



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO -XIII

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E
TECNOLOGIAS EMERGENTES - GTM**

**ANÁLISE DE VARREDURA DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA EM TRANSFORMADORES:
APLICAÇÃO NO CAMPO**

Roberto de Aguiar (*)
COPEL GERAÇÃO E TRANSMISSÃO S.A.

José Arinos Teixeira Junior
LACTEC

Celso Luiz de Lima Martins
LACTEC

RESUMO

O teste "Análise da Varredura da Resposta em Frequência", é uma valiosa ferramenta para verificação da integridade de transformadores. A técnica SFRA fornece informação de diagnóstico interno por procedimentos não-intrusivos.

No trabalho é apresentado o conceito geral e fundamentos nos quais o teste baseia-se, tais como: circuito RLC, domínio do tempo e da frequência, redes de duas portas e funções de transferência. Como também mostra através de ensaios a utilidade da ferramenta na gestão do parque de transformadores da empresa e o conhecimento adquirido na "análise da varredura de resposta em frequência".

PALAVRAS-CHAVE

SFRA, TRANSFORMADOR, ENSAIOS, VARREDURA EM FREQUENCIA, RESPOSTA EM FREQUENCIA

1.0 - INTRODUÇÃO

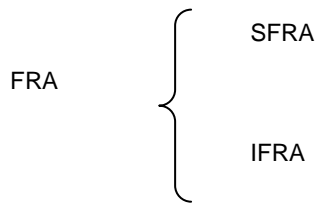
Inicialmente, gostaríamos de comentar que o ensaio de análise da resposta em frequência, denominado pela sigla FRA, do inglês "*Frequency Response Analysis*", é qualquer ensaio envolvendo relações entre duas grandezas características de um componente elétrico ou eletrônico (resistor, capacitor, indutor, transistor, diodo, etc), de uma placa de circuito eletrônico complexo ou mesmo de um transformador de potência em uma faixa de frequências especificadas, ou seja, é um conceito bastante geral.

Pela própria definição de ensaio de resposta em frequência, necessitamos excitar o objeto sob ensaio com várias frequências para sabermos como este objeto se comporta dentro de uma faixa de interesse. Podemos fazer isto de duas formas, uma delas é aplicar varreduras de ondas senoidais sucessivamente desde a frequência inicial até a frequência final, com um degrau entre elas adequadamente escolhido. Este tipo de ensaio é denominado SFRA, do inglês "*Sweep Frequency Response Analysis*".

Outra maneira para gerar as várias frequências é aplicar uma onda de impulso, do tipo dupla exponencial. De acordo com a teoria de Fourier, sabemos que a onda de impulso no domínio do tempo, corresponde no domínio da frequência, a uma somatória de ondas senoidais com várias frequências com diferentes amplitudes e ângulos de fase que resulta na onda de impulso original. Logo, aplicando um impulso e medindo sua resposta é possível extrair a resposta em frequência. Este tipo de ensaio é denominado IFRA, do inglês "*Impulse Frequency Response Analysis*".

Podemos, portanto, classificar os ensaios de FRA do ponto de vista de como as frequências são geradas conforme segue:

(*) Rua José Izidoro Biazzetto, 158 sala 185 Bloco A, – CEP 81200-240 Curitiba, PR, – Brasil
Tel: (+55 41) 3331-3568 – Fax: (+55 41) 3331-3575 – Email: Roberto.aguiar@copel.com



2.0 - ENSAIO DE FRA

O ensaio de FRA é a relação entre duas grandezas características do objeto de teste, sejam estas grandezas, tensões, correntes, tensão e corrente, etc. em uma faixa de frequências especificadas. Na figura 1 a seguir temos um circuito básico do ensaio de SFRA, onde o objeto de teste está representado como um transformador de potência.

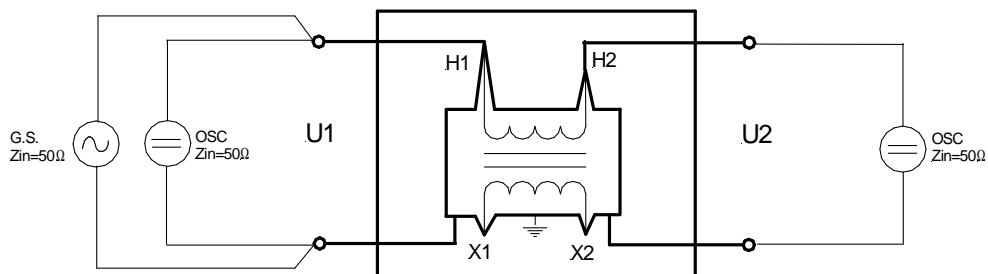


Figura 1. Circuito 1 representando um transformador de potência monofásico para ensaio da função de transferência H e Impedância Terminal Z_t do enrolamento H1-H2.

No arranjo de ensaio, aplicamos uma tensão senoidal entre a fase H1 e terra via o gerador de sinais G.S. A medida da tensão aplicada U_1 é feita pelo canal CH1 do osciloscópio, cuja impedância interna é 50Ω . O sinal transferido U_2 entre a fase H2 e terra é medido pelo canal CH2 do osciloscópio, também em 50Ω .

No circuito da figura 1 e seu equivalente da figura 2, observamos que a medida de H é também uma medida indireta da impedância terminal Z_t , ou seja, entre os terminais H1 e H2 do enrolamento de AT.

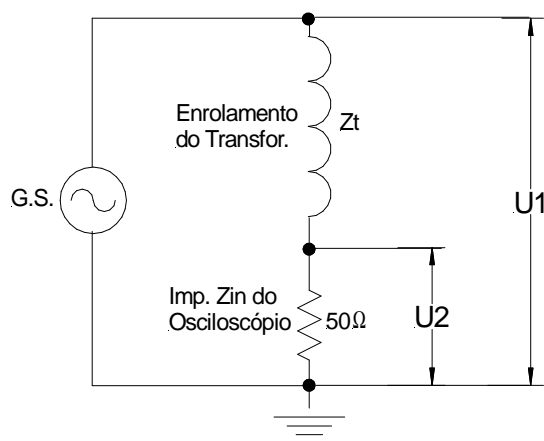


Figura 2. Equivalente do Circuito 1.

É fácil relacionar H e Z_t pela expressão a seguir:

$$H = 20 * \log\left(\frac{50}{50 + Z_t}\right)$$

Da mesma forma que H , Z_t é uma grandeza complexa com módulo e ângulo. Ela é facilmente medida pelo mesmo equipamento que mede a função de transferência H . Uma vez obtendo-se a Z_t , o cálculo da admitância Y_t é imediato. Ambas funções também podem ser empregadas como curvas características do equipamento.

Um outro arranjo de ensaio também pode ser executado, como podemos ver na figura 3 a seguir:

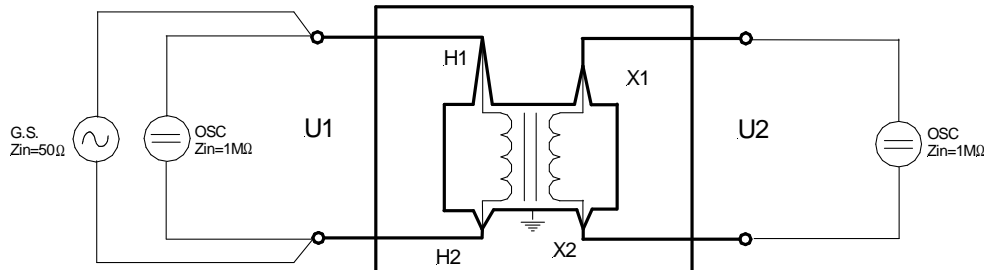


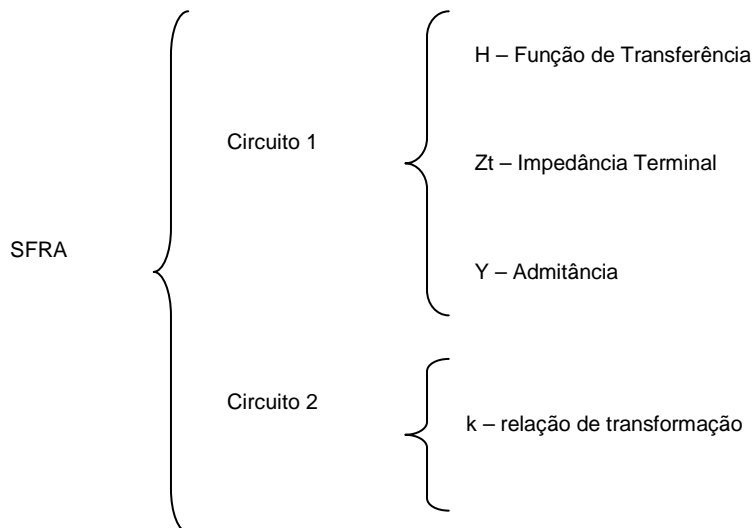
Figura 3. Circuito 2 representando um transformador de potência monofásico para ensaio de resposta em frequência ou relação de transformação com variação de frequência.

Este ensaio é conhecido como resposta em frequência ou ensaio de relação de transformação com variação de frequência. Podemos ver agora que o sinal aplicado pelo G.S. é no enrolamento H1-H2, induzindo ou transferindo uma tensão U_2 no enrolamento X1-X2 simulando o funcionamento normal do transformador. Note que as impedâncias de entrada dos canais do osciloscópio estão agora na posição de $1\text{ M}\Omega$. A relação é dada pela equação a seguir e ela pode ser normalizada pela relação nominal do transformador.

$$k = \frac{U_1}{U_2}$$

A curva de variação do valor de k com a frequência é característica do transformador e pode ser utilizada também como uma informação de como as tensões transitórias são transferidas de um enrolamento para outro.

Podemos para efeito de classificação listar os tipos de ensaios de SFRA que podem ser realizados nos casos abordados nos parágrafos anteriores.



O ensaio de SFRA é uma ferramenta cada vez mais utilizada pelos fabricantes e concessionárias. A idéia é que se algo ocorre internamente na parte ativa do transformador, algo na curva do SFRA poderá mudar também, particularmente, se o problema envolver a deformação do enrolamento. O grande desafio é correlacionar determinada alteração na curva com um defeito em uma região do enrolamento.

A ampla faixa de frequências utilizadas pelo ensaio de SFRA, geralmente de algumas dezenas de Hz até algumas dezenas de MHz, com mais de 1000 pontos intermediários permite excitar tanto as características do núcleo, como as características do enrolamento.

O transformador é uma malha complexa, composta de elementos R, L e C.

Quando estamos na região das frequências baixas, estamos excitando a região do núcleo, através da indutância de magnetização, perdas no ferro e as capacitâncias parasitas acopladas com a indutância de magnetização. Quando a frequência aumenta, as características do enrolamento passam a prevalecer, através da indutância de dispersão, perdas no cobre e outras capacitâncias envolvidas. Logo, a curva do SFRA é resultante deste complexo jogo de impedâncias e pode ser considerado como a impressão digital do transformador através da qual, um diagnóstico não intrusivo pode ser realizado, contando que tenhamos um registro para comparação.

3.0 - EXPERIÊNCIA PRÁTICA DA COPEL.

3.1 – Ensaio de SFRA modalidade função de transferência (H) por varredura de frequência.

A COPEL vem a tempos desenvolvendo técnicas para analisar transformadores com suspeitas de problemas causados por movimento de núcleo, armaduras e enrolamentos, devido a transporte, curto-circuitos externos e em equipamentos com suspeita de avaria.

Existem alguns ensaios recomendados para verificação de avarias nas situações citadas, tais como: ensaios no óleo, medição da corrente de excitação, medição da impedância percentual, entre outros. Porém os resultados práticos desses ensaios deixam muito a desejar e normalmente a avaliação dos danos tem que ser feita através de inspeção visual (interna), condição essa nem sempre possível.

A técnica utilizada pelo SFRA é utilizada na COPEL desde setembro de 2003. Uma quantidade grande de ensaios tem sido realizada gerando diferentes tipos de curvas, assim várias características têm sido observadas, tais como, o projeto do transformador, técnicas de teste e principalmente como investigação de possíveis avarias.

O ensaio de resposta em frequência faz parte dos ensaios de comissionamento de transformadores com tensão primária acima de 69 kV, para transformadores de transmissão o ensaio já é feito na fábrica. O ensaio também é realizado em investigação de avarias.

3.2 – Ensaio de SFRA modalidade relação de transformação (k) por varredura de frequência.

O crescimento do sistema elétrico, com o aumento do número de linhas de transmissão, instalação de sistemas de regulação de tensão, ampliações em subestações, etc...Impactam consideravelmente no layout do sistema elétrico e colaboram para o surgimento de fenômenos elétrico (very fast transients - VFTs) de difícil determinação e avaliação.

Aliado a isso tem aumentado o número de manobras no sistema elétrico como um todo, além do aumento na utilização de subestações isoladas a SF6 (GIS) e mesmo em subestação convencionais a utilização de equipamentos de manobra isolados a SF6.

Como consequência temos um aumento no número de falhas de equipamentos, em especial transformadores e TIs relacionados com os eventos de VFT.

Para evitar falhas relacionadas a VFT, a COPEL tem trabalho em duas frentes, uma seria a medição dos surtos de manobras em subestações com histórico de falhas em equipamentos e a outra é verificar o comportamento dos equipamentos frente a esses surtos.

Para verificar o comportamento dos equipamentos, principalmente do transformador, frente aos surtos VFT esta sendo realizado ensaio de SFRA, módulo relação (k), em transformadores para relacionar às frequências de ressonância desses equipamentos com as frequências surgidas durante o fenômeno de VFT.

Em 2007 iniciou-se também a utilização deste ensaio (k) em transformadores com suspeita de falha, com resultado bem promissor.

3.3 – Resultados práticos, investigação de falhas

3.3.1 Transformador de interligação da SE/CIC de 230-138-13,8 kV, 150 MVA com regulação sob carga.

Em operação normal, ocorreu trip pela proteção diferencial, atuando o rele diferencial (87) e o rele de gás do transformador (63T). O ensaio de gascromatografia indicou arco elétrico.

Os ensaios elétricos de relação de transformação, corrente de excitação e reatância de dispersão indicavam falha na fase 2. Os outros ensaios, inclusive resistência elétrica dos enrolamentos estavam normais, não sendo possível determinar qual o enrolamento que falhou.

Mesmo depois de aberto em fábrica e com os enrolamentos da fase 2 isolados eletricamente, e com a realização de vários ensaios não foi possível definir com exatidão o enrolamento avariado. A definição do enrolamento avariado é importante para que a desmontagem seja feita de forma otimizada.

A seguir apresentamos os resultados dos ensaios de SFRA (H), que foi o ensaio que melhor detectou a bobina em que a falha ocorreu.

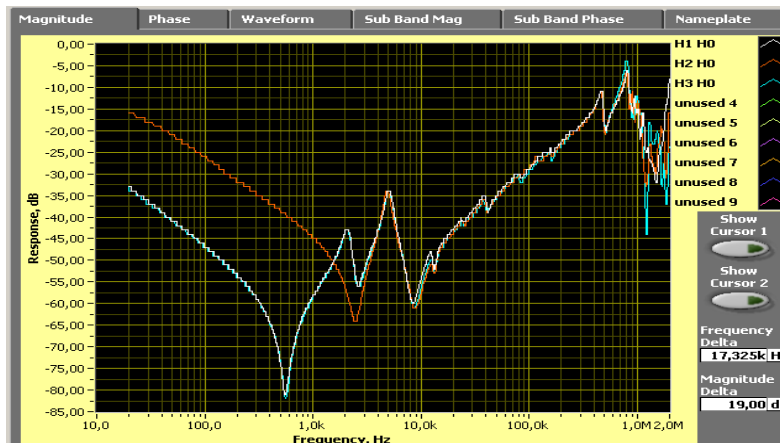


Figura 4. Ensaio nos enrolamentos H/H0 com os enrolamentos X e Y abertos. Observa-se discrepância na fase 2.

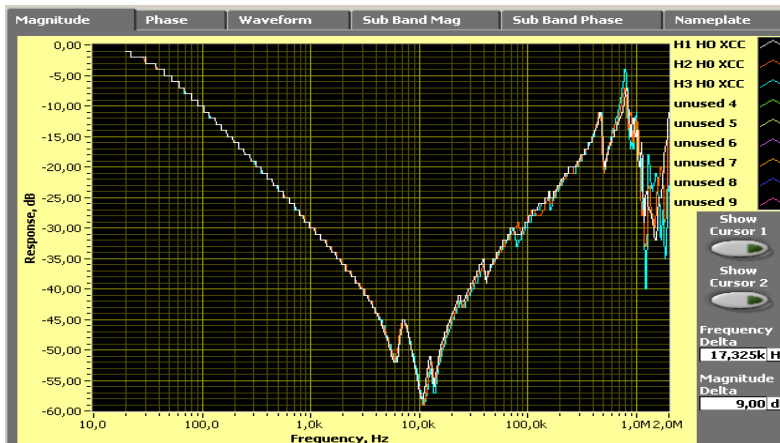


Figura 5. Ensaio nos enrolamentos H com os enrolamentos X curto-circuitados.

Observa-se simetria em todas as fases. Como as curvas voltaram a apresentar simetria com o enrolamento X curto-circuitado, é a indicação que a avaria deve estar localizada na bobina X2.

Quando da desmontagem do transformador em fábrica, foi confirmado a falha (curto-circuito entre espiras) na bobina X2.

3.3.2 Transformador de elevador da Usina Foz do Areia, 16 - 500 kV, 111 MVA.

O transformador U3_fase C apresentou crescimento dos gases combustíveis de forma acentuada e devido ao histórico de falhas em transformadores da mesma família, o transformador foi retirado de operação.

A UHE_GBM esta em operação a 25 anos, sem nenhuma ocorrência significativa nos transformadores elevadores. No final de 2007, num período de 5 dias ocorreram falhas em dois transformadores. No primeiro evento ocorreu uma falha de proporção reduzida, porém foi necessário a desmontagem do equipamento para que fosse possível

localizar o ponto da falha (curto-circuito entre espiras no enrolamento X) . No segundo evento a falha foi de grande proporção, com danos visíveis nos enrolamentos, buchas e tanque (curto-circuito entre espiras nos enrolamentos H e X).

Em função das falhas, a periodicidade dos ensaios de gascromatografia foi diminuída para 15 dias. Nas coletas realizadas no transformador U3_fase C nos dias 14 e 16/02/2008 verificou-se um crescimento anormal dos gases. O transformador foi retirado de operação.

A tabela abaixo mostra os resultados da gascromatografia dos dias 14 e 16/02/2008, comparando com os ensaios feitos 15 dias antes, os quais estavam com valores normais.

DATA	HIDROG.	METANO	ETANO	ETILENO	ACETILENO
30/01	12	76	63	10	0
14/02	968	1534	368	2601	28
16/02	2107	3654	677	4974	66

O histórico de gascromatografia apresenta uma evolução normal dos gases, indicando um leve aquecimento, que é intrínseco ao funcionamento do transformador. O rápido aumento dos gases, que são característicos de sobreaquecimento com temperatura superior a 700 °C, e principalmente pela acentuada presença do Etileno e pelo início do surgimento do Acetileno, condições essas que sugerem o início da formação de arco elétrico, evidenciam que o transformador entrou em processo de falha.

- Ensaios Elétricos

Para uma melhor análise das condições do transformador U3_fase C, ou seja, caracterizar mais claramente a falha, pois apesar do crescimento dos gases, não ocorreu o colapso do isolamento. Foram analisados ensaios anteriores e efetuado uma bateria de ensaios elétricos nesse transformador.

Como alguns ensaios, principalmente os que utilizam as técnicas de variação de frequência, não haviam sido realizados anteriormente nesse transformador, para efeito de comparação os mesmos ensaios foram realizados em transformador idêntico.

Foram executados ensaios rotineiros, quais sejam, resistência do isolamento, fator de potência do isolamento, relação de transformação, corrente de excitação e resistência elétrica dos enrolamentos. Foram efetuados, também ensaios especiais de SFRA (H e k).

- SFRA (H)

No ensaio de SFRA (H) a única conexão que apresentou alteração foi o ensaio de enrolamento secundário (X) tendo o enrolamento primário (H) curto circuitado (curva X Hcc).

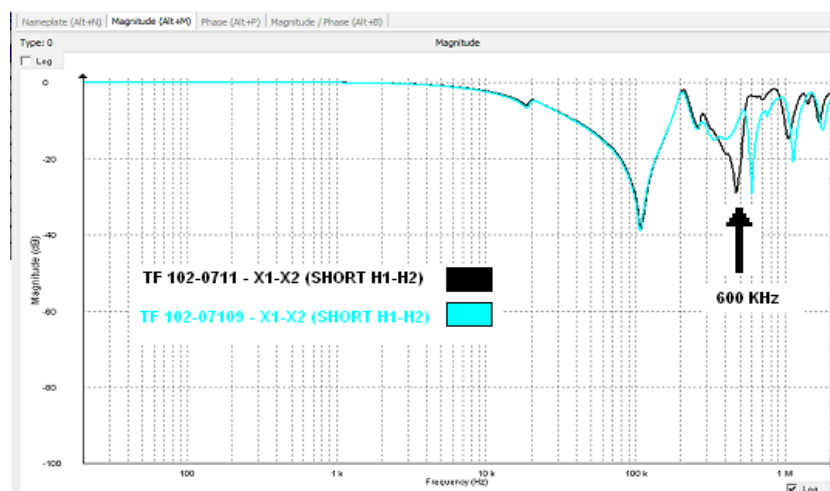


Figura 6. Curva do enrolamento secundário (X) tendo o enrolamento primário (H) curto circuitado (curva X Hcc).

Pelo ensaio de SFRA (H) é possível verificar que o transformador não sofreu alterações geométricas acentuadas. As diferenças indicadas na curva "X Hcc", indicam falha no enrolamento "X" – BT, e que é provável que será possível visualizar o ponto da falha, quando da desmontagem do equipamento.

– SFRA (k)

No ensaio, ocorreu uma diferença significativa, em relação a curva padrão (em amarelo e azul – dois transformadores). Observa-se que até a frequência de 10 kHz não há diferença entre as três curvas. Para as frequências mais altas a curva do transformador com suspeita de falha (em vermelho) sofre acentuada distorção.

De todos os ensaios elétricos realizados no transformador sob suspeita de falha, somente foi observada indicação do problema nos ensaios de SFRA em ambas as modalidades.

Vale salientar que além dos ensaios convencionais de campo, também foi realizado o ensaio de tensão induzida, como medição de descargas parciais, o qual apresentou discreto acréscimo no valor de descarga parcial.

Posteriormente o transformador foi desmontado em fábrica e foi possível confirmar a falha entre espiras no enrolamento secundário. A falha ainda não havia evoluído para um curto franco entre espiras, mais já foi possível identificar visualmente o ponto da falha.

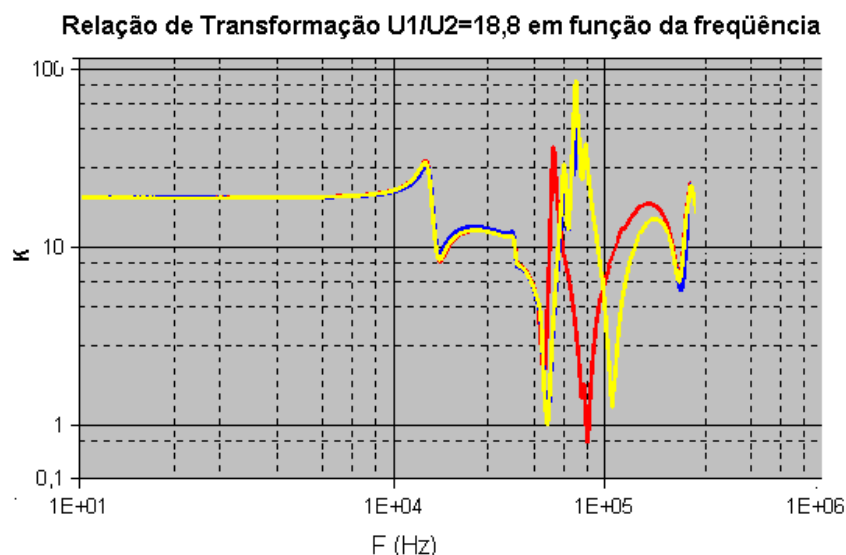


Figura 7. Curva indicando acentuada diferença entre curva padrão e a do transformador sob investigação.

3.3.3 Transformador de Distribuição da Subestação Igapó, 34,5 – 13,8 kV, 7 MVA.

Foi observado pelo operador aumento do ruído do transformador, em relação aos outros dois transformadores (similares) instalados na subestação.

O transformador foi desligado para investigação, o ensaio de SFRA (H) apresentou distorção, conforme curvas abaixo. Os demais ensaios elétricos apresentaram resultados normais.

O transformador foi aberto em oficina e foi verificada a existência de alguns calços soltos na bobina da fase 3. Os calços foram recolocados e foi feito reaperto da armadura.

As distorções verificadas nas curvas do ensaio de SFRA (H) antes da manutenção, foram bem pequenas, os programas que fazem análise automática dos resultados, consideram essas distorções normais, porém após a manutenção a simetria das curvas melhorou bastante, mostrando a sensibilidade do ensaio que identificou alterações pequenas na geometria dos enrolamentos.

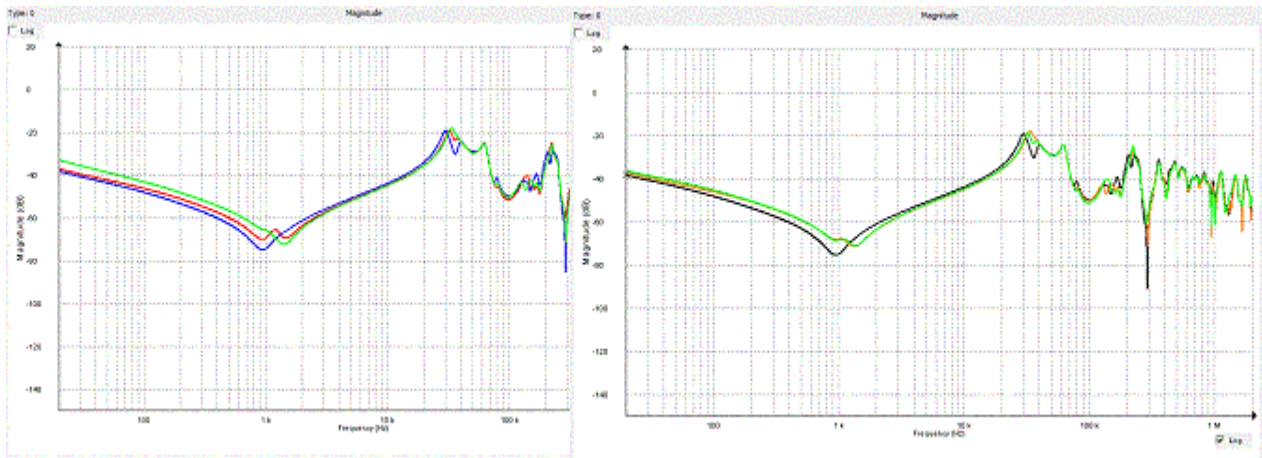


Figura 8. Curva antes da manutenção e após a manutenção, nessa segunda é possível observar que a simetria melhorou bastante.

4.0 - CONCLUSÃO

Podemos considerar que na COPEL a utilização dos ensaios de SFRA encontra-se em fase de experiência, os resultados apresentados principalmente nos ensaios após avaria de transformadores são muito promissores. Ainda demandará um tempo para comprovarmos a eficácia desses ensaios e para que os mesmos sejam normatizados, principalmente padronizar a maneira como os cabos de medida são conectados ao transformador.

O que pode se afirmar é que os instrumentos são de simples operação, os ensaios são rápidos, e que os resultados mostram que esses instrumentos serão de grande aplicação para as equipes de manutenção.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Sweetser, C.; McGrail, T.; - "Sweep frequency response analysis transformer applications", paper da DOBLE, 2003
- (2) Lapworth, J.; McGrail, T.; "Transformer Winding Movement Detection by Frequency Response Analysis, National Grid Company, U.K., DOBLE Client Conference, 1999

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Roberto de Aguiar
Técnico Especializado em Manutenção
Atua no Departamento de Engenharia de Manutenção da Transmissão

José Arinos Teixeira Junior
Engenheiro Eletricista UFPR 1979
Atua na Área de Pesquisa e Ensaios Elétricos de Alta Tensão do LACTEC
Mestre em Física pela UFPR 1992

Celso Luiz de Lima Martins
Técnico de Laboratório
Atua na Área de Pesquisa e Ensaios Elétricos de Alta Tensão do LACTEC