



GRUPO VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS(GSE)

DIAGNÓSTICO INTEGRADO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA – APLICAÇÃO

Alain F. S. Levy, Alexandre Neves, Fernando A. Chagas,
Helvio J. A. Martins*, José A. M. Duque, Márcio Sanglard,
Marta M. Olivieri e Walter R. C. Filho

José A. M. Chaves

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

LIGHT – Serviços de Eletricidade S.A.

RESUMO

Este trabalho descreve algumas técnicas desenvolvidas para utilização como suporte ao diagnóstico de equipamentos elétricos, com enfoque principal em transformadores de potência.

Resultados de algumas aplicações num grupo de transformadores de potência são mostrados, focando-se as vantagens e dificuldades de cada técnica.

PALAVRAS-CHAVE :

Transformadores de Potência, Técnicas de Diagnóstico.

1.0 INTRODUÇÃO

Tem-se observado forte desenvolvimento de técnicas aplicadas ao desenvolvimento de produtos bem como de serviços na área de Sistemas de Energia Elétrica. No que diz respeito à manutenção de equipamentos as técnicas tradicionais usadas são as chamadas manutenção corretiva e preventiva.

A manutenção corretiva é uma atuação efetuada após a ocorrência de uma falha, destinada a colocar um item num estado no qual pode executar sua função. Enquanto a preventiva é uma manutenção efetuada a intervalos pré-determinados conforme critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falhas ou a degradação do desempenho de um item.

Outra forma de abordar o problema é através da manutenção preditiva que permite reajustar previsões das operações de manutenção a efetuar, estimando-se a tendência evolutiva do funcionamento não adequado do equipamento e o tempo durante o qual é possível continuar a utilizá-lo antes da possível avaria.

Portanto, para esse tipo de manutenção é necessária a

monitoração dos estados da condição de um equipamento. Uma análise custo/benefício dessa monitoração determina o possível uso desse tipo de manutenção.

No caso específico dos Sistemas Elétricos de Potência há necessidade de avaliação dos equipamentos de subestações e linhas de transmissão, com o objetivo de avaliar sua integridade, visando futuras ações para extensão de sua vida útil ou capacitação.

Normalmente, o estado dos equipamentos tem sido avaliado através de ensaios, nos quais instrumentação analógica e mais recentemente digital são utilizadas. Vários destes instrumentos possibilitam a obtenção de informações importantes, mas por outro lado em quantidade limitada. Outros, em contrapartida, fornecem uma massa maior de dados num curto espaço de tempo. Ambos têm em comum o fato de necessitarem de técnicos experientes para interpretar os resultados. Isto se deve a aspectos subjetivos dos métodos de medições empregados, sendo também causado pela própria natureza estocástica de alguns fenômenos medidos.

Por outro lado, o aumento do consumo e da sofisticação dos consumidores têm exigido uma maior confiabilidade do sistema de energia. Para que isso seja possível, uma das medidas possíveis, diz respeito ao uso de equipamentos e técnicas de monitoração sistemática que forneçam informações de forma contínua ou durante um período de tempo a respeito do estado do sistema elétrico (notadamente de alguns equipamentos mais críticos).

2.0 TÉCNICAS UTILIZADAS

Priorizou-se um grupo de técnicas que fossem capazes de prover resultados relativos a condições dielétricas,

mecânicas e térmicas do transformador. A seguir é feito um breve resumo das técnicas utilizadas, exceto para cromatografia de gases dissolvidos em óleo isolante por ser uma técnica bastante difundida.

2.1 Tensão de Retorno

A tensão de retorno ou efeito posterior em materiais dielétricos está baseado nos processos de polarização e relaxação do material quando este é submetido a um estímulo elétrico. Os processos dielétricos são fortemente influenciados pelo envelhecimento e contaminação do material dielétrico, especialmente os contaminantes polares como a água. A medição de parâmetros tais como tensão e corrente, relacionados aos processo de polarização e relaxação de materiais dielétricos, vem sendo utilizada há algum tempo como ferramenta de diagnóstico em transformadores de potência com o objetivo principal de avaliar o teor de umidade no isolante sólido.

O circuito elétrico equivalente de polarização para um transformador pode ser dado pela combinação de elementos R_p - C_p série, que representam os processos de polarização do isolante sólido do transformador, e um circuito R_g - C_g paralelo cujos elementos representam a resistência e a capacitância geométrica do transformador. Em um sistema isolante real são considerados vários processos individuais de polarização por todo o dielétrico, cujas características dominantes são dadas pelas constantes de tempo $\tau_{pi} = R_{pi} * C_{pi}$.

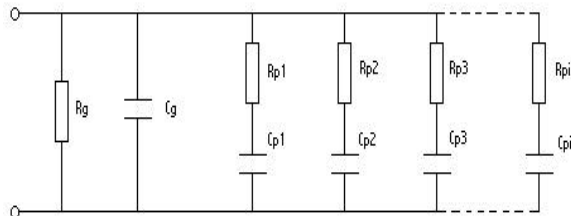


FIGURA 1 – Circuito equivalente de polarização para um transformador.

A medição de tensão de retorno consiste basicamente de três etapas, ou seja : carga, descarga e a medição da tensão de retorno propriamente dita.

Durante o processo de carga aplica-se uma tensão com amplitude U_c ao circuito durante um intervalo de tempo T_c (Tempo de Carga). Durante este período a capacitância geométrica carrega-se e os processos elementares de polarização com constante de tempo ($\tau_{pi} = R_{pi} * C_{pi}$) menores do que T_c irão se desenvolver.

Decorrido o intervalo de tempo de carga, o circuito é isolado da fonte e é estabelecido um curto-circuito em seus terminais durante um intervalo de tempo T_d (tempo de descarga). Nesta etapa a capacitância C_g é descarregada imediatamente e a corrente do circuito é dada pela descarga dos circuitos de polarização (R_i e

C_i). Da mesma forma que na etapa anterior somente os processos de polarização com constantes de tempo menores do que T_d irão se descarregar.

A terceira e última etapa consiste da medição da tensão de retorno. Após decorrido T_d , o curto-circuito é retirado e um eletrômetro é colocado nos terminais do circuito. Neste instante somente os processos de polarização com constantes de tempo compreendidas na faixa $T_c > \tau_{pi} > T_d$ estarão ativados. Como resultado a resposta dielétrica do sistema se dá como um processo de descarga das capacitâncias de polarização através da resistência geométrica, enquanto que, ao mesmo tempo, ocorre o processo de carga da capacitância geométrica. Desta forma o resultado final se traduz em uma tensão desenvolvida nos terminais do sistema chamada de tensão de retorno como mostra a Figura 2. O valor máximo da tensão de retorno é diretamente proporcional a U_c e T_c e inversamente proporcional a T_d .

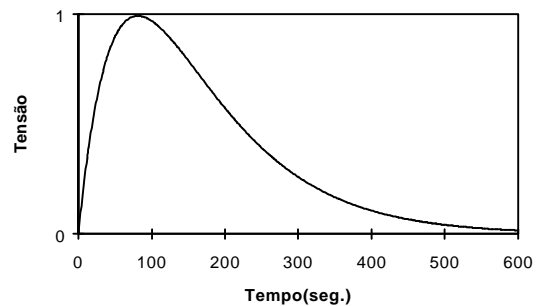


FIGURA 2 – Tensão de retorno

A medição da tensão de retorno para um único valor de T_c levará a obtenção de uma curva em função do tempo, com um único valor máximo conforme mostrado na Figura 2. Contudo uma única medição da fornece informações limitadas sobre os possíveis mecanismos de polarização presentes no material isolante. Faz-se então uma seqüência de medições de tensão de retorno para vários valores de T_c na faixa entre 10^{-3} a 10^4 segundos. Mantendo-se constante a relação entre T_c e T_d , obtém-se então um *espectro de polarização* construindo-se um gráfico do máximo valor da tensão de retorno para cada tempo de carga considerado.

De acordo com a literatura as medições devem ser feitas com uma relação $T_c/T_d = 2$, que é suficiente para uma boa sensibilidade do método.

De uma forma geral o espectro de polarização apresenta um máximo global relacionado a um determinado tempo de carga. Para transformadores de potência este máximo pode ser associado ao teor de umidade da isolação sólida.

2.2 Descargas Parciais Método Acústico

As medições têm o objetivo de detectar e localizar atividade de descargas parciais que possam estar

ocorrendo no material isolante interno do transformador, através da medição dos sinais acústicos emitidos pelas descargas parciais (DP).

O ensaio de emissão acústica (EA) é realizado com o transformador energizado, de preferência em suas condições normais de operação. Também são realizadas medições com o transformador desenergizado para determinação do ruído ambiente.

O ensaio é realizado com instrumentação específica que utiliza sensores piezoelétricos acoplados às paredes laterais do tanque do transformador. Estes sensores são sensíveis à faixa de frequência de ultrassom e são construídos com ressonância na frequência de 150 kHz. Nos ensaios utilizou-se um total de 10 sensores, com filtro de frequência ajustado para aceitação de sinais acústicos até 500 kHz. A instrumentação é controlada por microcomputador, apresentando-se os resultados na tela em forma gráfica com a localização tridimensional do ponto descarga.

O número de sensores a ser utilizado é função do volume do equipamento a ser medido, porém, este limite atualmente ainda é ditado pelo custo das placas de controle dos sensores, fazendo com que numa determinada medição para minimizar o número de sensores, os mesmos sejam trocados de posição algumas vezes, convergindo-os para a região de maior atividade acústica, ganhando-se maior sensibilidade e a possível localização.

Este método requer uma origem, a partir da qual os sensores são referenciados. No caso de transformadores trifásicos, padronizou-se como face frontal àquela mais próxima das buchas de alta tensão, sendo a face direita àquela que contém a placa de identificação do equipamento. Portanto a origem dos eixos é a aresta entre estas duas regiões.

2.3 Descargas Parciais Método Elétrico

A medição de descargas parciais pelo método elétrico se destina a verificar se há atividades de microdescargas no interior dos transformadores e se possível quantificá-las.

O ensaio de descargas parciais pelo método elétrico é realizado conforme os procedimentos tradicionais descritos na norma IEC 270 – “Partial Discharge Tests Techniques”. Deve ser feito com o transformador energizado com a tensão normal de operação, porém sem a necessidade carregamento do mesmo.

Com a finalidade de se agilizar as medições nas subestações foi instalado, na maioria dos casos, um circuito de medição em cada uma das derivações capacitivas dos transformadores. Um diagrama do circuito de ensaio utilizado encontra-se na Figura 4.

A instrumentação digital aplicada às medições de alta tensão é de certa forma recente nos procedimentos normalizados internacionais.

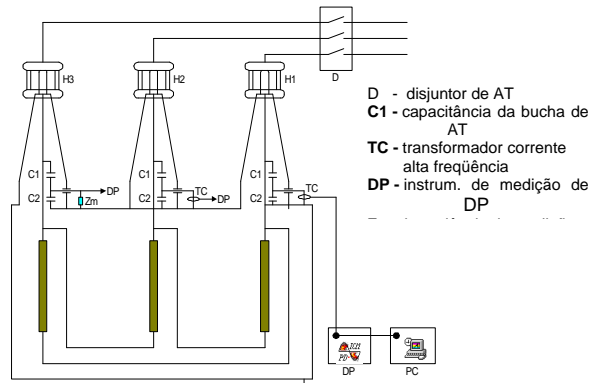


FIGURA 4 - Circuito de medição de descargas parciais em transformadores de potência trifásicos.

No caso da medição de descargas parciais, a revisão atual da norma IEC 270 traz um capítulo dedicado a esse tipo de instrumento e suas principais qualificações.

As principais vantagens desses instrumentos são:

- O contínuo registro e armazenamento de uma ou mais das grandezas relacionadas nas normas;

- A possibilidade de processamento posterior das informações armazenadas para avaliação e visualização de parâmetros adicionais e suas dependências. Dessa forma é possível o uso de técnicas estatísticas de análise; uso de metodologias numéricas e do campo da inteligência artificial para análise de dados e eliminação de ruídos;

- Apresentação visual de resultados com maior facilidade de entendimento, etc.

O principal registro a ser efetuado e que se relaciona com os pulsos de DP é a contagem da carga aparente q_a junto com o seu respectivo valor instantâneo de ângulo de fase de ocorrência no ciclo da tensão aplicada. A quantificação do número N de pulsos de DP conforme sua amplitude q_a e ângulo de fase ϕ , em uma determinada janela de tempo é que fornece os mapas ϕ - q_a - N tridimensionais de comportamento de um ou vários defeitos de um equipamento.

O uso desta técnica requer cuidados quanto a ruídos eletromagnéticos carregados pela rede elétrica, sendo necessária a sua identificação para que haja certeza de que os valores medidos são referentes a atividades internas ao equipamento.

2.4 Resposta em Frequência / Impedância Terminal

Estes ensaios se destinam a verificar as frequências naturais de oscilação dos enrolamentos, possíveis deslocamentos de bobinas, trechos em curto-circuito, etc., Para isto é necessário obter, tanto a relação de transformação (em ambos os sentidos), bem como as impedâncias terminais de cada enrolamento em função da frequência.

Um sinal senoidal de baixa tensão ($\sim 10V_{ef}$), com frequência variável na faixa de 20 Hz a 1000 kHz, é aplicado entre os terminais H_i-H_j (enrolamentos de alta tensão) e a resposta medida entre os terminais X_i-X_0 (enrolamentos de baixa tensão). Analogamente o sinal de tensão é aplicado entre X_i-X_0 e a resposta medida entre os terminais H_i-H_j .

O módulo e o ângulo da impedância vista de cada par de terminais de interesse (cada enrolamento H_i-H_j e X_i-X_0) são medidos por meio de uma ponte RLC.

Os resultados obtidos são apresentados em forma gráfica. Nos gráficos das impedâncias próprias, são apresentados o módulo da impedância e o seu ângulo em função da frequência. Nos gráficos das respostas em frequência, são apresentadas a relação entre o valor do sinal de tensão de saída e o sinal de tensão de entrada ($V_{saída}/V_{entrada}$, no eixo das ordenadas), em função da frequência (no eixo das abscissas).

As tensões nominais são obtidas diretamente da placa do transformador e dependem das conexões estabelecidas nas chaves comutadoras associadas ao enrolamento de regulação.

A relação $V_{saída}/V_{entrada}$ foi normalizada tendo como base a relação nominal do transformador para a posição considerada da chave comutadora. A forma de tratamento utilizada para os resultados de medição de transferência de tensão com as normalizações correspondentes é apresentada a seguir:

Tensão aplicada entre os terminais H_i-H_j :	$V=VH_{ij}A$
Tensão medida entre os terminais X_i-X_0 :	$V=VX_{i0}M$
Tensão nominal entre os terminais H_i-H_j :	$V=VH_{ij}N$
Tensão nominal entre os terminais X_i-X_0 :	$V=VX_{i0}N$

A normalização da tensão transferida entre os terminais de aplicação da tensão, H_i-H_j , e os terminais onde a resposta de tensão é medida, X_i-X_0 , é dada por:

$$VX/H = \frac{VX_{i0}M / VH_{ij}A}{VX_{i0}N / VH_{ij}N}$$

3. APLICAÇÕES

Há aproximadamente um ano o Cepel vem fazendo uso destas técnicas, prestando serviços a concessionárias e fabricantes, havendo vários casos onde foi possível o diagnóstico. Duas situações distintas são mostradas a seguir, sendo que a primeira refere-se a um diagnóstico integrado e as demais a exemplos de duas técnicas isoladamente.

3.1 Transformadores de 40 MVA

O exemplo a seguir refere-se a um transformador de 40 MVA, 138/13.8 kV, em funcionamento, com 17 anos de idade, pertencente a um grupo de 14 equipamentos onde foram aplicadas várias técnicas, cujos resultados

serviram de suporte a repotencialização dos equipamentos pela Light S.A..

Antes de qualquer medição é feita uma coleta de óleo, cujos resultados são adicionados aos resultados das análises anteriores, o que forma o histórico do equipamento em termos de gases dissolvidos no óleo isolante. Dependendo da situação a cromatografia é executada no campo, em alguns minutos.

No caso em questão os resultados obtidos são mostrados e comentados a seguir.

A Cromatografia de Gases dissolvidos no óleo isolante indicava possibilidade de falha elétrica (arco) ou contaminação através do comutador sob carga.

Através da técnica de Tensão de Retorno, nota-se pela Figura 5, que o teor de umidade do isolamento sólido encontra-se acima do esperado para a idade do transformador. De acordo com a avaliação deste resultado pode-se sugerir, em princípio, que existe a possibilidade de um processo acelerado de envelhecimento do isolamento sólido devido a uma secagem inicial inadequada ou algum problema generalizado de sobreaquecimento do transformador, o que pode ser menos provável.

Os ensaios de medição de Descargas Parciais pelo Método Elétrico indicam descargas parciais internas, sendo obtidos valores da ordem de 5 nC através de cada um dos terminais, conforme mostrado nas Figuras 6 e 7 para os terminais H_1 e H_2 .

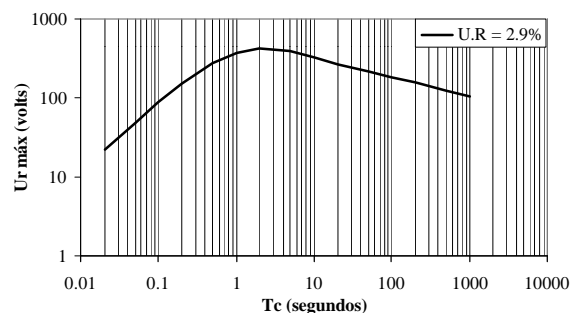


FIGURA 5 - Espectro de polarização para transformador de potência de 40MVA, Terminais H.

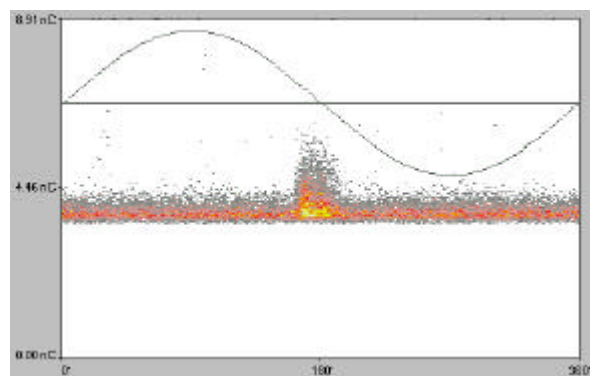


FIGURA 6 – Registros descargas parciais terminal H_1 .

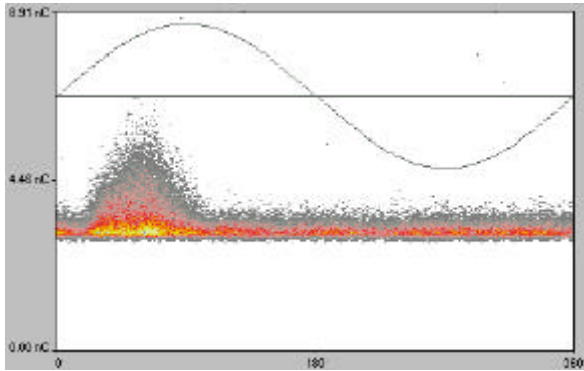


FIGURA 7 – Registros descargas parciais terminal H₂.

O ensaio de Emissão Acústica, apresenta regularidade e constância dos sinais acústicos registrados, indicando uma provável fonte de descargas parciais na região [x = 2,6-2,8; y = 2,4-2,5; z = 2,3-2,4] m, conforme mostrado na Figura 8.

Consultando os desenhos do transformador, a indicação dada pelo método acústico seria um ponto de fixação de um tubo ao tanque principal, por onde passa a fiação em direção a uma caixa de passagem da ventilação forçada do transformador, na face mais próxima ao tanque de expansão de óleo. Uma outra indicação estaria relacionada a chave comutadora pertencente a fase B.

Utilizando as informações obtidas dos vários ensaios concluiu-se que a origem do defeito pertencia a uma região fora da parte ativa do equipamento, não envolvendo portanto os enrolamentos, sendo mais provável estar relacionado com a chave comutadora.

A verificação do diagnóstico será feita em breve, com a abertura do equipamento. Porém, dadas as características do diagnóstico adicionadas a experiência operacional da concessionária, optou-se pela operação do equipamento por mais algum tempo, até que possa ser substituído.

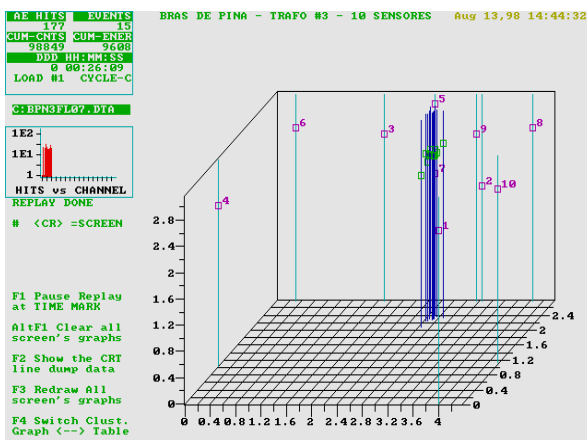


FIGURA 8 – Localização de Fonte de EA.

3.2 Resposta em Frequência

No exemplo, mostra-se a aplicação da técnica a um caso extremo, onde parte de um dos enrolamentos de um transformador elevador de 63.3 MVA, 13.8/500 kV, se encontrava em curto-circuito. As Figuras 9 e 10 mostram para uma mesma família composta de três transformadores (mesmo projeto, idade e localização no sistema elétrico) a variação da relação nominal em função da frequência tanto vista pela alta quanto pela baixa tensão, assim como, o comportamento da impedância terminal para os enrolamentos de baixa tensão, onde aconteceu a falha.

As curvas obtidas para os transformadores “sãos” devem ser consideradas como referência para as devidas comparações. Nota-se que o equipamento com defeito apresenta a impedância terminal alterada, assim como a relação de transformação, com ênfase nos pontos de ressonância natural do equipamento.

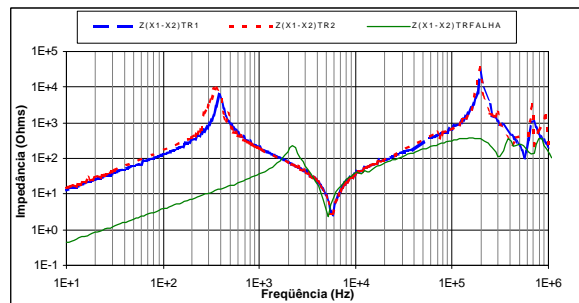


FIGURA 9 – Impedância terminal enrolamentos BT

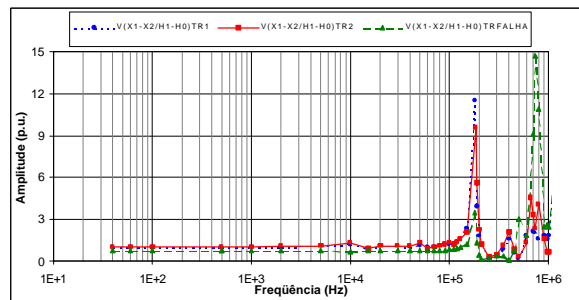


FIGURA 10 – Variação da relação nominal com a frequência vista pelos enrolamentos de alta tensão.

3.3 Tensão de Retorno

A Figura 11 exemplifica o comportamento do espectro de polarização para três transformadores de idades diferentes em função do teor de umidade no isolamento sólido.

O transformador denominado Tr1 é um transformador repotencializado o qual foi submetido a um processo de secagem e encontra-se em operação há aproximadamente 1 ano, portanto é considerado novo

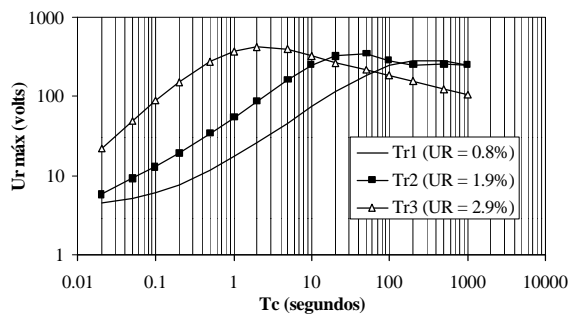


FIGURA 11 - Espectro de polarização para transformadores de potência.

para este tipo de técnica.

Os transformadores Tr2 e Tr3 têm respectivamente 10 e 17 anos. Observa-se que o máximo global do espectro de polarização desloca-se para a região de constantes de tempo mais baixas quanto maior é o teor de umidade.

Tr1 apresenta um espectro bastante homogêneo e um teor de umidade relativa do isolamento sólido compatível com o processo de secagem e sua idade. Já os demais transformadores apresentam teores de umidade mais elevados, não compatível com suas idades. Em especial, Tr2 apresenta um espectro com dois máximos, um em aproximadamente 50 segundos e um outro, bem discreto, em torno de 500 segundos. Este tipo de comportamento pode caracterizar uma resposta a algum outro tipo de subproduto devido ao envelhecimento acelerado do transformador.

4.0 COMENTÁRIOS

O uso das técnicas aqui mostradas ainda é recente, necessitando alguns desenvolvimentos, os quais são realizados de modo complementar, à medida que os resultados de aplicações são obtidos.

A opção pelo uso de uma técnica ou de um grupo de técnicas deve ser feita em função de um determinado objetivo, podendo estar associado a “assinaturas” para um equipamento novo, acompanhamento periódico (preditivo) ou como laudo necessário a esclarecimento de pendência entre concessionária e fabricante.

Outro fator de muita importância é o custo pelo uso da técnica e sua efetividade em termos de sucesso no diagnóstico.

As medições devem interferir ao mínimo com a operação do equipamento (consequentemente do sistema), viabilizando o uso de técnicas como, de

medição de descargas parciais (acústico e elétrico) e cromatografia de gases, podendo inclusive ser “on-line”. Enquanto que para as técnicas de resposta em frequência e tensão de retorno, a utilização obrigatoriamente será com paradas programadas, o que nem sempre é possível.

5.0 CONCLUSÕES

-Apresentou-se um conjunto de técnicas que, principalmente, associadas podem ser efetivas no diagnóstico de transformadores de potência;

-Necessita-se ainda, de algum tempo para a formação de um banco de dados de resultados com alguns padrões típicos relacionados a defeitos, os quais seriam utilizados como referência não só durante as medições, mas também, durante a fase de diagnóstico;

-O ensaio de tensão de retorno deve ser realizado como ensaio de recebimento de transformador de potência para verificação da eficiência do processo de secagem utilizado pelo fabricante. Um nível de umidade relativa menor que 1% é recomendado.

-Durante a fase de especificação de transformador de potência, deve-se inserir a necessidade de realização dos ensaios de resposta em frequência. Estes dados serão utilizados como referência para futuras comparações, assim como servirão de informação para estudos de transitórios eletromagnéticos que envolvam a interação entre transformador e sistema elétrico (frequências naturais de oscilação);

-Também, durante a fase de especificação do equipamento deve-se exigir do fabricante a inserção da massa de papel isolante como dado de placa.

6.0 REFERÊNCIAS

- [1] Cerqueira, W. R., “Resp. de Transformadores Potência a Sinais Reduzidos”, Rel Técnico Cepel 891/97.
- [2] Neves, A., “Tensão de Retorno em Transformadores de Potência”, Relatório Técnico Cepel n° 873/97.
- [3] Oliveira, O. B., Cerqueira, W. R. e outros, ‘Medições Ressonâncias em Transf.. Potência’, XIV SNPTEE, 1997.
- [4] Lundgaard, L. E., “Acoustic Partial Discharge Detection – Practical Application”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Sep/Oct 1992 – Vol. 8, N° 5.