

**GRUPO: VIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (GSE)**

**PROGRAMA GP2FAL - A SUBSTITUIÇÃO DO GP POR UMA TÉCNICA NÃO INVASIVA  
PARA DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES**

Carlos J. Dupont(\*)  
Luiz A. V. Cheim

José B. Fernandez  
Francisco A. Filho

**CEPEL**

**RESUMO**

Este trabalho apresenta as últimas modificações realizadas no modelo teórico experimental implementado no programa computacional "Gp2Fal", apresentados em (3) e em (4), que objetiva a avaliação da vida dos transformadores a partir do grau de polimerização (GP) do papel isolante e de sua correlação com o teor de 2-Furfuraldeído (2Fal) dissolvido no óleo. As modificações apresentadas adequam o modelo a condições de carga variável, introduzem uma representação para o efeito do oxigênio sobre o envelhecimento do papel isolante e modificam a unidade dos valores de 2Fal de ppm ( $\text{mg}_{2\text{fal}}/\text{L}_{\text{óleo}}$ ) para  $\text{mg}_{2\text{fal}}/\text{kg}_{\text{papel}}$  visando levar em consideração a relação entre o volume de óleo e a massa de papel nos transformadores.

**PALAVRAS-CHAVE:**

Transformadores, Envelhecimento, Perda de Vida

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Instituições e pesquisadores de vários países preocupam-se há muitos anos com a degradação do isolamento sólido utilizado em transformadores, tendo identificado a degradação térmica do papel isolante como um dos principais fatores responsáveis por diversas falhas importantes ocorridas nestes equipamentos.

A técnica analítica tradicional para avaliação do grau de deterioração do papel isolante é a medição do grau

de polimerização (GP), medição esta que é realizada diretamente em amostras de papel retiradas dos transformadores. Entretanto, a dificuldade de acesso ao papel devido à necessidade de abertura da unidade de transformação, levou ao desenvolvimento de novas técnicas analíticas não invasivas de avaliação.

A técnica não invasiva mais difundida para avaliação do grau de envelhecimento da isolamento sólida e para a definição de uma expectativa de vida em transformadores é a medição do teor dissolvido de 2 furfuraldeído (2Fal), composto gerado somente pela degradação do papel durante sua vida útil e que pode ser analisado diretamente no óleo mineral isolante.

Para uma análise crítica da eficiência da medição do teor de 2Fal como técnica de avaliação do grau de deterioração da isolamento sólida, é necessário correlacioná-lo com o GP medido na isolamento.

Nos últimos anos muitos modelos de correlação foram apresentados na literatura internacional, alguns utilizando experiências laboratoriais e outros dados de campo. Todos, entretanto, partindo de princípios idênticos, ou seja, correlacionando diretamente através de uma única curva de regressão o 2Fal, que é uma variável global (mesmo teor em todos os pontos do óleo), com o GP, que é uma variável pontual (cada ponto das bobinas dos transformadores apresenta um GP distinto, basicamente função da temperatura e do tempo de operação). Como consequência variáveis importantes, como variações nos projetos dos transformadores e suas diferentes condições operativas ao longo dos anos, não eram modeladas de forma

conveniente e as grandes dispersões que se apresentavam nos dados de campo não podiam ser explicadas de forma coerente.

Como um grande número de transformadores instalados e em operação no setor elétrico brasileiro apresentam idade superior a 50% da vida estimada, para melhor direcionamento do aspecto operativo e de investimentos no setor, torna-se extremamente importante o desenvolvimento de um método de avaliação seguro da perda de vida percentual (PV%) e da expectativa de vida desses equipamentos.

Por isto, as empresas componentes do SCM/GCOI, por meio de seus representantes nos grupos de trabalho GTMS e CFQ, propuseram que um grande estudo fosse realizado com o objetivo de se formar um banco de dados do setor elétrico brasileiro baseado no GP e no 2Fal.

O CEPEL, coordenado por uma Comissão constituída pelo SCM, com a colaboração de empresas do setor elétrico que cederam seus dados de campo, elaborou um banco de dados, o qual, juntamente com resultados iniciais e valores já existentes de estudos experimentais de laboratório em protótipos de transformadores (1, 2, 3), foi utilizado na adaptação de um modelo matemático. O modelo intrinsecamente esclareceu as já citadas dispersões nos dados, estabeleceu correlações, permitiu avaliar o GP do papel isolante e prever a expectativa de vida dos transformadores a partir de dados de 2Fal, das características construtivas e do seu tempo de operação.

Um programa computacional (Gp2Fal versão 1.0) incorporando o modelo foi distribuída no início de 1998 para as empresas que cederam seus dados e apresentado no II SEMASE (4).

Alguns aperfeiçoamentos foram acrescentados desde então ao modelo – representação do efeito da presença do oxigênio dissolvido no óleo sobre o envelhecimento e consideração da relação entre o volume de óleo e massa total de papel - melhorando seu desempenho teórico. Neste trabalho, as modificações realizadas no modelo de (3) são esclarecidas, apresentando-se a versão atualizada.

Resultados de análises realizadas com o modelo são apresentados no trabalho, como exemplos para possíveis discussões do alcance, possibilidades e dificuldades ainda existentes para uso do 2Fal como ferramenta de diagnóstico do envelhecimento de transformadores, em substituição ao GP.

O programa Gp2Fal é utilizado atualmente no CEPEL como ferramenta auxiliar na avaliação do estado operativo e envelhecimento de transformadores, tendo demonstrado ser de reconhecida valia.

## 2.0 – ADAPTAÇÕES DO MODELO GP2FAL

Os passos adotados para o desenvolvimento do modelo matemático básico inicial, relacionando a perda de vida percentual (equação de Arrhenius) com o GP e o 2Fal, para regime de carga com temperatura constante no tempo, bem como, as considerações e simplificações adotadas para seu desenvolvimento já foram discutidas em (3) e não serão aqui re-editadas.

Adaptações foram realizadas sobre o modelo básico de (3), conforme descritas a seguir, com os seguintes objetivos:

- Para a utilização do modelo em regimes de carga e temperatura variáveis (que correspondem à realidade operativa dos transformadores em campo);
- Para considerar os efeitos da relação entre o volume de óleo e a massa do papel (que altera os teores de 2Fal quando medidos em ppm);
- Para representar os efeitos teóricos da presença do oxigênio (que atua como agente catalisador acelerando o envelhecimento do papel);
- Para a adaptação do modelo a valores iniciais medidos de 2Fal (cujos limites inferiores são dependentes da resolução dos equipamentos de avaliação dos teores medidos) e de GP (que apresentam valores iniciais da ordem de 1100 e finais da ordem de 150 – para PV%=100%).

### 2.1 – Adaptação do modelo a um carregamento variável

Quando da aplicação do modelo básico de (3) a situações operativas reais de campo, deve-se observar que aquele adota uma temperatura fixa de operação do transformador ao longo do tempo. Esta não é em absoluto a situação prática real.

Em um caso prático, a temperatura do óleo e dos enrolamentos de um transformador variam em função da temperatura ambiente, dos parâmetros térmicos do transformador (5) e do ciclo de carregamento diário a ele imposto.

Os ciclos de carga dependem, basicamente, das condições operativas do sistema, podendo um transformador operar tanto em condições de carga

bem abaixo da nominal quanto até 130% (ou mais) desta por algumas horas em situações de emergência.

Durante um ciclo de carga, diferentes taxas de variação da perda de vida ocorrem. Como a evolução da perda de vida percentual PV% segundo Arrhenius segue uma equação exponencial, essas taxas serão tanto maiores quanto maiores forem as temperaturas de enrolamento atingidas. Desta forma, não é viável tomar-se a média aritmética das temperaturas ao longo do ciclo de operação dos enrolamentos para uso no modelo.

Uma forma de solução para o problema é determinar, qual a temperatura equivalente em um regime constante de carga ( $T_{eq}$ ), que conduz no tempo total do ciclo de operação (tciclo) considerado, à PV%<sub>ciclo</sub> atingida neste ciclo variável. A PV%<sub>ciclo</sub> em questão, pode ser calculada desde que monitore-se a temperatura do enrolamento ao longo do tempo, ou então, conforme (6), desde que se conheçam os parâmetros térmicos do transformador.

A temperatura equivalente deve ser obtida da equação de Arrhenius:

$$PV\%_{ciclo} = 100 \cdot t_{ciclo} \cdot 10^{-\left(A + \frac{B}{T_{eq}}\right)}$$

Então:

$$T_{eq} = \frac{B}{2 - A + \log(t_{ciclo}) - \log(PV\%_{ciclo})}$$

Faz-se ainda necessária uma adaptação das equações do modelo de (3), uma vez que as temperaturas do transformador no topo e no fundo consideradas naquele trabalho, respectivamente  $T_{máx}$  e  $T_{min}$ , também variarão conforme o ciclo de carga.

Isto pode ser obtido, fazendo-se o limite para  $T_{máx}$  tendendo a  $T_{meio}$  e simultaneamente  $T_{min}$  tendendo a  $T_{meio}$ .

Procedendo desta forma pode ser demonstrado que no limite:

$$\frac{1}{T_{máx} - T_{min}} \cdot \ln\left(\frac{T_{máx}}{T_{min}}\right) \cong \frac{1}{T_{meio}}$$

Cabe observar que  $T_{meio}$  é no modelo uma temperatura representativa do enrolamento na altura  $h_{máx}/2$  segundo o perfil longitudinal de temperaturas (ver Figura 6 de (3)), enquanto  $T_{eq}$  é um valor equivalente do transformador no ponto mais quente.

Neste sentido,  $T_{meio}$  deve ser agora calculado segundo a expressão:

$$T_{meio} = T_{eq} - \frac{\Delta T}{2}$$

Onde:

$$\Delta T = T_{máx} - T_{min}$$

Desta forma, assume-se que o transformador opera em seu ponto quente com  $T_{eq}$  em regime constante, permanecendo ainda no modelo a necessidade de conhecer-se a diferença de temperaturas  $\Delta T$ , representativa do projeto do transformador. Mas assumindo que o perfil longitudinal de temperaturas segue a hipótese da Figura 6 de (3), mesmo para carga variável, esta diferença será constante e de determinação simples.

## 2.2 – Efeito da relação entre o volume do óleo e a massa do papel isolante

Os valores de  $2F_{al}$  disponíveis nas empresas estão geralmente na unidade ppm, ou seja, miligramas de  $2F_{al}$  por litro de óleo ( $mg_{2fal}/L_{óleo}$ ). Como o  $2F_{al}$  dissolvido no óleo origina-se exclusivamente da degradação do papel isolante, os valores medidos em ppm dependem assim, do volume de óleo.

A unidade que correlaciona adequadamente  $2F_{al}$  com GP, deve ser na realidade miligramas de  $2F_{al}$  por quilograma de papel ( $mg_{2fal}/Kg_{papel}$ ), como visto em (7) - cujos resultados obtidos de  $2F_{al}$  [ppm] são baseados em uma relação experimental óleo/papel de 100 litros de óleo para 1 kg de papel.

Assim, se multiplicarmos os valores existentes de  $2F_{al}$  em ppm pela relação  $V_{óleo}/M_{papel}$  do transformador sob análise, teremos no modelo proposto o  $2F_{al}$  na unidade adequada.

O efeito de considerar-se a relação volume/massa reflete-se no modelo como uma modificação no valor dos parâmetros experimentais  $\alpha$  e  $\beta$ . Estes devem ser então estimados a partir de experimentos como o realizado em (7).

O volume de óleo ( $V_{óleo}$ ) é um dado de placa nos transformadores, porém a massa de papel ( $M_{papel}$ ) utilizada pelo fabricante é um dado que, em geral, não está disponível.

Para um uso mais aprimorado do  $2F_{al}$  como ferramenta de diagnóstico, é muito importante conhecer a massa utilizada do papel. Se este dado não estiver disponível, deve-se solicitá-lo aos fabricantes

dos transformadores. Pode-se usar 2Fal em ppm, como na versão 1.0 do programa Gp2Fal (que usava parâmetros adaptados para a representação de um transformador típico), porém os resultados obtidos apresentarão discrepâncias maiores.

Outra opção para a falta de dados sobre a massa do papel [kg] é assumir que esta é função da potência do transformador em kVA, como sugerido em (8):

$$M_{\text{papel}} = 0,136 \cdot \text{kVA}$$

### 2.3 – Efeito da presença do oxigênio

Poucos dados existem sobre a influência do teor de oxigênio dissolvido no óleo sobre o envelhecimento do papel.

O principal fenômeno envolvido no envelhecimento é a temperatura, mas sabe-se que o efeito geral do oxigênio, como agente catalisador das reações, é o de acelerador do processo.

A Figura 1 apresenta curvas geradas a partir das referências (9, 10) onde a expectativa de vida do papel é correlacionada com o teor de oxigênio  $O_2$ .

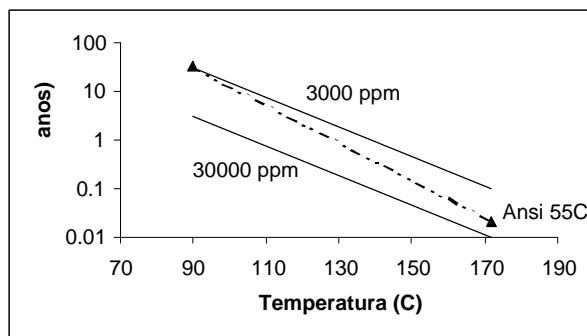


FIGURA 1 – Influência do teor de  $O_2$  na expectativa de vida do papel isolante (escala Log)

Percebe-se que o comportamento é do mesmo tipo do mostrado nos guias de carregamento de transformadores, sendo que, para baixos teores de  $O_2$ , e temperaturas inferiores e da ordem de 90 °C aproxima-se da curva ANSI C57.91 (11) da classe 55°C, também apresentada na figura. Assumindo esta curva como referência, o efeito do oxigênio reflete-se então na equação de Arrhenius como se fosse uma mudança dos parâmetros A e B dessa equação.

Partindo desta observação e da Figura 1, foi realizada uma modificação na equação de Arrhenius para uso no modelo. Com a alteração, A e B tornaram-se funções do teor de  $O_2$  em ppm.

Caso o teor de  $O_2$  seja assumido como “zero”, tem-se os parâmetros A e B originais da ANSI ( $A=-11,968$ ,  $B=6328,8$ ).

Assim:

$$A_{O_2} = A + \left( \frac{-A - 9,0536}{30000} \right) O_2$$

$$B_{O_2} = B + \left( \frac{4890,6287 - B}{30000} \right) O_2$$

Com o uso dos parâmetros  $A_{O_2}$  e  $B_{O_2}$  obtém-se um ajuste para  $O_2 = 0$  ppm idêntico à curva tracejada da Figura 1, e para  $O_2=30000$  ppm, um ajuste idêntico à curva inferior desta mesma figura.

Para temperaturas maiores que 110 °C as curvas para baixos teores de  $O_2$  tendem a divergir. Em condições normais, porém, os transformadores não operam com estes níveis de temperatura, fato que minimiza a aproximação introduzida na modelagem. Isto pode ser visto também na Figura 2, que é a mesma Figura 1 traçada com escala linear na ordenada.

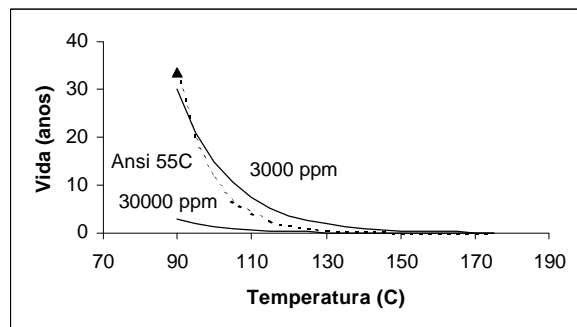


FIGURA 2 – Influência do teor de  $O_2$  na expectativa de vida do papel isolante (escala Linear)

O modelo pode ser adaptado e implementado para uso em monitoramento em tempo real (on-line) conforme mostrado em (2). Neste caso  $A_{O_2}$  e  $B_{O_2}$  seriam variáveis também no tempo, conforme  $O_2$  variasse. Na ausência deste tipo de acompanhamento, sugere-se utilizar para teor de  $O_2$  o valor médio dos valores medidos disponíveis.

### 2.4 – Definição das condições iniciais e finais

O modelo inicial apresentado em (3) deixava completamente livres as condições iniciais e finais para 2Fal e GP que equivaleriam a perdas de vida PV% de 0 e 100%. Sabe-se, entretanto, que a menor resolução obtida na avaliação do 2Fal é da ordem de 0,005 ppm e que o GP de um papel novo (PV%=0%) é da ordem de 1100 e de um papel envelhecido é da

ordem de 150 (PV%=100%). Modificações no modelo (introdução dos parâmetros p e  $\delta$ ) e a alteração dos valores dos parâmetros c e d (que são funções das condições de contorno adotadas) fixaram as condições acima como iniciais e finais.

### 3.0 – O MODELO GP2FAL

As modificações comentadas nos itens 2.1 a 2.4 permitiram a adaptação do modelo de (3) às condições reais de operação dos transformadores e conduziram o modelo no seu estágio atual de desenvolvimento, conforme as equações abaixo:

$$PV\% = 100.t.10^{-\left(Ao_2 + \frac{Bo_2}{Teq}\right)}$$

$$PV\% = c.GP^d - p$$

$$2Fal = \frac{M_{papel}}{V_{\acute{o}leo}} \left( \xi.PV\% \Psi + \delta \right)$$

$$\Psi = \frac{1}{\alpha.\ln(10)}$$

$$\xi = e^{\frac{1}{\alpha} \left[ \frac{B}{Teq} - \frac{B}{Tmeio} \right] \beta}$$

$$Tmeio = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} = Teq - \frac{\Delta T}{2}$$

$$\Delta T = T_{max} - T_{min}$$

Onde:

$\alpha$ ,  $\beta$ , c, d, A, B, p,  $\delta$  - parâmetros experimentais de ajuste - funções de experimentos controlados de laboratório e das condições de contorno;

Vóleo - volume de óleo no transformador, em [litros];

Mpapel - massa de papel no transformador, em [kg];

t - tempo de operação do transformador, em [horas];

Teq - Temperatura Equivalente de operação do transformador no topo, em [K];

Tmax, Tmin, Tmeio - temperaturas do transformador no topo, fundo e no meio, em [K];

$\Delta T$  - perfil (gradiente) de temperaturas topo para fundo, em [°C];

PV% - Perda de Vida Percentual em um ponto do transformador que operou por um tempo t com temperatura Teq, em [%];

GP - Grau de Polimerização do papel em um ponto do transformador que operou por um tempo t com temperatura Teq;

2Fal - valor medido em um transformador que operou por um tempo t com Teq e tem um perfil de temperaturas dado por  $\Delta T$ , em [ppm].

### 4.0 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO

O exemplo a seguir procura mostrar qual a influência dos teores de O<sub>2</sub> [ppm] e da relação Vóleo/Mpapel (V/M) sobre os valores gerados de 2Fal em [ppm], a PV% em [%] e o GP estimados do ponto quente, para um transformador típico que operou por 30 anos com Teq = 80 °C e com  $\Delta T = 20$  °C.

TABELA 1 – Exemplo de resultados do modelo para Teq= 80 °C,  $\Delta T = 20$  °C e tempo de operação 30 anos.

V/M	9 (*)			3		
	0	3000	15000	0	3000	15000
O <sub>2</sub>	0	3000	15000	0	3000	15000
2Fal	0.66	1.23	14	2	3.7	42
PV%	28.6	37.7	109.5	28.8	37.7	109.5
GP	286	249	143	285	249	143

(\*) NOTA - equivalente ao modelo ajustado para transformador típico no programa Gp2Fal versão. 1.0

Percebe-se que, para um mesmo tempo e temperatura de operação, com o aumento do teor de oxigênio, reduz-se o GP e aumenta-se a perda de vida percentual. Com a diminuição do GP mais 2Fal é gerado.

Uma redução na relação Vóleo/Mpapel não resulta em alteração no GP e na PV% mas altera - para mesmos teores de O<sub>2</sub>, os valores de 2Fal medidos em ppm. Isto era esperado, uma vez que o 2Fal é gerado exclusivamente pelo papel.

As Figuras 3 e 4 mostram a influência do O<sub>2</sub> sobre a evolução do 2Fal e do GP no tempo, para o exemplo anterior e para relação V/M = 9.

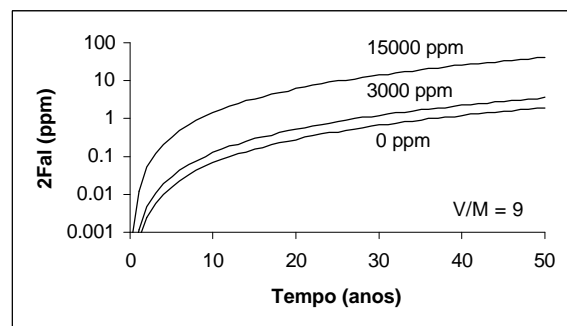


FIGURA 3 – Influência do O<sub>2</sub> na evolução de 2Fal (Transformador com Teq = 80 °C e  $\Delta T = 20$  °C)

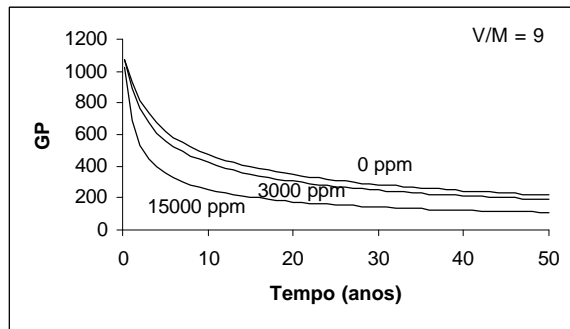


FIGURA 4 – Influência do O<sub>2</sub> na evolução do GP do topo do transformador (ponto quente) (Transformador com Teq = 80 °C e ΔT = 20 °C)

Para transformadores que apresentem ΔT diferente de 20°C e que operem com temperaturas equivalentes do ponto quente diferentes de 80°C, os resultados das Figuras 3 e 4 serão diferentes dos apresentados. Isto é devido, evidentemente, às próprias características do fenômeno que não pode ser representado por uma curva única.

## 5.0 - CONCLUSÕES

Desenvolveu-se um aprimoramento do modelo Gp2Fal apresentado inicialmente em (3, 4), para relacionar conjuntamente PV%, GP, 2Fal, teores de O<sub>2</sub> e relação entre Volume do óleo e Massa do papel. O modelo considera agora a influência da distribuição ΔT de temperaturas nos transformadores e o tempo de operação dos mesmos. Não considera, porém, os efeitos da umidade no envelhecimento do papel. As modificações apresentadas estão em fase de avaliação no CEPTEL, através de experiências controladas e análises de casos reais.

Ficou demonstrada a importância de considerar-se o volume do óleo e de dispor-se de dados sobre a massa de papel empregada no transformadores, para poder utilizar todo o potencial do 2Fal como ferramenta de diagnóstico. A unidade correta para controle do 2Fal deve ser mg<sub>2fal</sub>/kg<sub>papel</sub>. Mesmos valores de GP e PV% podem ocorrer apesar da existência de diferenças significativas nos teores de 2Fal, se estes forem medidos em ppm. Isto, juntamente com a influência exercida por Teq e por ΔT, explica o porquê de tantas dispersões nos valores de 2Fal [ppm] medidos em campo.

Devido à complexidade dos eventos que ocorrem no interior dos transformadores, a exatidão do diagnóstico com o uso do modelo 2Fal vai depender das características de projeto e da qualidade dos dados de entrada fornecidos pelo usuário (histórico de

carregamento, conhecimento da real distribuição interna de temperaturas, diferenças quanto ao tipo do papel utilizado e do teor de O<sub>2</sub>, etc). Desta forma, o que deve ser pretendido com a modelagem proposta não é um valor exato do GP, mas uma indicação segura da sua ordem de grandeza em diversas partes do enrolamento, e assim, da degradação real do papel.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CHEIM, L.A.V., DUPONT, C.J., et al. Discussão dos Critérios Normalizados de Perda de Vida em Transformadores a Partir de Resultados Experimentais de Envelhecimento Acelerado; XIII SNPTEE, FL/GEM/20 (1995). Brasil.
- (2) DUPONT, C.J. Modelo para Avaliação da Vida Remanescente de Transformadores a Partir da Equação da Perda de Vida Percentual, Grau de Polimerização do Papel e Teor de 2-Furfuraldeído do Óleo; Rel. Técnico CEPTEL DPP/EVR-777/96. (1996).
- (3) DUPONT, C.J., CHEIM, L.A. Novo Modelo para Avaliação da Vida Remanescente de Transformadores; XIV SNPTEE, FL/GEM/20 (1997). Belém - Brasil.
- (4) FERNANDEZ, J.B., DUPONT, C.J., CHEIM, L.A., MIDÃO F.S., GONZALEZ, E.G., BINDA, M., DIOGO, A.C.T., OLIVEIRA, V.P., TENÓRIO, J., LEVY, N.N. Monitoramento dos Transformadores de Potência do Setor Elétrico Brasileiro; II SEMASE, Grupo IV – CO-GSU-1 (1998). Curitiba – Brasil.
- (5) ABNT. Aplicação de cargas em transformadores de potência – Procedimento – NBR 5416. Brasil.
- (6) FANTINATTI, J.R., AIRES, J.C., ZAIDEN, J., DUPONT, C.J. Ensaio de Carregamento / Aquecimento no Campo, em Transformadores de Potência; V Semel - Seminário de Materiais no Setor Elétrico, pgs. 610 - 619, 18 a 21/ago. (1996). Brasil.
- (7) PABLO, A., MOLLMANN, A. New Guidelines for Furans Analysis as Well as Dissolved Gas Analysis in Oil-Filled Transformers; Report 15/21/33-19, CIGRÉ Session (1996). França
- (8) MILASCH, M. Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante; Editora Edgard Blucher Ltda (1984). Brasil
- (9) LAMPE, W., SPICAR, E., CARRANDER, K. Continuous Purification and Supervision of Transformer Insulation Systems in Service; IEEE PES Winter Meeting A 78 111-7 (1978). EUA.
- (10) MAK, J., BASSETTO, A., SABURO, A. Vida Útil de Transformadores de Potência: Como dobrar para 60 anos; I SEMASE, Grupo IV, GSU – 01 (1995). Foz do Iguaçu – Brasil.
- (11) INSTITUTE OF ELECTR. AND ELECTR. ENGINEERS. ANSI C57.91 (1981). EUA.

