 | 83           | 29/mar | 11:00 | GE         | OA/FA-T            | B-54.840  |
| TAM   | TR-2  | Sílica gel                  | 57             | 43           | 10             | 138    | 1,54                   | 13                 | 74           | 01/mar | 10:00 | BBC        | T8000/1326         | 2.041     |
| GUA-1 | TR-1  | Sílica gel                  | 80             | 20           | 30             | 138    | 1,5                    | 9                  | 87           | 13/mar | 09:00 | ASEA       | TMY-33             | 57.558    |
| UBA-1 | TR-1  | Sílica gel                  | 85             | 15           | 18,75          | 138    | 1,41                   | 8                  | 90           | 21/mar | 09:00 | BBC        | TD3LF              | 4.263     |
| UBA-1 | TR-2  | Sílica gel                  | 96             | 4            | 30             | 138    | 1,29                   | 5                  | 89           | 21/mar | 09:00 | SIEMENS    | TLSN-7752          | 305.088   |



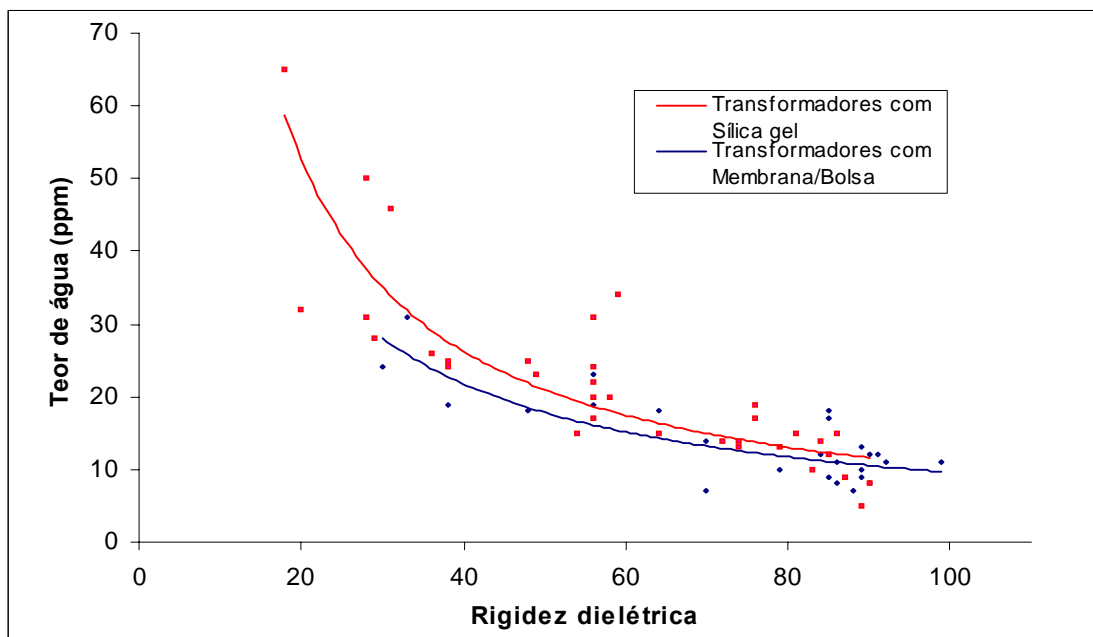
**Figura 2** – Teor de Umidade do Enrolamento em Relação à Idade dos Transformadores



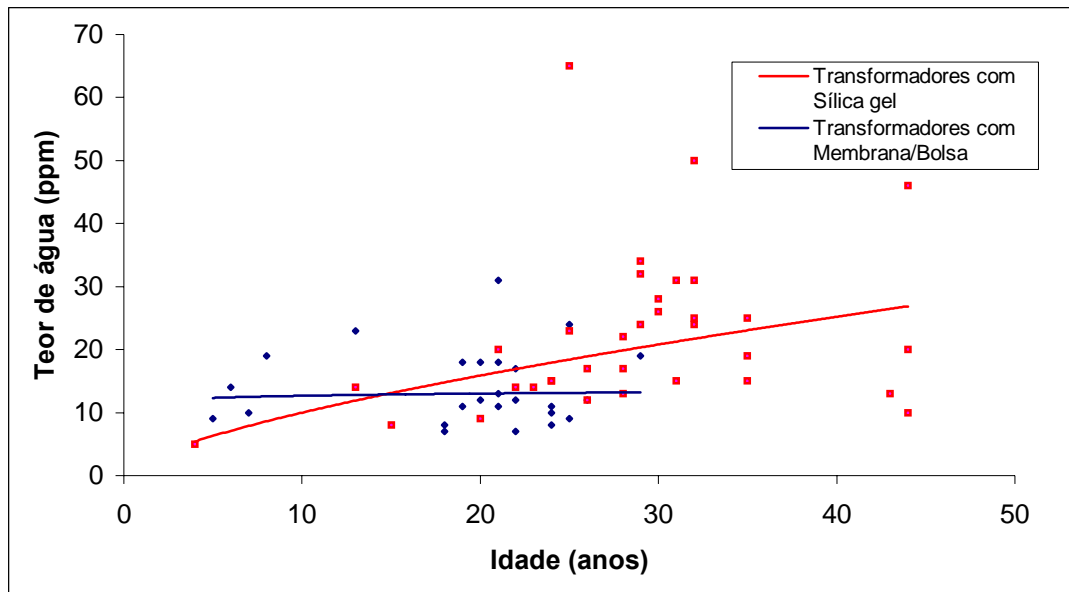
**Figura 3** – Teor de Umidade do Enrolamento em Relação ao Teor de Água do Óleo



**Figura 4** –Teor de Umidade do Enrolamento em Relação à Rigidez Dielétrica do Óleo



**Figura 5** – Teor de Água em Relação à Rigidez Dielétrica do Óleo



**Figura 6** – Teor de Água do Óleo em Relação à Idade dos Transformadores

## 16. POSSIBILIDADE DE FORMAÇÃO DE BOLHAS EM TRANSFORMADORES EM OPERAÇÃO

Fatores que podem ocasionar a formação de bolhas internas no transformador, durante o carregamento [8]:

- supersaturação do óleo com gases (transformadores com colchão de N<sub>2</sub>, quantidade de gases dissolvidos no óleo etc).
- vaporização da umidade adsorvida pela celulose.
- decomposição térmica da celulose.

No processo de formação de bolhas devem ser considerados:

- tipo de preservação do óleo isolante (selado ou aberto)
- teor de água na isolação.
- presença de gases dissolvidos no óleo isolante.
- condições de carregamento (perfil de carga).

### 16.1 Equilíbrio de Forças

Para que a bolha se forme é necessário que a sua pressão interna seja superior à:

- tensão interfacial do óleo (0,2mmHg)
- pressão da coluna do óleo (0,67mmHg/cm de coluna de óleo).
- pressão na superfície de óleo (760 mmHg ao nível do mar, ou maior, dependendo do tipo da selagem).

Para efeito de cálculo, considera-se somente a força da pressão na superfície do óleo.

## 16.2 Lei de Henry

A concentração ( $C_i$ ) de um gás " i " dissolvido no líquido é proporcional à pressão parcial daquele gás ( $P_i$ ) sobre o líquido:

$$C_i = K P_i$$

onde:

$$K = e^{\frac{A_i}{T}}$$

Sendo:

T= temperatura em Kelvin

$A_i$  = constante que depende da combinação gás x líquido e pode ser positiva ou negativa

$C_i$  = em ppm/volume

$P_i$  = em atm

K = Constante de Henry (figura 7)

Se, para uma temperatura constante, a pressão parcial do gás sobre o óleo é por alguma razão aumentada, haverá uma formação adicional de gases dissolvidos no líquido, para que uma nova condição de equilíbrio seja estabelecida. O mesmo ocorrerá, se a pressão do gás sobre o líquido for mantida constante e a temperatura se modificar de tal forma que a constante **K** aumente.

Por outro lado, para uma temperatura constante, se a pressão parcial do gás sobre o óleo é reduzida rapidamente, tal que o gás dissolvido não tenha tempo para se difundir (dispersar) para a superfície, poderá haver uma formação acelerada de gases livres e, conseqüentemente, "caminhos" de baixa rigidez dentro do transformador.

Em geral, os transformadores em operação contêm vários gases dissolvidos no óleo. Eles se comportam independentemente e contribuem na formação de bolhas. O equilíbrio, caso houver "n" gases no óleo, será alcançado se:

$$\sum_{i=1,n} c_i / k_i = \sum_{i=1,n} P_i$$

A pressão do vapor de água pode ser correlacionada com a concentração de umidade no papel-isolante, em função da temperatura, por meio do ábaco de Piper (figura 8) ou pela seguinte equação:

$$T = 6\,996,7 / [22,454 + 1,4495 \ln W - \ln P]$$

onde,

T - temperatura em Kelvin

W - perdas em porcentagem

P - pressão em Torr

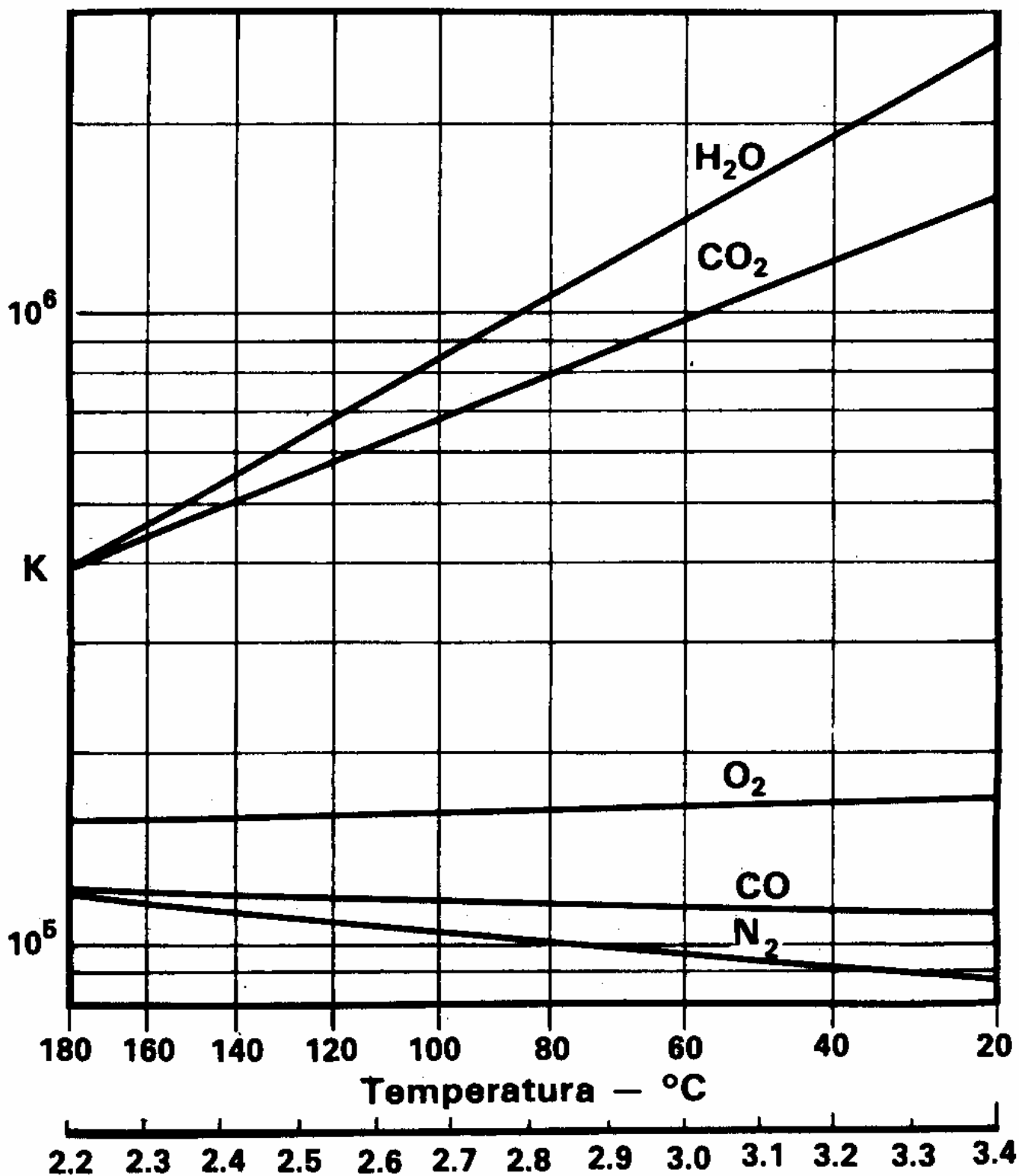
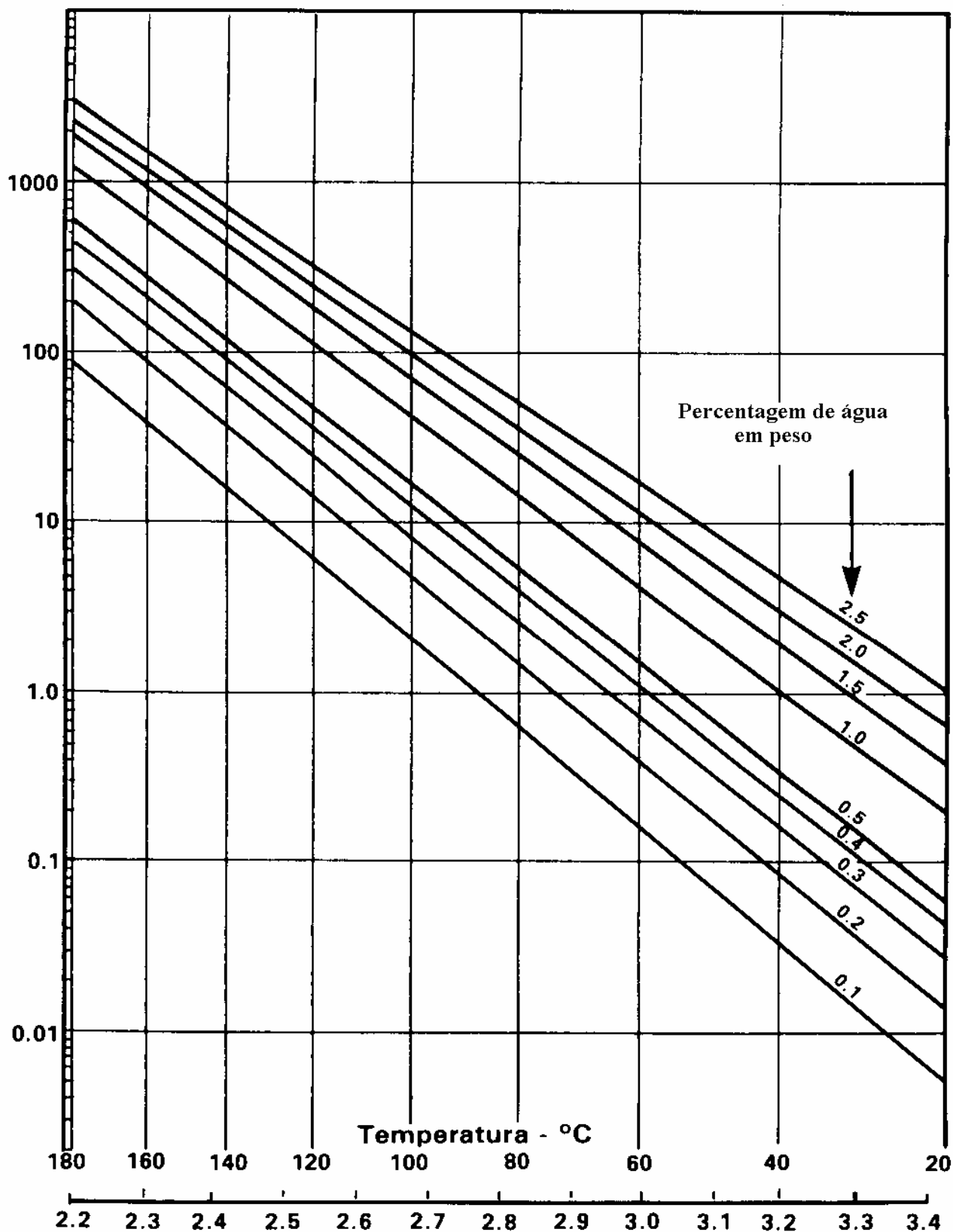


Figura 7 - Constante de Henry (K) para Gases Dissolvidos no Óleo de Transformadores em Operação



**Figura 8** - Gráfica do Equilíbrio entre a Pressão do Vapor de H<sub>2</sub>O e a Temperatura em Função da Umidade do Papel Kraft

### 16.3 Exemplo de Cálculo de Formação de Bolhas

Supondo um transformador selado com nitrogênio que possui as seguintes características [14]:

- Relação entre perdas de curto-circuito e a vazio = 4
- $\theta_a$  = Temperatura ambiente = 25°C
- $\Delta\theta_a$  = Elevação do óleo sobre a ambiente = 4 °C
- $\Delta\theta_{e_0}$  = Elevação do enrolamento sobre o óleo = 30°C
- N<sub>2</sub> ocupa 8% do volume de óleo a 25 °C
- A pressão de N<sub>2</sub> sobre o óleo é de 1,5 atm
- A umidade do papel é 0,5% em massa

Após a rejeição de carga:

$$\theta_a = 25 \text{ °C}$$

$$\Delta\theta_a = 37 \text{ °C}$$

$$\Delta\theta_{e_0} = 0 \text{ °C}$$

A concentração de 0,5% de água no isolamento desenvolve uma pressão de 14,75 mm Hg.

$$p_{H_2O} = 14,75 \text{ Hg}$$

$$p_{N_2} = p - p_{H_2O}$$

$$p_{N_2} = 1 \text{ 140} - 14,75 = 1 \text{ 125,25 mm Hg ou } 1,48 \text{ atm}$$

Pela Lei de Henry,

$$K_{N_2} (100 \text{ °C}) = 96 \text{ 288 ppm/vol/atm}$$

$$C_{N_2} = K_{N_2} \cdot P_{N_2}$$

$$C_{N_2} = 96288 \times 1,48 = 141 \text{ 543 ppm/vol}$$

e, no equilíbrio, tem-se:

$$pE_{N_2} + pE_{H_2O} = p_{N_2} + p_{H_2O}$$

Após o desligamento da carga, a dissipação do transformador é de somente 25%, e a temperatura do enrolamento estará em equilíbrio térmico com a temperatura do óleo, devido a sua constante térmica de 5 minutos.

Supondo que as concentrações de água e nitrogênio sejam constantes no óleo, temos:

- redução de 8 °C na temperatura do óleo acarreta uma variação de 0,64% no volume e um acréscimo de 7,36% no volume de gás.

Supondo o comportamento de um gás ideal, o novo equilíbrio ocorrerá a uma pressão de 1,25 atm ou 953,65 mm Hg.

A pressão de água para a concentração de 0,5% na temperatura de 62 °C é de:

$$P_{H_2O (62\text{ }^\circ\text{C})} = 1,76 \text{ mm Hg}$$

e, pela Lei de Henry,

$$K_{N_2 (62\text{ }^\circ\text{C})} = 91\,639 \text{ ppm/vol/atm}$$

$$P_{EN_2} = C_{N_2} / K_{N_2 (62\text{ }^\circ\text{C})} = 1,544 \text{ atm} = 1\,172,9 \text{ mm Hg}$$

$$P_E = P_{EN_2} + P_{EH_2O} = 1\,175,7 \text{ mm Hg}$$

Esta pressão supera a pressão de equilíbrio de 953,65 mm Hg, ocorrendo a formação de bolhas.

## **17. DIAGNÓSTICO DA POTENCIALIDADE DE FALHAS POR FORMAÇÃO DE BOLHAS**

A partir dos dados levantados para os transformadores do plano-piloto, calculou-se a possibilidade de formação de bolhas. Tomou-se como referência a curva de carga de um dia típico, além de resultados ensaios no óleo tais como teor de água e concentração de gases como nitrogênio, oxigênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono.

Foram feitas simulações no perfil de carga, de modo a obter as condições mais críticas para formação de bolhas. Na tabela 6, pode-se observar a potencialidade de todos os transformadores do plano-piloto quanto à formação de bolhas.

Com o objetivo de facilitar a visualização da gravidade da situação para cada transformador estudado, empregou-se um sistema de cores na tabela 6. Os transformadores cujas possibilidades de carregamento aparecem com fundo em verde são aqueles que não se encontram em condições de formação de bolha. O fundo amarelo indica que a condição de carregamento apresentada possibilitou no mínimo 80% da pressão crítica para formação de bolhas.

Portanto, os enrolamentos do transformador deverão ser secos e seu óleo deverá ser desgaseificado. Por fim, o fundo em vermelho indica que o transformador já atingiu a possibilidade de formação de bolha na condição de carregamento indicada. O fundo vermelho também foi utilizado para indicar se algum acessório ou equipamento associado ao transformador está limitando sua possibilidade de carregamento.

Os resultados obtidos quanto à possibilidade de formação de bolhas permitiram constatar que há vários transformadores com possibilidade de formação de bolhas. Há casos com possibilidade de formação de bolhas mesmo sendo baixo o teor de água dos enrolamentos.

A formação de bolhas é devida tanto ao teor de água elevado quanto à alta concentração de gases, sobretudo de nitrogênio. Na tabela 7 estão discriminados todos os transformadores do plano-piloto cujos óleos já tiveram teor de nitrogênio acima de 100.000 ppm. A explicação mais plausível para justificar teores tão altos de nitrogênio é a entrada de bolhas de ar na seringa onde foram coletadas e acondicionadas as amostras de óleo. Os resultados dos teores de nitrogênio desses óleos deverão ser acompanhados para confirmação ou não dos valores observados.

## **18. ESTUDO DE VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM O ENVELHECIMENTO DO ISOLAMENTO SÓLIDO DE TRANSFORMADORES**

Há uma base de dados com resultados de ensaios feitos nos óleos isolantes dos transformadores estudados. Foram selecionados os principais ensaios para avaliação de variáveis que afetam direta ou indiretamente o envelhecimento do sistema isolante do transformador.

As figuras 9-20 mostram estudos comparativos entre os principais ensaios de avaliação de envelhecimento do óleo e do papel isolante. A figura 9 apresenta o somatório dos gases monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) versus o teor de furfural (2FAL). Embora esses três compostos estejam associados à degradação térmica do papel e do óleo, o 2FAL é exclusivo da degradação do papel. Portanto, servirá como referência para as primeiras cinco avaliações feitas.

Ao observar a figura 9, constata-se uma grande dispersão dos pontos, o que pode ser explicado por serem dados de campo e, conseqüentemente, sujeitos à influência de muitos fatores de difícil determinação e controle. Para melhor avaliação dos dados, foram propostas curvas médias e suas respectivas equações. Tais equações servem apenas como referencial e não devem ser consideradas como definitivas. Seria necessário melhor tratamento dos dados, a fim de obter equações com significado estatístico. Apesar de todas as limitações envolvidas, pode-se observar certa correlação entre as variáveis envolvidas. As equações obtidas tanto para os transformadores com sílica quanto para aqueles com bolsa/membrana são bastante próximas.

Obteve-se também correlação bastante razoável entre índice de acidez (figura 10) e furfural, bem como entre tensão interfacial (figura 11) e furfural. Já a

correlação entre teor de oxigênio e furfural (figura 12) apresentou uma dispersão excessiva de dados em razão da ocorrência de valores de oxigênio acima de 30.000 ppm para alguns transformadores com sílica, cujos teores de furfural ficaram abaixo de 0,3 ppm. É muito provável que a causa de valores altos seja a mesma observada para os valores exagerados de nitrogênio, isto é, a entrada de bolhas de ar nas seringas usadas na análise de gases por cromatografia. Entretanto os valores de oxigênio são altos, sobretudo para parte dos transformadores com membrana/bolsa. Idealmente o teor de oxigênio para transformadores selados deve ser inferior a 3.000 ppm.

O estudo comparativo entre a umidade dos enrolamentos e o teor de furfural revelou aspectos bastante interessantes quanto ao tipo de envelhecimento do papel isolante dos transformadores estudados (figura 13). Para os transformadores com sílica, pode-se ver uma tendência de aumento do teor de furfural para valores mais altos de umidade dos enrolamentos. Isto é esperado, pois o teor de água aumenta com o tempo assim como o envelhecimento do papel, que deve ser acompanhado normalmente pelo aumento do teor de furfural.

Para os transformadores com membrana/bolsa observou-se uma tendência negativa no teor de furfural para teores de umidade mais elevados nos enrolamentos. Ao analisar os dados, pode-se constatar que há apenas um ponto indicando teor de furfural acima de 0,2 ppm. Portanto, é impossível obter uma curva de correlação confiável. Outro aspecto importante está nos elevados teores de umidade dos enrolamentos dos transformadores com membrana/bolsa, isto é, entre 1,5 e 4%. Tais valores estão na mesma faixa que os de transformadores com sílica e teores de furfural abaixo de 0,2 ppm.

A análise dos dados torna-se mais interessante ao avaliar as figura 14 e 15 que correlacionam o teor de furfural e o somatório dos gases CO e CO<sub>2</sub> com a idade dos transformadores, respectivamente. Os valores das duas figuras demonstram que a maioria dos transformadores com membrana/bolsa está na faixa entre 18 e 26 anos, aproximadamente. Parte considerável dos transformadores com sílica está com menos de 30 anos e teores de furfural abaixo de 0,2 ppm (figura 14). Entretanto, há cinco transformadores com teor de furfural acima de 1,0 ppm (tabela 7), o que é considerado alto. Os transformadores são os seguintes: BER-1 TR-1; SFS TR-1 e TR-2; PAF TR-2; e RIC-3 TR-1. Deve ser dada atenção especial ao transformador TR-1 de RIC-3, pois tem apenas nove anos de idade.

Em face do exposto, pode-se concluir que o sistema de preservação de óleo por membrana/bolsa não foi efetivo para impedir a entrada de oxigênio e umidade atmosféricos. Conseqüentemente tais fatores estão causando envelhecimento nesses transformadores no mesmo nível observado para transformadores com sílica. A tendência é de haver aumento do teor de furfural nos níveis observados para transformadores com sílica e membrana/bolsa à medida que os transformadores forem se aproximando dos 30-35 anos de idade. Entretanto a dispersão dos valores de furfural permite apenas dizer se

um transformador está muito ou pouco envelhecido, não se podendo concluir a quantidade de vida remanescente.

As figuras 16-18 apresentam informações sobre o desempenho dos óleos. Os índices de acidez (figura 16) estão baixos apesar de vários transformadores estarem na faixa entre 20 e 30 anos. Ao mesmo tempo a tensão interfacial está bastante alta na média (figura 17). Isto poderia levar à falsa conclusão de os sistemas de preservação do óleo têm tido bom desempenho. Entretanto, ao analisar os dados da figura 18, fica bastante evidente que os óleos estão com cores escuras, o que é incompatível com óleos bem preservados. O processo de regeneração é eficiente para baixar a acidez e elevar a tensão interfacial, porém tem baixa eficiência na retirada de compostos que dão cor ao óleo. Logo, um óleo de cor escura e baixa acidez e elevada tensão interfacial deve ter sido submetido a processos de regeneração.

O lado negativo da regeneração não é técnico, mas econômico. Apesar dos esforços e gastos para manter o óleo em bom estado, seu principal agente de degradação, o oxigênio, continua abundante. Os valores de oxigênio (figura 19) e nitrogênio (figura 20) encontrados deixam claro que vários dos transformadores com membrana/bolsa estão em contato direto com o ar atmosférico, embora isso não devesse ocorrer.

Pode-se concluir que os transformadores analisados com sistema de preservação com membrana/bolsa ou sílica necessitam de sistema substitutivo de selagem que impeça efetivamente o contato do óleo com o oxigênio e umidade atmosféricos.

**Tabela 6:** Relação da Potencialidade de Falhas por Formação de Bolhas em Relação ao Carregamento dos Transformadores

**LIMITES DE CARREGAMENTO ADMISSÍVEL CONFIÁVEL DE SUBESTAÇÕES**

| SUBESTAÇÃO |          |         | TRANSFORMADOR        |            | LIMITAÇÃO     |          |                |                           |            | CARREGAMENTO ADMISSÍVEL |               |                 |                |                |               | CARREGAMENTO MÁX            |
|------------|----------|---------|----------------------|------------|---------------|----------|----------------|---------------------------|------------|-------------------------|---------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|-----------------------------|
| SE         | Relação  | Posição | Potência<br>Nom. MVA | Nº Série   | TRANSFORMADOR |          |                | EQUIPAM. ASSOCIADOS       |            | Normal<br>(pu)          | Normal<br>(A) | Planej.<br>(pu) | Planej.<br>(A) | Emerg.<br>(pu) | Emerg.<br>(A) | CONFIÁVEL<br>LIBERADO ?     |
|            |          |         |                      |            | Umidade       | Bolhas   | Temperatura    | Tipo                      | Limite (A) |                         |               |                 |                |                |               |                             |
| ANG        | 138/13,8 | TR-1    | 10                   | 20.238     | 2,20          | Crítico  | Enrolamentos   | Secc BT                   | 600        | 1,29                    | 541           | 1,33            | 555            | 1,47           | 614           | Não. Implem. Soluções 1 e 2 |
| ANG        | 138/13,8 | TR-2    | 10                   | 11.681     | 2,65          | Crítico  | Enrolamentos   | ok                        |            | 1,35                    | 566           | 1,40            | 586            | 1,50           | 627           | Não. Implementar Solução 2  |
| ANR        | 138/13,8 | TR-1    | 18,75                | SP-4.265   | 2,37          | Eminente | Enrolamentos   | ok                        |            | 1,20                    | 938           | 1,27            | 995            | 1,43           | 1120          | Sim                         |
| ANR        | 138/13,8 | TR-2    | 18,75                | 17.480     | 4,18          | Crítico  | Enrolamentos   | Disj BT                   | 800        | 1,11                    | 872           | 1,26            | 989            | 1,42           | 1115          | Não. Implem. Soluções 1 e 2 |
| ARR-2      | 138/13,8 | TR-1    | 18,75                | 8.099      | 2,44          | Crítico  | Enrolamentos   | ok                        |            | 1,22                    | 956           | 1,27            | 995            | 1,42           | 1116          | Não. Implementar Solução 2  |
| ARR-2      | 138/13,8 | TR-2    | 18,75                | 55.884     | 3,26          | Crítico  | Enrolamentos   | ok                        |            | 1,12                    | 881           | 1,26            | 991            | 1,43           | 1119          | Não. Implementar Solução 2  |
| ARU        | 138/13,8 | TR-1    | 18,75                | 500.537    | 1,65          | Eminente | Enrolamentos   | ok                        |            | 1,12                    | 804           | 1,25            | 984            | 1,42           | 1116          | Sim                         |
| ARU        | 138/13,8 | TR-2    | 18,75                | 500.974    | 1,09          | Ausente  | Enrolamentos   | ok                        |            | 1,12                    | 881           | 1,26            | 988            | 1,40           | 1097          | Sim                         |
| ATI        | 138/13,8 | TR-1    | 30                   | 500.373    | 1,51          | Eminente | Enrolamentos   | Disj /Secc BT             | 1200 /1200 | 1,20                    | 1507          | 1,26            | 1586           | 1,43           | 1790          | Não. Implementar Solução 1  |
| ATI        | 138/13,8 | TR-2    | 30                   | 500.372    | 1,78          | Crítico  | Enrolamentos   | Disj /Secc BT             | 1200 /1200 | 1,21                    | 1516          | 1,27            | 1589           | 1,43           | 1790          | Não. Implem. Soluções 1 e 2 |
| BER-1      | 138/13,8 | TR-1    | 10                   | B51684     | 2,76          | Crítico  | Enrolamentos   | ok                        |            | 1,20                    | 503           | 1,26            | 528            | 1,42           | 596           | Não. Implem. Soluções 1 e 2 |
| BER-1      | 138/13,8 | TR-2    | 12,5                 | 8.018      | 3,48          | Crítico  | Enrolamentos   | Disj BT                   | 630        | 1,20                    | 629           | 1,26            | 661            | 1,43           | 746           | Não. Implem. Soluções 1 e 2 |
| BJP        | 138/13,8 | TR-1    | 18,75                | 8038       | 3,20          | Crítico  | Enrolamentos   | ok                        |            | 1,21                    | 946           | 1,34            | 1051           | 1,50           | 1178          | Não. Implementar Solução 2  |
| CAJ        | 138/13,8 | TR-1    | 12,5                 | 20.174     | 3,40          | Crítico  | Enrolamentos   | Secc BT                   | 600        | 1,22                    | 638           | 1,26            | 661            | 1,42           | 745           | Não. Implem. Soluções 1 e 2 |
| CON        | 88/13,8  | TR-1    | 7,5                  | 8.016      | 2,53          | Crítico  | Enrolamentos   | ok                        |            | 1,14                    | 357           | 1,29            | 403            | 1,46           | 458           | Não. Implementar Solução 2  |
| CON        | 88/13,8  | TR-2    | 7,5                  | 8.015      | 3,51          | Crítico  | Enrolamentos   | ok                        |            | 1,13                    | 355           | 1,28            | 403            | 1,46           | 458           | Não. Implementar Solução 2  |
| FRM        | 138/13,8 | TR-1    | 18,75                | 8.097      | 1,58          | Ausente  | Enrolamentos   | ok                        |            | 1,22                    | 957           | 1,36            | 1064           | 1,50           | 1177          | Sim                         |
| FRM        | 138/13,8 | TR-2    | 18,75                | 8.096      | 2,11          | Ausente  | Enrolamentos   | ok                        |            | 1,22                    | 957           | 1,36            | 1064           | 1,50           | 1177          | Sim                         |
| GUA-1      | 138/13,8 | TR-1    | 30                   | 57.558     | 1,50          | Eminente | Enrolamentos   | Disj BT                   | 1250       | 1,20                    | 1501          | 1,26            | 1587           | 1,42           | 1788          | Não. Implementar Solução 1  |
| GUA-1      | 138/13,8 | TR-2    | 30                   | 48.976     | 2,48          | Crítico  | Enrolamentos   | Disj /Secc BT             | 1250/1600  | 1,15                    | 1440          | 1,22            | 1528           | 1,39           | 1739          | Não. Implem. Soluções 1 e 2 |
| GUA-2      | 138/13,8 | TR-1    | 33                   | KA0984A002 | 2,63          | Crítico  | Enrolamentos   | Disj BT                   | 1600       | 1,22                    | 1698          | 1,27            | 1763           | 1,42           | 1985          | Não. Implem. Soluções 1 e 2 |
| GUA-2      | 138/13,8 | TR-2    | 33                   | KA768A001  | 2,05          | Eminente | Enrolamentos   | Disj /Secc BT             | 1600 /1600 | 1,26                    | 1752          | 1,28            | 1785           | 1,44           | 2005          | Não. Implementar Solução 1  |
| GUA-3      | 138/13,8 | TR-1    | 18,75                | 8.071      | 1,99          | Eminente | Enrolamentos   | ok                        |            | 1,20                    | 939           | 1,26            | 992            | 1,43           | 1118          | Sim                         |
| GUA-3      | 138/13,8 | TR-2    | 18,75                | 55.887     | 5,87          | Crítico  | Enrolamentos   | Secc BT                   | 800        | 1,19                    | 936           | 1,27            | 998            | 1,43           | 1125          | Não. Implem. Soluções 1 e 2 |
| ITH-1      | 138/13,8 | TR-1    | 33                   | KA1165A001 | 1,67          | Ausente  | Enrolamentos   | Disj BT                   | 1600       | 1,22                    | 1699          | 1,26            | 1759           | 1,43           | 1987          | Não. Implementar Solução 1  |
| ITH-1      | 138/13,8 | TR-2    | 30                   | 58.501     | 2,65          | Crítico  | Enrolamentos   | sem inform.               |            | 1,23                    | 1543          | 1,26            | 1586           | 1,43           | 1790          | Não. Implementar Solução 2  |
| JAR        | 138/13,8 | TR-1    | 12,5                 | 64.717-G   | 1,71          | Eminente | Enrolamentos   | ok                        |            | 1,22                    | 636           | 1,35            | 707            | 1,50           | 785           | Sim                         |
| JUQ        | 138/13,8 | TR-1    | 12,5                 | 500.138    | 2,83          | Crítico  | Enrolamentos   | Secc BT                   | 600        | 1,21                    | 633           | 1,26            | 661            | 1,43           | 745           | Não. Implem. Soluções 1 e 2 |
| LAP        | 138/13,8 | TR-1    | 18,75                | 59.847     | 2,35          | Eminente | Conector Trafo | Conect. de BuchasTR/Disj. |            | 1,12                    | 879           | 1,25            | 977            | 1,41           | 1106          | Não. Implementar Solução 1  |
| LAP        | 138/13,8 | TR-2    | 18,75                | 60.392     | 3,81          | Crítico  | Enrolamentos   | ok                        |            | 1,12                    | 879           | 1,25            | 977            | 1,41           | 1106          | Não. Implementar Solução 2  |

Solução 1: Substituir equipamentos associados ao transformador por outros com capacidade nominal maior (barramento, seccionadores, conectores, TCs, disjuntor geral BT ou outros)

Solução 2: Secar os Enrolamentos do transformador para eliminar a formação de bolhas

|          |                       |                        |
|----------|-----------------------|------------------------|
| Liberado | Liberado c/ Restrição | Valor Crítico Atingido |
|----------|-----------------------|------------------------|

## LIMITES DE CARREGAMENTO ADMISSÍVEL CONFIÁVEL DE SUBESTAÇÕES

| SUBESTAÇÃO |          |         | TRANSFORMADOR        |            | LIMITAÇÃO     |          |               |                     |            | CARREGAMENTO ADMISSÍVEL |               |                 |                |                |               | CARREGAMENTO MÁX            |
|------------|----------|---------|----------------------|------------|---------------|----------|---------------|---------------------|------------|-------------------------|---------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|-----------------------------|
| SE         | Relação  | Posição | Potência<br>Nom. MVA | Nº Série   | TRANSFORMADOR |          |               | EQUIPAM. ASSOCIADOS |            | Normal<br>(pu)          | Normal<br>(A) | Planej.<br>(pu) | Planej.<br>(A) | Emerg.<br>(pu) | Emerg.<br>(A) | CONFIÁVEL<br>LIBERADO ?     |
|            |          |         |                      |            | Umidade       | Bolhas   | Temperatura   | Tipo                | Limite (A) |                         |               |                 |                |                |               |                             |
| LEM        | 138/13,8 | TR-1    | 18,75                | 57.561     | 2,36          | Crítico  | Enrolamentos  | ok                  |            | 1,20                    | 938           | 1,26            | 991            | 1,43           | 1118          | Não. Implem. Soluções 1 e 2 |
| LEM        | 138/13,8 | TR-2    | 18,75                | 57.562     | 2,87          | Crítico  | Enrolamentos  | ok                  |            | 1,19                    | 935           | 1,26            | 992            | 1,43           | 1118          | Não. Implem. Soluções 1 e 2 |
| LIM-2      | 138/13,8 | TR-1    | 18,75                | 55.882     | 1,16          | Ausente  | Enrolamentos  | ok                  |            | 1,11                    | 868           | 1,29            | 1010           | 1,44           | 1133          | Sim                         |
| LIM-4      | 138/13,8 | TR-1    | 30                   | 15.304     | 0,90          | Ausente  | Enrolamentos  | Disj /Secc BT       | 1600/1600  | 1,13                    | 1413          | 1,24            | 1561           | 1,41           | 1767          | Não. Implementar Solução 1  |
| LIM-4      | 138/13,8 | TR-2    | 18,75                | 58.500     | 2,17          | Eminente | Enrolamentos  | Disj /Secc BT       | 1600/1600  | 1,12                    | 1411          | 1,27            | 1593           | 1,43           | 1795          | Não. Implementar Solução 1  |
| MOG-2      | 138/13,8 | TR-1    | 18,75                | 57.735     | 3,55          | Crítico  | Enrolamentos  | ok                  |            | 1,22                    | 954           | 1,35            | 1063           | 1,50           | 1178          | Não. Implem. Soluções 1 e 2 |
| MOG-2      | 138/13,8 | TR-2    | 18,75                | 32.131     | 1,84          | Eminente | Enrolamentos  | ok                  |            | 1,18                    | 925           | 1,31            | 1026           | 1,47           | 1150          | Sim                         |
| PAF        | 69/13,8  | TR-1    | 10                   | 30.568     | 3,07          | Crítico  | Enrolamentos  | sem inform.         |            | 1,21                    | 526           | 1,27            | 533            | 1,43           | 599           | Não. Implementar Solução 2  |
| PAF        | 69/13,8  | TR-2    | 12,5                 | SPT-1.845  | 3,07          | Crítico  | Enrolamentos  | sem inform.         |            | 1,21                    | 633           | 1,29            | 674            | 1,43           | 749           | Não. Implementar Solução 2  |
| PIP        | 138/13,8 | TR-1    | 18,75                | 55.888     | 3,88          | Crítico  | Enrolamentos  | ok                  |            | 1,21                    | 949           | 1,29            | 1008           | 1,44           | 1132          | Não. Implementar Solução 2  |
| PIP        | 138/13,8 | TR-2    | 18,75                | 56.487     | 2,52          | Crítico  | Enrolamentos  | ok                  |            | 1,20                    | 944           | 1,28            | 1008           | 1,44           | 1133          | Não. Implementar Solução 2  |
| PSS-1      | 138/13,8 | TR-1    | 18,75                | 8.070      | 2,60          | Eminente | Enrolamentos  | ok                  |            | 1,22                    | 955           | 1,26            | 992            | 1,41           | 1107          | Sim                         |
| PSS-1      | 138/13,8 | TR-2    | 18,75                | 17.483     | 2,92          | Crítico  | Enrolamentos  | ok                  |            | 1,22                    | 954           | 1,26            | 989            | 1,42           | 1115          | Não. Implementar Solução 2  |
| RIC-3      | 138/13,8 | TR-1    | 33                   | KA0629A001 | 2,73          | Ausente  | Óleo Isolante | sem inform.         |            | 1,46                    | 2028          | 1,46            | 2028           | 1,50           | 2090          | Sim                         |
| SFS        | 69/13,8  | TR-1    | 12,5                 | B-54.840   | 1,58          | Eminente | Enrolamentos  | Secc BT             | 400        | 1,23                    | 644           | 1,27            | 666            | 1,43           | 750           | Não. Implementar Solução 1  |
| SFS        | 69/13,8  | TR-2    | 12,5                 | B-54.839   | 3,88          | Crítico  | Enrolamentos  | Disj/ Secc BT       | 630 /400   | 1,23                    | 644           | 1,27            | 666            | 1,43           | 750           | Não. Implem. Soluções 1 e 2 |
| SIS        | 88/13,8  | TR-1    | 12,5                 | 5.100.594  | 2,82          | Crítico  | Enrolamentos  | Disj BT             | 630        | 1,23                    | 645           | 1,37            | 716            | 1,50           | 785           | Não. Implem. Soluções 1 e 2 |
| SIS        | 88/13,8  | TR-2    | 12,5                 | 5.100.595  | 2,51          | Crítico  | Enrolamentos  | ok                  |            | 1,23                    | 644           | 1,37            | 716            | 1,5            | 785           | Não. Implementar Solução 2  |
| SJB-1      | 138/13,8 | TR-1    | 18,75                | 17.482     | 3,90          | Crítico  | Enrolamentos  | sem inform.         |            | 1,20                    | 939           | 1,26            | 988            | 1,42           | 1116          | Não. Implementar Solução 2  |
| SJB-1      | 138/13,8 | TR-2    | 18,75                | 17.481     | 3,74          | Crítico  | Enrolamentos  | sem inform.         |            | 1,21                    | 951           | 1,26            | 989            | 1,42           | 1115          | Não. Implementar Solução 2  |
| TAM        | 138/13,8 | TR-1    | 10                   | 5.100.224  | 3,13          | Crítico  | Enrolamentos  | Secc BT             | 600        | 1,14                    | 478           | 1,22            | 509            | 1,38           | 579           | Não. Implem. Soluções 1 e 2 |
| TAM        | 138/13,8 | TR-2    | 10                   | 2.041      | 1,54          | Eminente | Enrolamentos  | ok                  |            | 1,13                    | 473           | 1,23            | 513            | 1,39           | 581           | Sim                         |
| TAT-1      | 88/13,8  | TR-1    | 9                    | 8.017      | 2,96          | Crítico  | Enrolamentos  | sem inform.         |            | 1,11                    | 433           | 1,22            | 475            | 1,39           | 539           | Não. Implementar Solução 2  |
| TAT-1      | 88/13,8  | TR-2    | 9                    | 5.100.462  | 3,67          | Crítico  | Enrolamentos  | sem inform.         |            | 1,11                    | 433           | 1,22            | 475            | 1,39           | 539           | Não. Implementar Solução 2  |
| UBA-1      | 138/13,8 | TR-1    | 18,75                | 4.263      | 1,41          | Eminente | Enrolamentos  | ok                  |            | 1,23                    | 967           | 1,26            | 990            | 1,42           | 1115          | Sim                         |
| UBA-1      | 138/13,8 | TR-2    | 30                   | 305.088    | 1,29          | Eminente | Enrolamentos  | Disj BT             | 1250       | 1,23                    | 1713          | 1,26            | 1758           | 1,42           | 1982          | Não. Implementar Solução 1  |
| UBA-2      | 138/13,8 | TR-1    | 18,75                | 500.538    | 3,38          | Crítico  | Enrolamentos  | ok                  |            | 1,23                    | 964           | 1,26            | 989            | 1,42           | 1115          | Não. Implementar Solução 2  |
| VGS        | 138/13,8 | TR-1    | 18,75                | 8.074      | 1,81          | Ausente  | Enrolamentos  | ok                  |            | 1,16                    | 913           | 1,22            | 955            | 1,38           | 1084          | Sim                         |
| VGS        | 138/13,8 | TR-2    | 18,75                | 8.072      | 1,69          | Eminente | Enrolamentos  | ok                  |            | 1,21                    | 945           | 1,26            | 990            | 1,42           | 1114          | Sim                         |

Solução 1: Substituir equipamentos associados ao transformador por outros com capacidade nominal maior (barramento, seccionadores, conectores, TCs, disjuntor geral BT ou outros)

Solução 2: Secar os Enrolamentos do transformador para eliminar a formação de bolhas

Liberado

Liberado c/ Restrição

Valor Crítico Atingido

**Tabela 7: Relação por Ordem Decrescente dos Teores de Nitrogênio dos Transformadores com Sistemas de Preservação de Bolsa, Membrana e Sílica**

| SE    | Trafo | Conservação | Ano Fabr. | Idade | Pot. MVA | Tensão | Umidade | Cor | Acidez | Tenão Interf. | O2    | N2     | CO   | CO2  | CO+ CO2 | 2FAL (ppm) | Fabricante | Tipo               | Nº Série  |
|-------|-------|-------------|-----------|-------|----------|--------|---------|-----|--------|---------------|-------|--------|------|------|---------|------------|------------|--------------------|-----------|
| JUQ   | TR-1  | Sílica gel  | 72        | 28    | 12,5     | 138    | 2,83    | 2,0 | 0,02   | 24            | 26296 | 141753 | 340  | 1681 | 2021    | 0,198      | SIEMENS    | KLHM 1354/138      | 500.138   |
| LAP   | TR-2  | Bolsa       | 80        | 20    | 18,8     | 138    | 3,81    | 1,5 | 0,01   | 37            | 10478 | 135948 | 251  | 2966 | 3217    |            | TOSHIBA    |                    | 60.392    |
| ANR   | TR-1  | Membrana    | 74        | 26    | 18,8     | 138    | 2,37    | 3,0 | 0,06   | 22            | 15285 | 120405 | 240  | 6814 | 7054    | 0,053      | BBC        | TD3LF              | SP-4.265  |
| JAR   | TR-1  | Sílica gel  | 87        | 13    | 12,5     | 138    | 1,71    | 2,0 | 0,01   | 35            | 12411 | 112006 | 411  | 2912 | 3323    | 0,028      | TRAFO      | TUC-10/12,5/145/15 | 64.717-G  |
| ARU   | TR-1  | Bolsa       | 79        | 21    | 18,8     | 138    | 1,65    | 2,0 | 0,00   | 33            | 13198 | 111682 | 753  | 4798 | 5551    | 0,020      | TUSA       | TLLN-7251/138B     | 500.537   |
| ATI   | TR-2  | Membrana    | 71        | 29    | 30       | 138    | 1,78    | 5,0 | 0,07   | 22            | 29494 | 109732 | 1119 | 3799 | 4918    | 0,471      | TUSA       | KLRM-1545T/138     | 500.372   |
| TAT-1 | TR-1  | Sílica gel  | 68        | 32    | 9        | 88     | 2,96    | 2,5 | 0,04   | 29            | 21564 | 109071 | 572  | 5587 | 6159    | 0,552      | AEG        | TLR7500-92         | 8.017     |
| BER-1 | TR-2  | Sílica gel  | 68        | 32    | 12,5     | 138    | 3,48    | 2,0 | 0,02   | 32            | 38515 | 109070 | 259  | 2427 | 2686    | 0,243      | AEG        | TLRF-10000/138     | 8.018     |
| VGS   | TR-2  | Sílica gel  | 76        | 24    | 18,8     | 138    | 1,69    | 4,0 | 0,01   | 35            | 23879 | 108980 | 538  | 2270 | 2808    | 0,271      | TUSA       | TLTR-15000 /1388   | 8.072     |
| ANG   | TR-1  | Sílica gel  | 65        | 35    | 10       | 138    | 2,2     | 2,0 | 0,03   | 31            | 44568 | 103604 | 257  | 2501 | 2758    | 0,180      | ASEA       | TOT-6509           | 20.238    |
| ANR   | TR-2  | Sílica gel  | 70        | 30    | 18,8     | 138    | 4,18    | 3,0 | 0,11   | 20            | 27527 | 102755 | 224  | 2148 | 2372    | 0,650      | ITEL       | PTOE               | 17.480    |
| TAM   | TR-2  | Sílica gel  | 57        | 43    | 10       | 138    | 1,54    | 2,0 | 0,06   | 23            | 13040 | 102135 | 858  | 7864 | 8722    | 0,140      | BBC        | T8000/1326         | 2.041     |
| PIP   | TR-2  | Sílica gel  | 77        | 23    | 18,8     | 138    | 2,52    | 2,0 | 0,03   | 29            | 9373  | 101043 | 418  | 2144 | 2562    | 0,014      | ASEA       | TMY-33             | 56.487    |
| CON   | TR-2  | Sílica gel  | 68        | 32    | 7,5      | 88     | 3,51    | 2,5 | 0,10   | 23            | 21958 | 100272 | 560  | 6443 | 7003    | 0,431      | AEG        | TLR-7500/92        | 8.015     |
| FRM   | TR-2  | Bolsa       | 78        | 22    | 18,8     | 138    | 2,11    | 2,5 | 0,05   | 23            | 3583  | 100075 | 843  | 3607 | 4450    | 0,149      | TUSA       | TLTR-15000/1388    | 8.096     |
| ATI   | TR-1  | Membrana    | 76        | 24    | 30       | 138    | 1,51    | 2,0 | 0,01   | 28            | 5559  | 99466  | 453  | 1904 | 2357    | 0,042      | TUSA       | KLRM-1545T/138     | 500.373   |
| LEM   | TR-2  | Bolsa       | 79        | 21    | 18,8     | 138    | 2,87    | 3,0 | 0,04   | 26            | 4851  | 98466  | 507  | 1904 | 2411    | 0,032      | ASEA       | TMY-33             | 57.562    |
| ARR-2 | TR-2  | Bolsa       | 75        | 25    | 18,8     | 138    | 3,26    | 2,0 | 0,01   | 33            | 12283 | 94482  | 871  | 4377 | 5248    | 0,055      | ASEA       | TMY-33             | 55.884    |
| GUA-1 | TR-1  | Sílica gel  | 80        | 20    | 30       | 138    | 1,5     | 1,0 | 0,01   | 38            | 10932 | 94186  | 127  | 2533 | 2660    | 0,002      | ASEA       | TMY-33             | 57.558    |
| UBA-2 | TR-1  | Sílica gel  | 79        | 21    | 18,8     | 138    | 3,38    | 3,0 | 0,03   | 34            | 18082 | 92735  | 594  | 3864 | 4458    | 0,139      | TUSA       | TLLN-7251/138B     | 500.538   |
| ITH-1 | TR-2  | Bolsa       | 87        | 13    | 30       | 138    | 2,65    | 2,0 | 0,01   | 35            | 8569  | 90604  | 788  | 2175 | 2963    | 0,010      | ASEA       | TMY-33             | 58.501    |
| SIS   | TR-1  | Sílica gel  | 74        | 26    | 12,5     | 88     | 2,82    | 1,5 | 0,02   | 34            | 8252  | 90553  | 151  | 2125 | 2276    | 0,132      | GE         | LN / LVF           | 5.100.594 |
| ARR-2 | TR-1  | Bolsa       | 78        | 22    | 18,8     | 138    | 2,44    | 3,0 | 0,07   | 26            | 8544  | 90552  | 556  | 2632 | 3188    | 0,050      | TUSA       | TLTR-15000 /1388   | 8.099     |
| PIP   | TR-1  | Sílica gel  | 75        | 25    | 18,8     | 138    | 3,88    | 1,5 | 0,04   | 22            | 2986  | 90442  | 407  | 2280 | 2687    | 0,060      | ASEA       | TMY-33             | 55.888    |
| ANG   | TR-2  | Sílica gel  | 65        | 35    | 10       | 138    | 2,65    | 2,0 | 0,02   | 32            | 33073 | 88945  | 597  | 3447 | 4044    | 0,246      | ASEA       | TOT-6509           | 11.681    |
| TAT-1 | TR-2  | Sílica gel  | 71        | 29    | 9        | 88     | 3,67    | 3,5 | 0,10   | 25            | 5376  | 88602  | 781  | 2816 | 3597    | 0,108      | GE         | TR-92              | 5.100.462 |
| SE    | Trafo | Conservação | Ano Fabr. | Idade | Pot. MVA | Tensão | Umidade | Cor | Acidez | Tenão Interf. | O2    | N2     | CO   | CO2  | CO+ CO2 | 2FAL (ppm) | Fabricante | Tipo               | Nº Série  |
| UBA-1 | TR-1  | Sílica gel  | 85        | 15    | 18,8     | 138    | 1,41    | 2,0 | 0,02   | 24            | 19238 | 87970  | 2131 | 4892 | 7023    | 0,060      | BBC        | TD3LF              | 4.263     |
| SFS   | TR-2  | Sílica gel  | 56        | 44    | 12,5     | 69     | 3,88    | 3,0 | 0,08   | 26            | 6093  | 87960  | 763  | 6689 | 7452    | 1,320      | GE         | OA/FA-T            | B-54.839  |

|           |              |                          |                      |              |                     |               |                      |            |               |                          |           |           |           |            |                    |                       |                   |                     |                 |
|-----------|--------------|--------------------------|----------------------|--------------|---------------------|---------------|----------------------|------------|---------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|--------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|-----------------|
| GUA-1     | TR-2         | Bolsa                    | 81                   | 19           | 30                  | 138           | 2,48                 | 4,0        | 0,03          | 27                       | 24749     | 87625     | 630       | 2900       | 3530               | 0,098                 | TRAFO             | TUC-25-30/138/15    | 48.976          |
| BJP       | TR-1         | Sílica gel               | 72                   | 28           | 18,8                | 138           | 3,2                  | 1,0        | 0,01          | 31                       | 9333      | 86147     | 437       | 5089       | 5526               | 0,020                 | AEG               | TLR-15000S138       | 8038            |
| FRM       | TR-1         | Bolsa                    | 78                   | 22           | 18,8                | 138           | 1,58                 | 1,5        | 0,02          | 34                       | 17216     | 85783     | 631       | 1865       | 2496               | 0,018                 | TUSA              | TLTR-15000/1388     | 8.097           |
| VGS       | TR-1         | Bolsa                    | 76                   | 24           | 18,8                | 138           | 1,81                 | 3,0        | 0,04          | 29                       | 2790      | 82804     | 274       | 2295       | 2569               | 0,093                 | TUSA              | TLTR-15.000/1388    | 8.074           |
| GUA-3     | TR-1         | Sílica gel               | 76                   | 24           | 18,8                | 138           | 1,99                 | 2,5        | 0,02          | 33                       | 21565     | 82294     | 403       | 5189       | 5592               | 0,081                 | TUSA              | TLRF-10000/138      | 8.071           |
| PAF       | TR-1         | Sílica gel               | 69                   | 31           | 10                  | 69            | 3,07                 | 3,0        | 0,13          | 18                       | 29471     | 81974     | 229       | 3327       | 3556               | 0,201                 | COEMSA            | TOFF-10/695         | 30.568          |
| LEM       | TR-1         | Bolsa                    | 79                   | 21           | 18,8                | 138           | 2,36                 | 2,0        | 0,02          | 35                       | 6252      | 81881     | 317       | 2363       | 2680               | 0,023                 | ASEA              | TMY-33              | 57.561          |
| CON       | TR-1         | Sílica gel               | 68                   | 32           | 7,5                 | 88            | 2,53                 | 2,5        | 0,03          | 34                       | 15602     | 80328     | 514       | 4770       | 5284               | 0,256                 | AEG               | TLR-7500/92         | 8.016           |
| CAJ       | TR-1         | Sílica gel               | 72                   | 28           | 12,5                | 138           | 3,4                  | 2,0        | 0,02          | 30                       | 38103     | 80095     | 450       | 5343       | 5793               | 0,068                 | ITEL              | PTOE                | 20.174          |
| PAF       | TR-2         | Sílica gel               | 69                   | 31           | 12,5                | 69            | 3,07                 | 4,0        | 0,19          | 18                       | 25494     | 79789     | 520       | 6402       | 6922               | 1,653                 | BBC               | TYA                 | SPT-1.845       |
| TAM       | TR-1         | Sílica gel               | 65                   | 35           | 10                  | 138           | 3,13                 | 4,0        | 0,13          | 20                       | 4375      | 76971     | 661       | 3621       | 4282               | 0,663                 | GE                | TR-92               | 5.100.224       |
| GUA-3     | TR-2         | Sílica gel               | 75                   | 25           | 18,8                | 138           | 5,87                 | 1,5        | 0,03          | 27                       | 9713      | 76650     | 214       | 1648       | 1862               | 0,068                 | ASEA              | TMY-33              | 55.887          |
| PSS-1     | TR-2         | Sílica gel               | 71                   | 29           | 18,8                | 138           | 2,92                 | 2,5        | 0,05          | 27                       | 8577      | 73706     | 292       | 4477       | 4769               | 0,592                 | ITEL              | PTOE                | 17.483          |
| ITH-1     | TR-1         | Bolsa                    | 95                   | 5            | 33                  | 138           | 1,67                 | 0,5        | 0,03          | 29                       | 13082     | 73637     | 379       | 1115       | 1494               | 0,025                 | TRAFO             | TUC25/33,3          | KA1165A001      |
| MOG-2     | TR-1         | Bolsa                    | 79                   | 21           | 18,8                | 138           | 3,55                 | 2,5        | 0,02          | 28                       | 3002      | 72239     | 198       | 2561       | 2759               | 0,020                 | ASEA              | TMY-33              | 57.735          |
| BER-1     | TR-1         | Sílica gel               | 56                   | 44           | 10                  | 138           | 2,76                 | 2,0        | 0,02          | 35                       | 12393     | 72216     | 1183      | 4291       | 5474               | 1,694                 | GE                | OA/FA-T             | B51684          |
| LIM-4     | TR-1         | Bolsa                    | 82                   | 18           | 30                  | 138           | 0,9                  | 1,5        | 0,01          | 32                       | 6189      | 68811     | 355       | 2484       | 2839               | 0,021                 | BBC               | TD3LF               | 15.304          |
| MOG-2     | TR-2         | Sílica gel               | 78                   | 22           | 18,8                | 138           | 1,84                 | 2,5        | 0,04          | 27                       | 2960      | 68210     | 131       | 1179       | 1310               | 0,061                 | ITEL              | PTOE                | 32.131          |
| ARU       | TR-2         | Bolsa                    | 82                   | 18           | 18,8                | 138           | 1,09                 | 1,0        | 0,01          | 34                       | 7205      | 67514     | 133       | 1153       | 1286               | 0,020                 | TUSA              | TLLN-7251/138B      | 500.974         |
| SJB-1     | TR-2         | Sílica gel               | 70                   | 30           | 18,8                | 138           | 3,74                 | 2,5        | 0,04          | 27                       | 9299      | 64025     | 485       | 5161       | 5646               | 0,093                 | ITEL              | PTOE                | 17.481          |
| LIM-4     | TR-2         | Bolsa                    | 81                   | 19           | 18,8                | 138           | 2,17                 | 2,5        | 0,01          | 34                       | 18056     | 63825     | 483       | 1647       | 2130               | 0,022                 | ASEA              | TMY-33              | 58.500          |
| RIC-3     | TR-1         | Membrana                 | 92                   | 8            | 33                  | 138           | 2,73                 | 2,0        | 0,01          | 38                       | 4268      | 59994     | 898       | 4417       | 5315               | 1,005                 | TRAFO             | TUC-25/33,3-145/15R | KA0629A001      |
| GUA-2     | TR-1         | Bolsa                    | 94                   | 6            | 33                  | 138           | 2,63                 | 3,0        | 0,04          | 25                       | 17868     | 59185     | 469       | 1764       | 2233               | 0,008                 | TRAFO             | TUC23/33,3          | KA0984A002      |
| UBA-1     | TR-2         | Sílica gel               | 96                   | 4            | 30                  | 138           | 1,29                 | 0,5        | 0,01          | 33                       | 8750      | 46736     | 347       | 507        | 854                |                       | SIEMENS           | TLSN-7752           | 305.088         |
| LAP       | TR-1         | Bolsa                    | 80                   | 20           | 18,8                | 138           | 2,35                 | 1,0        | 0,01          | 33                       | 5992      | 44503     | 176       | 1321       | 1497               | 0,005                 | TOSHIBA           |                     | 59.847          |
| LIM-2     | TR-1         | Bolsa                    | 75                   | 25           | 18,8                | 138           | 1,16                 | 2,5        | 0,03          | 29                       | 13287     | 39673     | 186       | 539        | 725                | 0,110                 | ASEA              | TMY-33              | 55.882          |
| GUA-2     | TR-2         | Bolsa                    | 93                   | 7            | 33                  | 138           | 2,05                 | 1,5        | 0,03          | 27                       | 5575      | 31563     | 415       | 1561       | 1976               | 0,006                 | TRAFO             | TUC-25/33,3         | KA768A001       |
| SIS       | TR-2         | Sílica gel               | 74                   | 26           | 12,5                | 88            | 2,51                 | 2,0        | 0,01          | 34                       | 7480      | 27014     | 692       | 2481       | 3173               | 0,021                 | GE                | LN / LVF            | 5.100.595       |
| <b>SE</b> | <b>Trafo</b> | <b>Conserva-<br/>ção</b> | <b>Ano<br/>Fabr.</b> | <b>Idade</b> | <b>Pot.<br/>MVA</b> | <b>Tensão</b> | <b>Umi-<br/>dade</b> | <b>Cor</b> | <b>Acidez</b> | <b>Tenão<br/>Interf.</b> | <b>O2</b> | <b>N2</b> | <b>CO</b> | <b>CO2</b> | <b>CO+<br/>CO2</b> | <b>2FAL<br/>(ppm)</b> | <b>Fabricante</b> | <b>Tipo</b>         | <b>Nº Série</b> |
| PSS-1     | TR-1         | Bolsa                    | 76                   | 24           | 18,8                | 138           | 2,6                  | 3,0        | 0,04          | 29                       | 3422      | 16994     | 19        | 90         | 109                | 0,027                 | TUSA              | TLTR-15.000/1388    | 8.070           |
| SFS       | TR-1         | Sílica gel               | 56                   | 44           | 12,5                | 69            | 1,58                 | 2,0        | 0,02          | 29                       | 4471      | 14022     | 5         | 49         | 54                 | 1,116                 | GE                | OA/FA-T             | B-54.840        |
| SJB-1     | TR-1         | Sílica gel               | 71                   | 29           | 18,8                | 138           | 3,9                  | 3,0        | 0,07          | 25                       | 17187     | 12964     | 212       | 1247       | 1459               | 0,243                 | ITEL              | PTOE                | 17.482          |

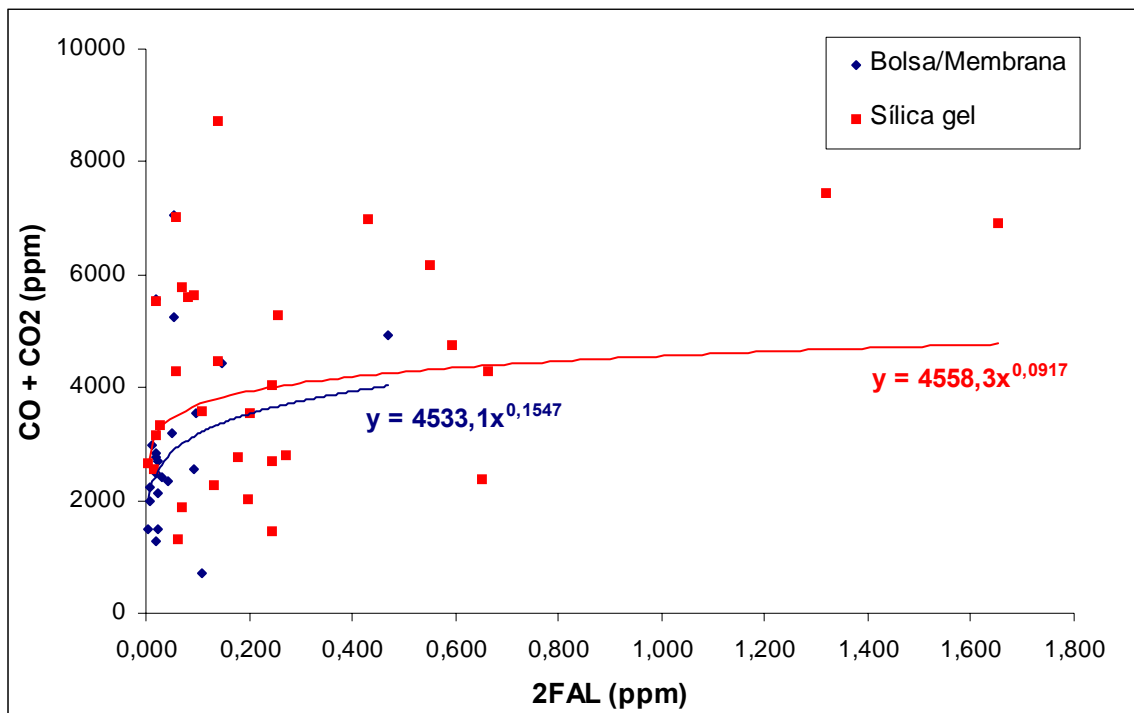


Figura 9 – Teor de CO+CO<sub>2</sub> em Relação ao Teor de Furfural (2Fal)

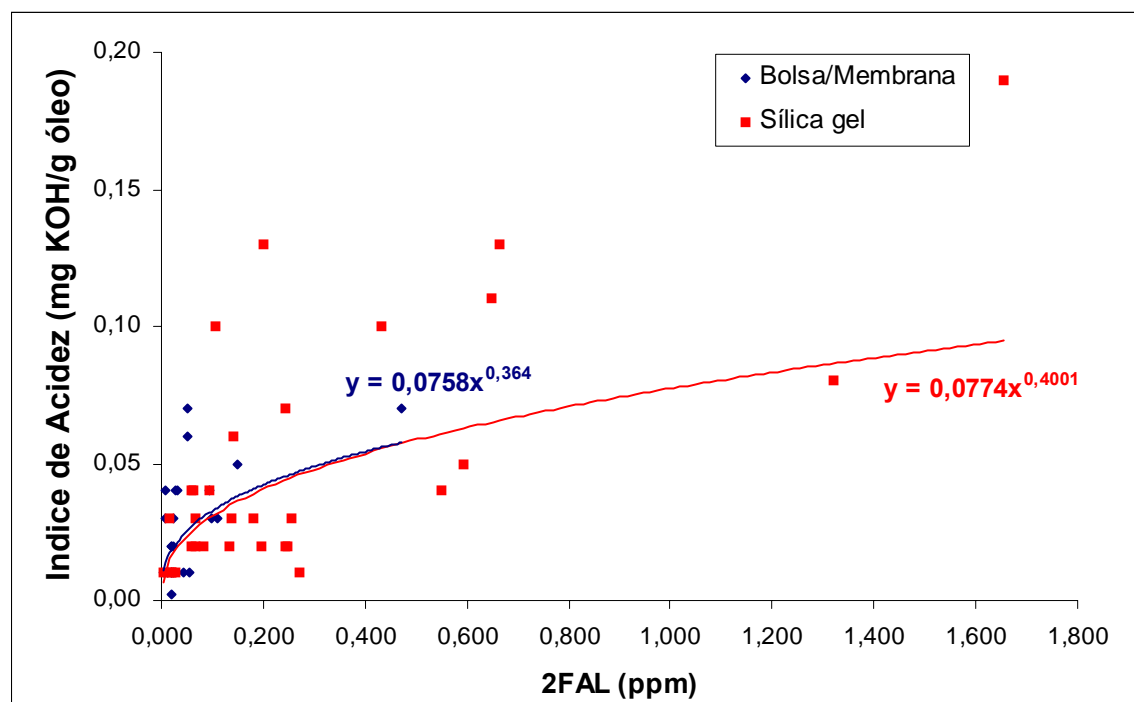


Figura 10 – Índice de Acidez em Relação ao Teor de Furfural (2Fal)

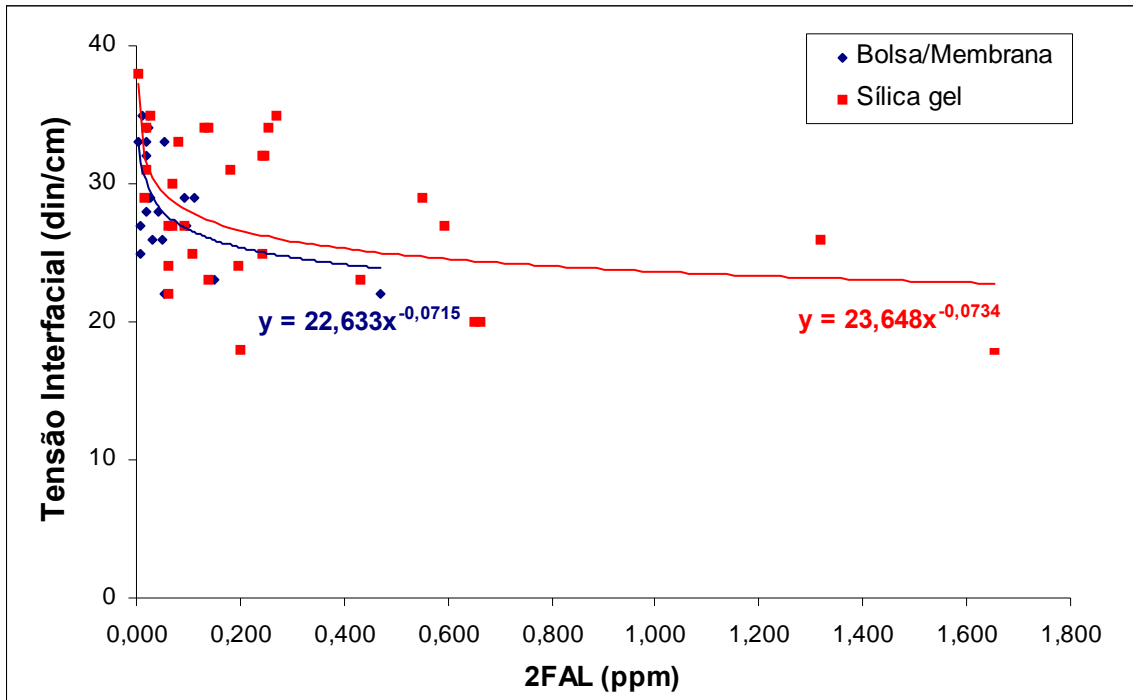


Figura 11 – Tensão Interfacial em Relação ao Teor de Furfural (2Fal)

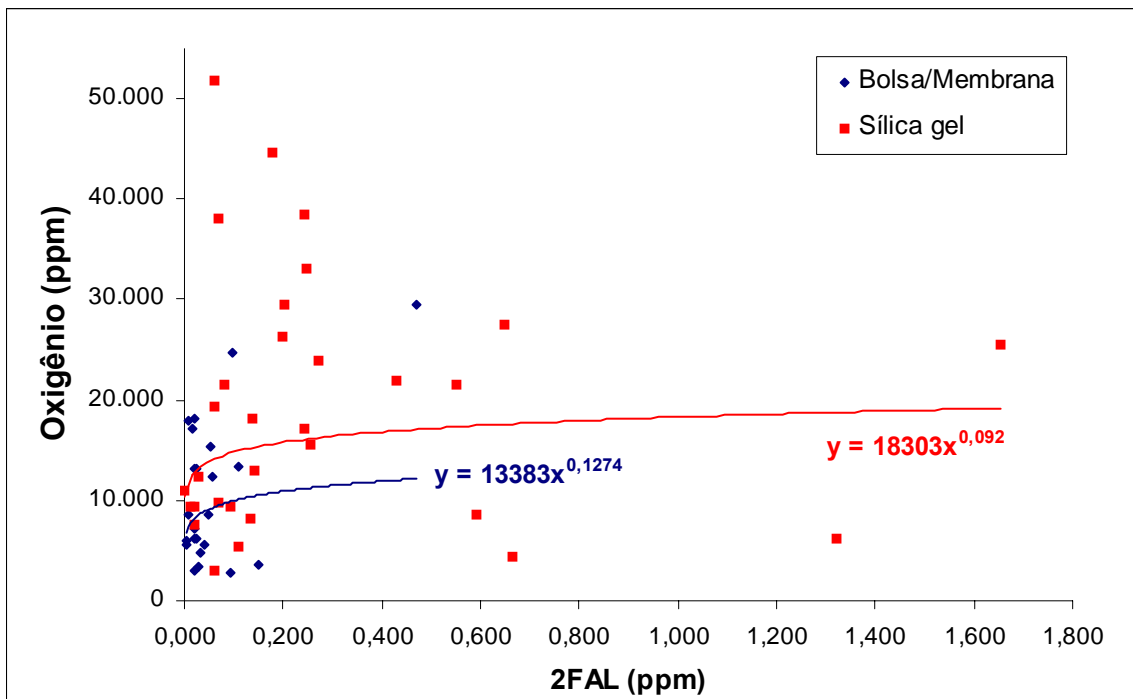
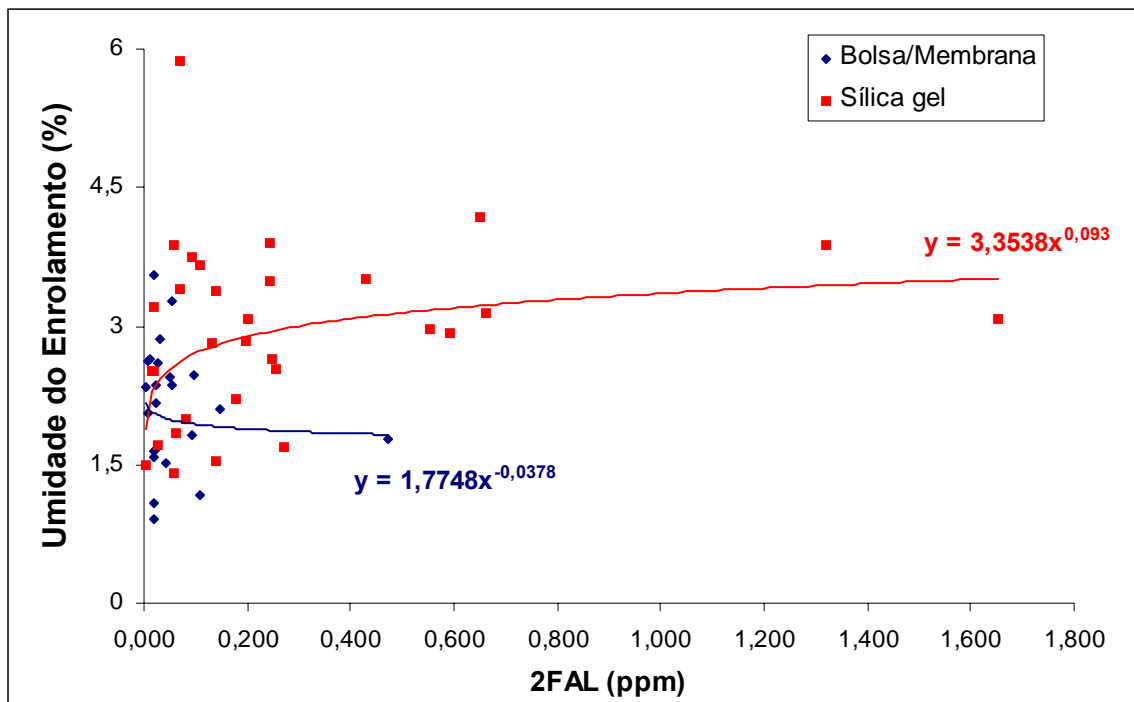
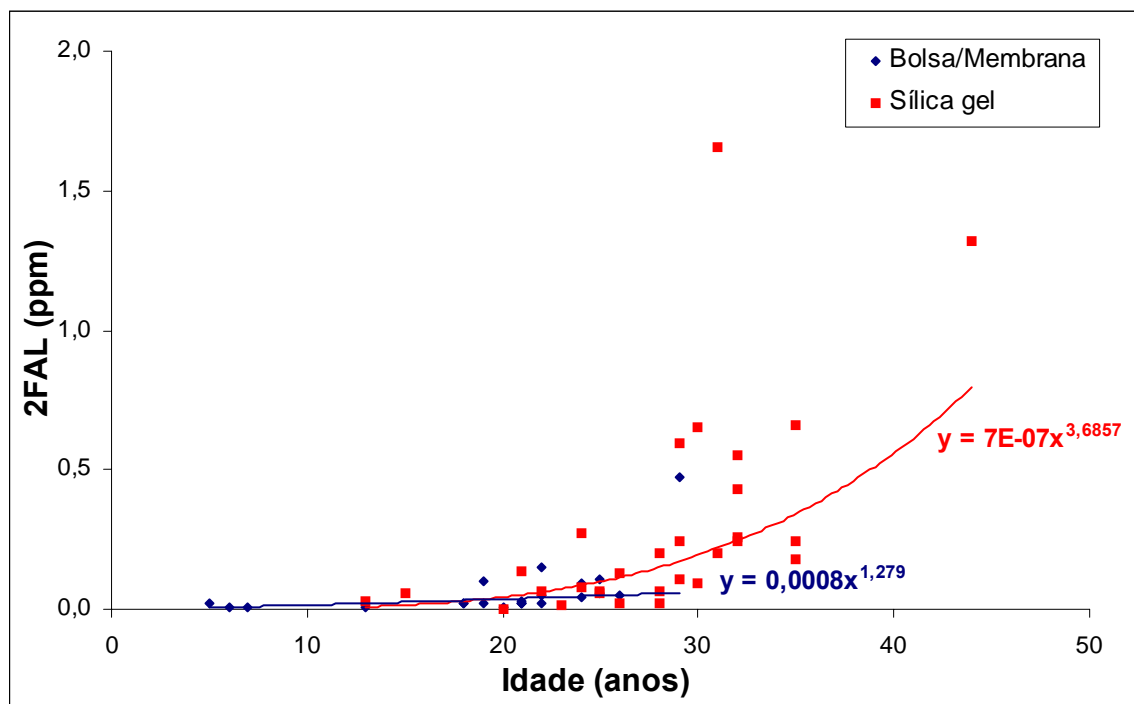


Figura 12 – Teor de Oxigênio em Relação ao Teor de Furfural (2Fal)



**Figura 13** – Teor de Umidade dos Enrolamentos em Relação ao Teor de Furfural (2Fal)



**Figura 14** – Teor de Furfural (2Fal) em Relação à Idade dos Transformadores

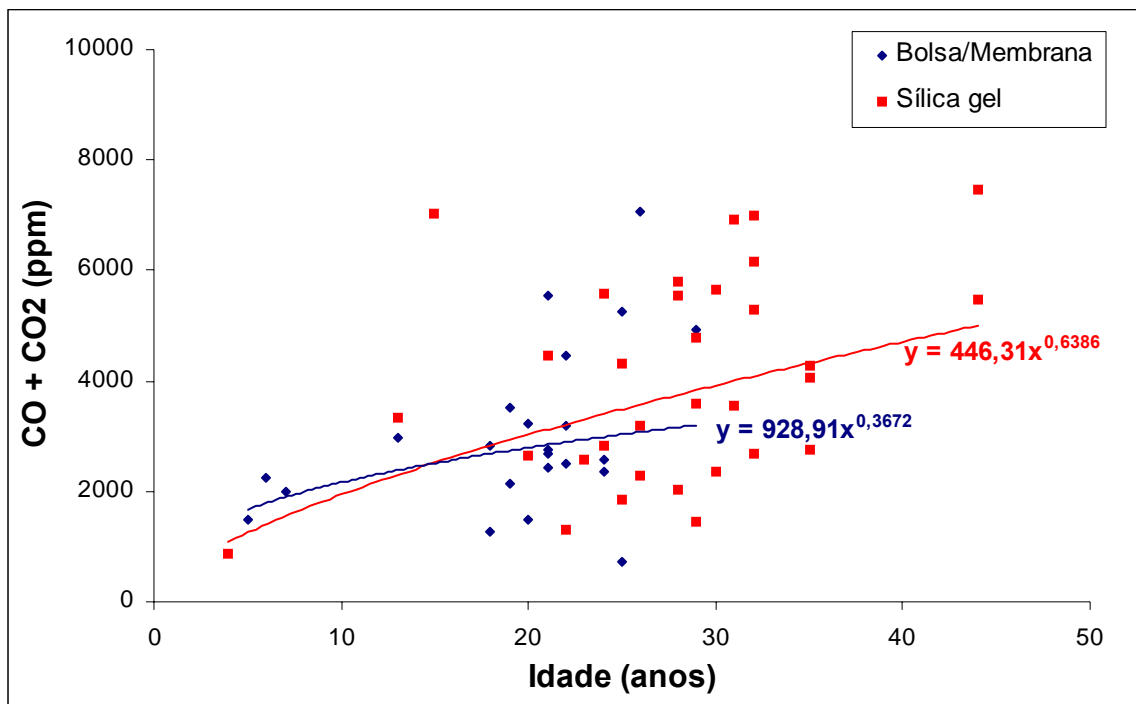


Figura 15 – Teor de CO+CO<sub>2</sub> em Relação à Idade dos Transformadores

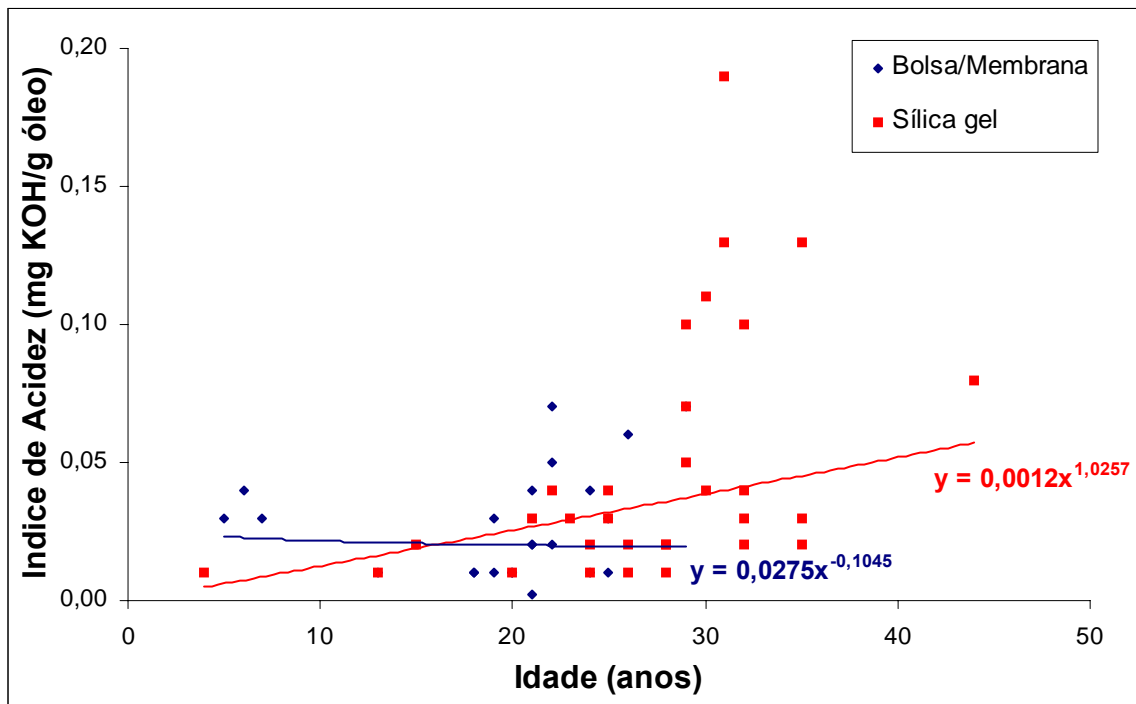


Figura 16 – Índice de Acidez em Relação à Idade dos Transformadores

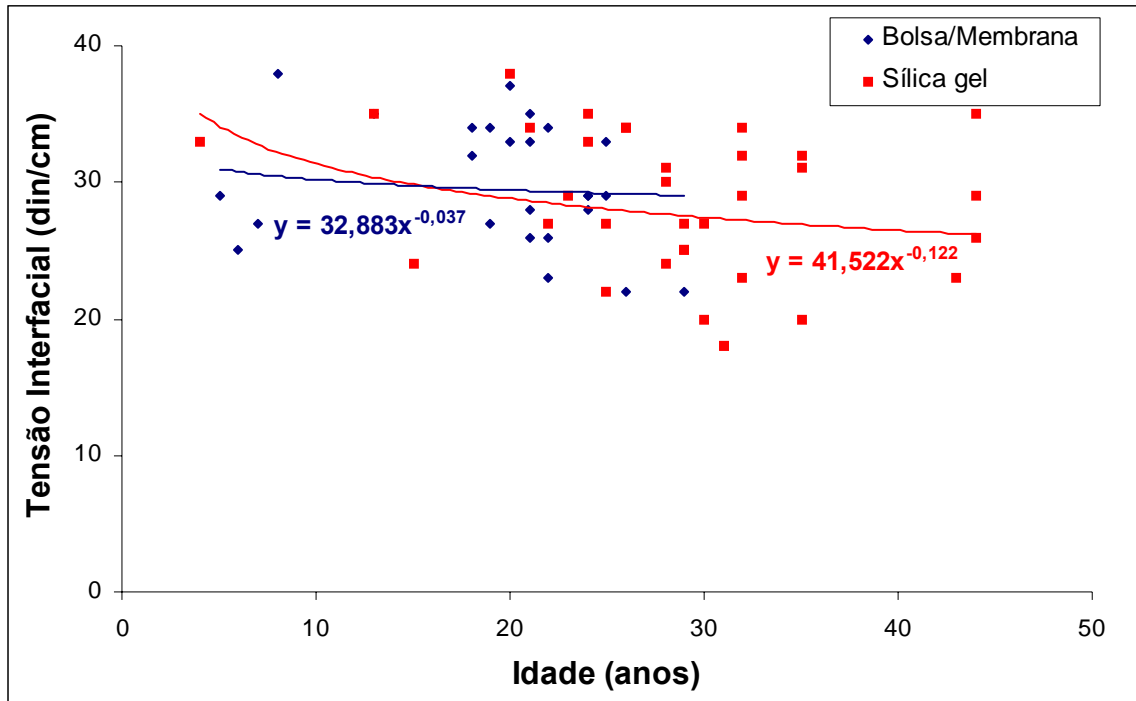


Figura 17 – Tensão Interfacial em Relação à Idade dos Transformadores

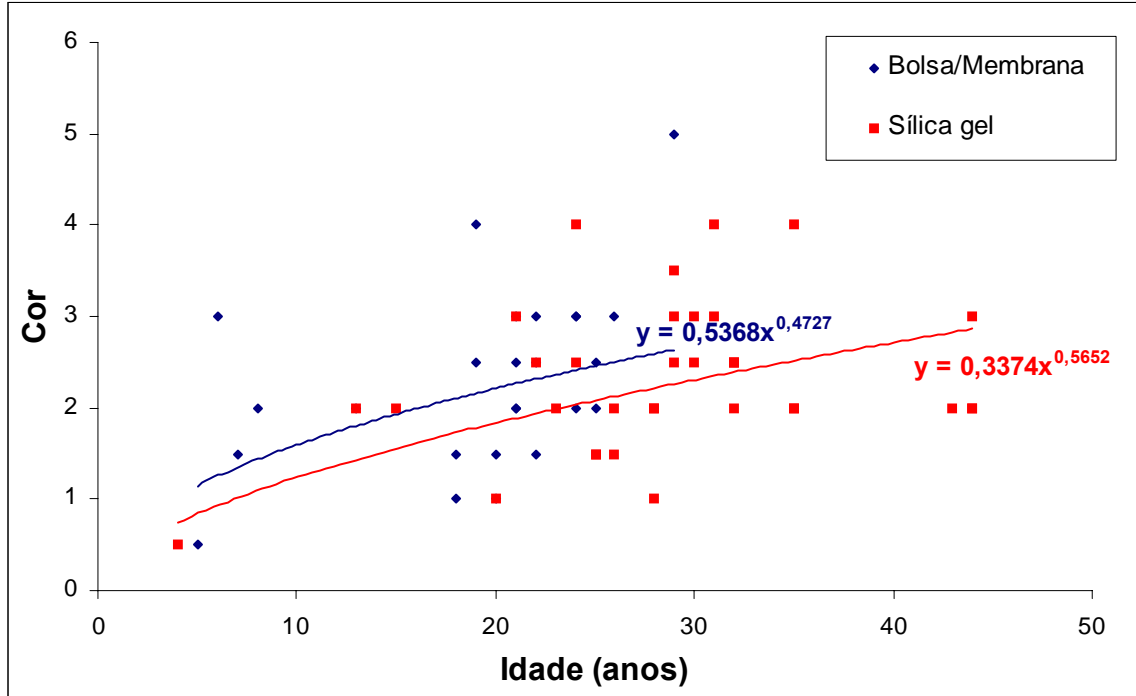
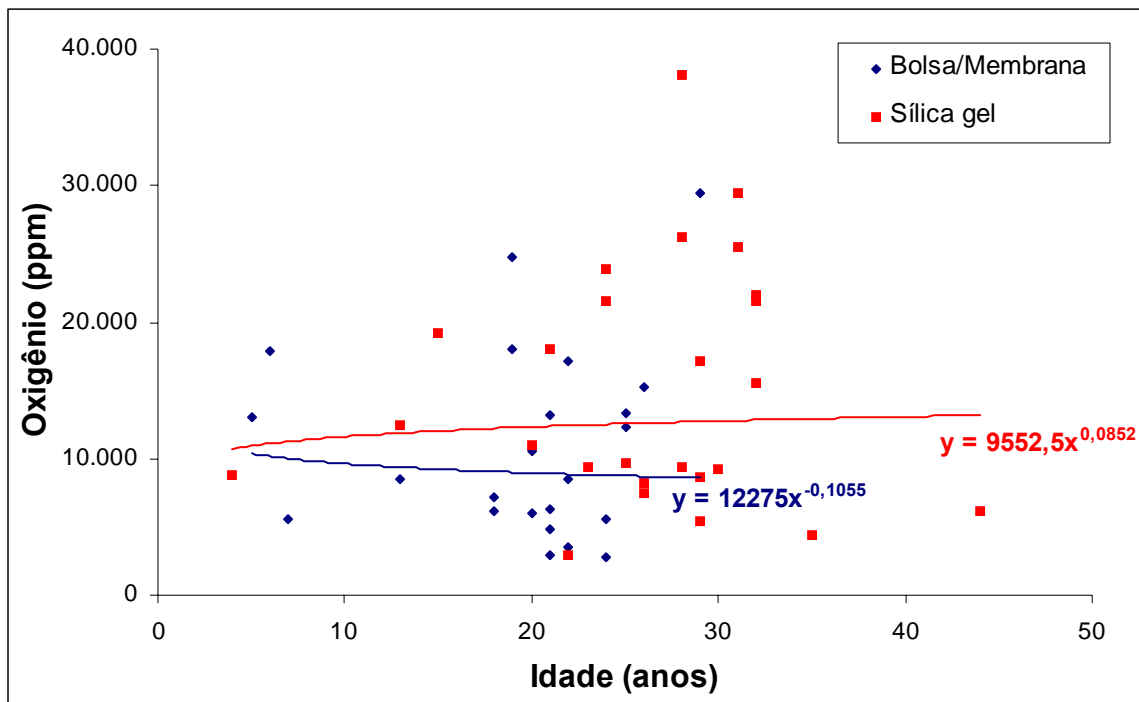
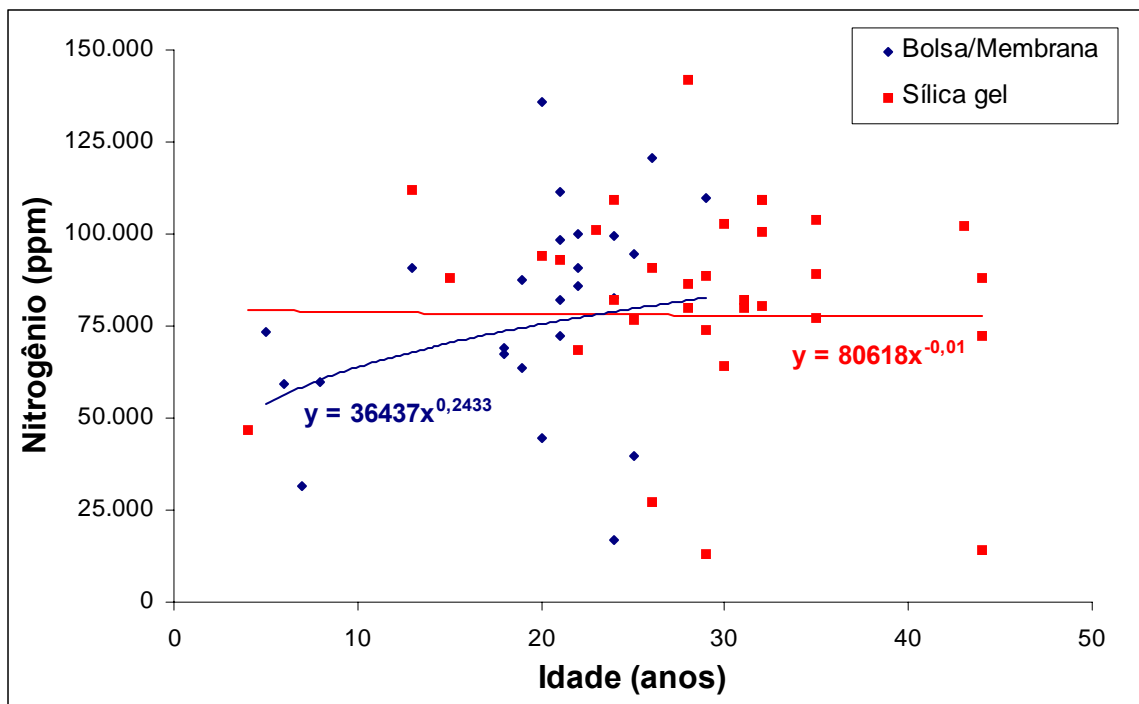


Figura 18 – Cor do Óleo em Relação à Idade dos Transformadores



**Figura 19** – Teor de Oxigênio do Óleo em Relação à Idade dos Transformadores



**Figura 20** – Teor de Nitrogênio do Óleo em Relação à Idade dos Transformadores

## 19. CONCLUSÃO

A partir do levantamento de dados por meio de ensaios de campo e de laboratório, foi possível estabelecer um método para avaliação do teor de água do isolamento sólido de transformadores energizados.

Observou-se que cerca de 67% de um total de 59 transformadores estudados está com teores de umidade nos enrolamentos entre 2 e 4%. A norma brasileira de carregamento de transformadores, NBR 5416/97 [8], estabelece o valor máximo de 1% de teor de umidade nos enrolamentos para carregamento e vida útil conforme limites de projeto.

Com relação ao teor de umidade dos enrolamentos, o sistema de preservação de óleo por membrana ou bolsa não apresentou desempenho superior ao sistema por sílica. Cerca de 60% de um total de 25 transformadores com membrana ou bolsa está com teores de umidade nos enrolamentos entre 2 e 4%, sendo que a idade da maioria desses equipamentos é inferior a 25 anos. Em torno de 75% de um total de 34 transformadores com sílica está com teores de umidade nos enrolamentos entre 2 e 4%, e a idade da maioria é acima de 25 anos.

Avaliaram-se os principais parâmetros para o desenvolvimento de modelo envolvendo falhas de transformadores em contingências. O modelo desenvolvido estabelece que seja determinada a umidade dos enrolamentos e diagnosticada a condição de preservação do óleo, a fim de que possa ser analisada a possibilidade de falhas em contingência e possam ser emitidos diagnósticos.

O estudo da influência da umidade na possibilidade de falhas demonstrou que 35 transformadores do plano piloto (59%) estão em condições críticas quanto à possibilidade de formação de bolhas em contingência.

A análise dos dados evidencia que a dispersão é muito grande, não havendo correlações entre idade, sistemas de preservação do óleo, classe de tensão, família, etc. Portanto, o modelo determinístico sugerido demonstra-se bastante adequado, pois seu objetivo é estudar cada transformador individualmente em razão da multiplicidade de variáveis influenciando o desempenho desses equipamentos em campo.

Em razão dos elevados teores de umidade dos enrolamentos e de oxigênio no óleo na maioria dos transformadores analisados, deverão ser estudadas ações, visando a minimizar o efeito da contaminação atmosférica. Dentre as possibilidades de estudo, devem ser avaliados sistemas mais adequados de preservação de óleo, a fim de evitar a continuidade deste tipo de contaminação.

Foram estudadas as influências do envelhecimento térmico e por contaminação do transformador. O estudo comparativo entre a umidade dos enrolamentos e o teor de furfural revelou aspectos bastante interessantes quanto ao tipo de envelhecimento do papel isolante dos transformadores. Para os

transformadores com sílica, pode-se ver uma tendência de aumento do teor de furfural para valores mais altos de umidade dos enrolamentos.

Observou-se que há cinco transformadores (8% do total) com teor de furfural acima de 1,0 ppm (tabela 7), o que é considerado alto. Um deles requer atenção especial, pois tem apenas nove anos de idade.

Os índices de acidez estão baixos apesar de vários transformadores estarem na faixa entre 20 e 30 anos. Ao mesmo tempo a tensão interfacial está bastante alta na média. Entretanto, os óleos estão com cores escuras, o que indica que devem ter sido submetidos a processos de regeneração. Apesar dos esforços e gastos para manter os óleos em bom estado, seu principal agente de degradação, o oxigênio, continua abundante.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] McNUTT, W.; BASSETTO F., A.; GRIFFIN, P. **Tutorial on Electrical-Grade Insulating Papers in Power Transformers.** *1993 Doble Clients Committees Fall Meeting.*
- [2] GRIFFIN, P.J. **Water in Transformers – so What.** *National Grid Conference on Condition Monitoring in High Voltage Substations, Dorling, maio 1995.*
- [3] OOMMEN, T.V.; PETRIE, E.M.; LINDGREN, S.R. **Bubble Generation in Transformer Windings under Overload Conditions.** *Proceedings of the Sixty-second Annual International Conference of Doble Clients, 1995, sec. 8.5.*
- [4] DAVYDOV, V.G.; ROIZMAN, O.M.; BUNWICH, W.J. **Transformer Insulation Behavior during Overload.** *Proceedings of EPRI Substation Equipment Diagnostics Conference, New Orleans, 1997.*
- [5] MAK, J. **Influência da Cor na Temperatura de Operação de Transformadores,** CPFL, ago, 1979.
- [6] MONTSINGER, V.M. & WETHERILL, E L. **Manual Standard del Ingeniero Electricista,** A.E. Knowlton, v. 1, p. 683 – 704, 1930.
- [7] IEEE **A Guide for Evaluating the Effect of Solar Radiation on Outdoor Metal - Clad Switchgear,** no. 144.
- [8] ABNT **Procedimentos para Carregamento de Transformadores de Potência,** NBR 5416/97, 1997.
- [9] GRIFFIN, P.J.; SOKOLOV, V.; VANIN, B. **Moisture Equilibrium and Moisture Migration within Transformer Insulation System,** *CIGRE SC12 “Transformer” Colloquium, Budapeste, julho 1999.*

- [10] DU, Y.; ZAHN, M.; LESIEURE, B.; MAMISHEV, A.; LINDGREN, S. **Moisture Equilibrium in Transformer Paper-Oil System**, IEEE Electrical Insulation Magazine, jan/fev. 1999, v.15, n.1
- [11] OOMMEN, T.V. On-Line **Moisture Monitoring in Transformers and Oil Processing Systems**. *CIGRE Symposium, Berlin, 1993, Paper 110-03.*
- [12] KAUFMAN, R.B.; SHIMANSKY, C.; MC FADIEN, E.J. **Gas and Moisture Equilibrium in Transformer Oil**, Transactions AIEE, 1955, v.74, p.111.
- [13] SOKOLOV, V.; VANIN, B.; GRIFFIN, P.J. **Tutorial on deterioration and Rehabilitation of Transformer Insulation**, *CIGRE WG 12.18 "Life Management" Colloquium, Lodz, Polônia, 1998.*
- [14] MCNUTT, W. J.; ROUSE, T. O.; KAUFMANN, G. H. **Mathematical modelling of bubble evolution in transformers**, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, fev. 1985, v. PAS-104, n. 2.