



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

CB/GTM/24

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - XIII

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

**A EXPERIÊNCIA DA ELETRONORTE NA IMPLANTAÇÃO DA ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA
PARA DIAGNÓSTICO DE REATORES E TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

**BELTRÃO, V. C. V. M. (*)
ELETROBRAS - ELETRONORTE**

RESUMO

A energia elétrica, que no mundo atual impacta diretamente na qualidade de vida, é proveniente de um sistema elétrico de potência, onde transformadores e reatores são utilizados para interligar os sistemas de geração transmissão e distribuição, fazendo a alteração e o controle dos níveis de tensão, respectivamente.

Juntos estes equipamentos representam uma parte significativa dos investimentos. E falhas de grande monta nestes resultam em índices de indisponibilidade maiores do que nos demais equipamentos, uma vez que: nem sempre se dispõe de unidade reserva; o custo de aquisição é elevado; os equipamentos são produzidos especificamente para uma determinada instalação, não sendo fabricados em série; os prazos envolvidos no reparo, fabricação e transporte são ordem de meses.

Dessa forma o acompanhamento e a monitoração de suas condições, desde a fabricação até a retirada de operação, são essenciais para que se reduzam os custos associados ao seu ciclo de vida, bem como para que se possa garantir a sua confiabilidade e a sua durabilidade.

Um levantamento estatístico elaborado a partir de perícias realizadas entre os anos de 2000 e 2008 para companhias seguradoras do setor elétrico brasileiro, aponta que de quase uma centena dos transformadores avaliados 69,9% falharam por defeito nas bobinas, 16,3% por falha em comutador e 10,9% por falha em bucha. Se forem levados em consideração apenas os transformadores de transmissão: 27% foram danificados por curto-circuito externo, 18% por defeito de fabricação, 18% por falha em bucha, 14% por falha em comutador, 9% por defeito após reparo.

Com base nos aspectos descritos, a Eletrobras Eletronorte aplicou a Análise de Resposta em Frequência (FRA), na avaliação de 44 equipamentos de 500 e 230 kV de sua propriedade, para detectar os principais defeitos e falhas que podem ser diagnosticados através deste ensaio, tais como: deformação da bobina (axial e radial), falha no núcleo magnético (laminiação curto circuitada), faltas do núcleo para a terra, conexões internas quebradas ou abertas, colapso parcial do enrolamento, espiras curto circuitadas e abertura do enrolamento.

PALAVRAS-CHAVE

Diagnóstico, Transformadores, Reatores, Análise de Resposta em Frequência.

1.0 - INTRODUÇÃO

Análise de resposta em frequência consiste em medir a função de transferência do equipamento, através da aplicação de um sinal senoidal de baixa tensão com frequência variável em um terminal do equipamento e medição do sinal transferido aos demais terminais.

Essas medidas podem ser usadas para detectar defeitos elétricos e mecânicos do equipamento, através da comparação entre a função de transferência obtida com assinaturas de referência, onde diferenças podem indicar um dano que pode ser investigado usando outras técnicas ou uma inspeção interna. ver Figura 1.

(*) Av. Tancredo Neves, nº 3300 – Sala Eng. Elétrica – Bloco C – CEP 66.077-830, Belém-PA, Brasil
Tel: (+55 91) 3210-8305 – Fax: (+55 91) 3210-8332 – Email: vanessa.beltrao@eletronorte.gov.br

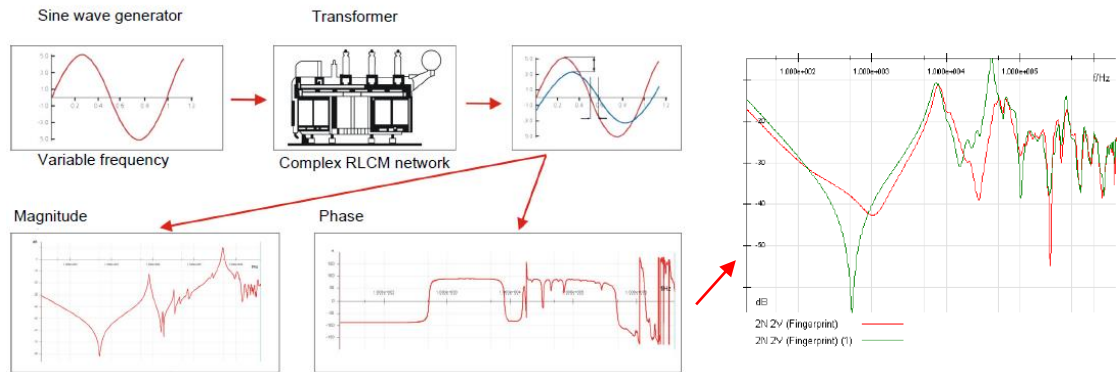


FIGURA 1 – Análise de Resposta em Frequência.
Fonte: Manual Franalyzer - Omicron

2.0 - IMPLANTAÇÃO

A implantação da técnica dentro da Eletronorte passou por quatro etapas distintas, descritas resumidamente a seguir:

- Estudo, que envolveu a pesquisa da técnica e de todas as vantagens e desvantagens que ela possui;
- Aquisição, que levou em consideração o custo x benefício dos instrumentos disponíveis no mercado;
- Capacitação, que qualificou profissionais a nível de execução e de análise;
- Aplicação, que englobou medição, diagnóstico e a consolidação de todo processo.

2.1 Estudo:

O circuito equivalente de um transformador/reator é composto de resistências, indutâncias e capacitâncias provenientes dos enrolamentos, assim como capacitâncias entre espiras, entre bobinas e destas para o tanque. Este circuito possui uma característica única de resposta em frequência, que funciona como uma impressão digital de cada equipamento. Desta forma, qualquer dano interno na sua estrutura, tanto na parte ativa (enrolamento e núcleo) como na parte passiva (estrutura, suportes, tanque, etc.), afeta diretamente os parâmetros deste circuito equivalente, e altera a resposta em frequência deste circuito, que comparado com a resposta original pode evidenciar a falha.

A função de transferência pode ser obtida pela relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada, onde a amplitude desta relação é dada por $k(\text{dB}) = 20 \cdot \log_{10}(V_{\text{out}}/V_{\text{in}})$ e a fase é dada por $\phi = \tan^{-1}(<V_{\text{out}}/<V_{\text{in}})$.

Outra medição importante é relação entre a tensão de entrada e a corrente de entrada em função da frequência, onde pode-se obter a função impedância $\frac{V_{\text{in}}}{I_{\text{in}}}(f)$ e a função admitância $\frac{I_{\text{in}}}{V_{\text{in}}}(f)$.

A avaliação dos resultados, baseada na comparação de diferentes representações gráficas dos elementos testados, pode ser realizada em três faixas distintas de frequência:

- Baixas frequências (inferior a 2kHz): problemas relacionados com ocorrências no núcleo. A avaliação deve levar em consideração o magnetismo residual nos circuitos magnéticos;
- Médias frequências (2kHz a 1 MHz): problemas relacionados a modificações na geometria, abertura e curto-circuito nos enrolamentos;
- Altas frequências (acima de 1 MHz): problemas relacionados com alteração de conexões de buchas, enrolamentos, comutadores e outros.

A Figura 2 mostra que nas médias frequências há uma subdivisão onde pode ser observada a interação entre os enrolamentos e a estrutura propriamente dita dos enrolamentos.

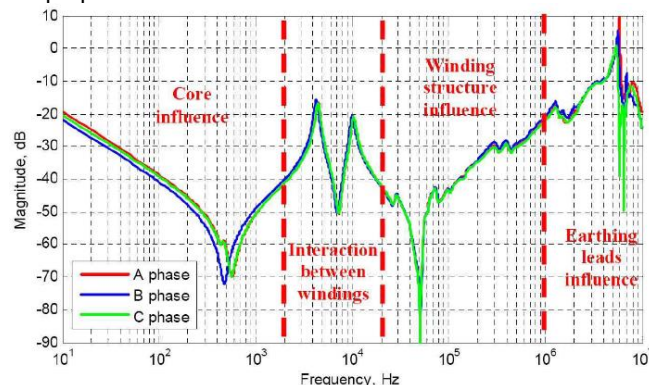


FIGURA 2 – Interpretação das escalas
Fonte: Princípios de Avaliação de Resultados – MP

As assinaturas podem ser comparadas:

- Com base no tempo – medições do mesmo equipamento em períodos de tempo distintos, sendo esta a comparação que apresenta um diagnóstico mais preciso;
- Com base nas fases – uma vez que os enrolamentos das três fases são fabricados com características muito similares;
- Com base em unidades “irmãs” – equipamentos fabricados em série e que apresentam o mesmo projeto.

O ensaio de resposta em frequência deve ser executado: na fábrica como garantia da qualidade; quando houver transporte do equipamento; após grandes manutenções que envolvam conexões de buchas, enrolamentos e comutadores; após ocorrência de curto-circuito; na alteração de gases específicos, após detecção de anomalias em ensaios tradicionais.

2.2 Aquisição:

Para aquisição do instrumento de teste, levou-se em consideração, além do custo, os recursos oferecidos pelos equipamentos disponíveis no mercado da época. Sendo fatores determinantes nesta escolha: a ampla faixa de variação de frequência; o sistema de aterramento usado para minimizar interferências externas; o fato do instrumento ter a capacidade de também medir a impedância terminal; e principalmente a disponibilidade de um algoritmo de análise dos resultados baseado na única Norma disponível no momento.



FIGURA 3 – Franalyzer.

Fonte: Manual Franalyzer - Omicron

2.3 Capacitação:

Um treinamento operacional para sete pessoas fazia parte do fornecimento do instrumento. Foram capacitados então um grupo de engenheiros de manutenção que seriam responsáveis pela execução e análise dos ensaios e posteriormente fariam a replicação do conhecimento dentro da empresa.

No entanto, ainda durante o treinamento, identificou-se que apesar de teoricamente se tratar de um ensaio simples de execução, sua análise demandava uma expertise que só seria adquirida com o tempo e estudo aprofundado sobre o tema.

2.4 Aplicação:

2.4.1 Medição:

Como o diagnóstico de resposta em frequência é baseado em comparações, o passo seguinte, após a capacitação, era iniciar as medições para criar um banco de dados com as assinaturas de cada equipamento de nossas instalações. A partir daí novas medições seriam realizadas somente quando fosse necessário um diagnóstico específico sobre cada equipamento.

As primeiras medições foram realizadas nos equipamentos reservas, pois estes já se encontravam fora de operação. Percebeu-se nesta etapa que existe uma infinidade de fatores que podem interferir na repetibilidade do ensaio e, consequentemente prejudicar o diagnóstico, tais como:

- Condição do equipamento – temperatura, condição do óleo e papel, posição do comutador, aterramentos de neutro e núcleo, etc.;
- Fatores estocásticos – ambiente eletromagnético, remanência, etc.;
- Testador e instrumento – cabos de medição, pontos de injeção, arranjo dos cabos de medição, etc.

Para contornar parte destes fatores foi necessário utilizar um formulário com algumas informações básicas sobre o teste, como: dados do equipamento, posição do comutador, grupo fasorial, tipo de núcleo, temperatura do óleo, motivo do teste, etc. E assim garantir a repetibilidade do ensaio sempre que fosse necessário executá-lo.

Foram realizados ensaios em 44 equipamentos de 500, 230 e 69 kV, conforme detalhado nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Equipamentos testados por classe de tensão

Equipamento	500 kV	230 kV	69 kV	Total
Transformador	-	21	2	23
Autotransformador	6	1	-	7
Reator	10	4	-	14

Tabela 2 – Equipamentos testados de 2008 a 2011

Ano	Teste	Subestação	Equipamento	Tensão (kV)	N° Série	Fabricante
2010	Assinatura	Macapá	Transformador	69	SP-9038	BBC
2010	Ensaio 1	Santana	Transformador	69	SP-9038	BBC
2009	Assinatura	Ariquemes	Transformador	230	92855	JEUMONT SCHNEIDER
2009	Assinatura	Ariquemes	Transformador	230	92856	JEUMONT SCHNEIDER
2009	Ensaio 1	Altamira	Reator	230	111195.2	AREVA
2011	Ensaio 1	Altamira	Reator	230	8929053	WEG
2008	Assinatura	Boa Vista	Reator	230	59750	ABB
2008	Assinatura	Boa Vista	Reator	230	59751	ABB
2009	Assinatura	Guamá	Transformador	230	500713	TUSA
2009	Ensaio 2	Guamá	Transformador	230	500710	WEG
2009	Assinatura	Guamá	Transformador	230	500715	TUSA
2009	Assinatura	Guamá	Transformador	230	500714	TUSA
2010	Ensaio 1	Guamá	Transformador	230	1004225601	WEG
2010	Ensaio 1	Guamá	Transformador	230	1004249537	WEG
2010	Ensaio 1	Guamá	Transformador	230	1004282510	WEG
2010	Assinatura	Imperatriz	Transformador	230	46589	COEMSA / SIEMENS
2010	Ensaio 1	Marabá	Transformador	230	46446	COEMSA
2010	Ensaio 1	Santa Maria	Transformador	230	1004165232	WEG
2010	Ensaio 1	Santa Maria	Transformador	230	1004062673	WEG
2009	Assinatura	Jirau	Transformador	230	92861	JEUMONT SCHNEIDER
2008	Ensaio 1	Utinga	Transformador	230	500710	WEG
2010	Assinatura	Utinga	Transformador	230	58657	ASEA
2010	Assinatura	Utinga	Transformador	230	58658	ASEA
2010	Assinatura	Utinga	Transformador	230	58604	ASEA
2010	Assinatura	Rurópolis	Autotransformador	230	59752	ABB
2011	Assinatura	Vila do Conde	Transformador	230	91429	JEUMONT SCHNEIDER
2008	Assinatura	Vila do Conde	Transformador	230	46435	COEMSA
2011	Assinatura	Jaru	Transformador	230	KA1793A001	TRAFO
2008	Assinatura	Colinas	Reator	500	1112061	AREVA
2008	Ensaio 1	Marabá	Autotransformador	500	217438-04	ALSTHOM / ABB
2008	Assinatura	Marabá	Reator	500	91430	JEUMONT SCHNEIDER
2008	Assinatura	Marabá	Reator	500	93064	JEUMONT SCHNEIDER
2008	Assinatura	Marabá	Reator	500	111429/1	AREVA
2008	Assinatura	Marabá	Reator	500	111429/2	AREVA
2008	Assinatura	Marabá	Reator	500	111429/4	AREVA
2008	Assinatura	Marabá	Reator	500	111429/3	AREVA
2009	Assinatura	Vila do Conde	Autotransformador	500	91420	JEUMONT SCHNEIDER
2009	Assinatura	Vila do Conde	Autotransformador	500	91421	JEUMONT SCHNEIDER
2009	Assinatura	Vila do Conde	Autotransformador	500	91422	JEUMONT SCHNEIDER
2009	Ensaio 1	Vila do Conde	Autotransformador	500	91425	JEUMONT SCHNEIDER
2009	Assinatura	Vila do Conde	Autotransformador	500	91426	JEUMONT SCHNEIDER
2008	Assinatura	Vila do Conde	Reator	500	91439	JEUMONT SCHNEIDER
2009	Ensaio 1	Vila do Conde	Reator	500	91438	JEUMONT SCHNEIDER
2008	Assinatura	Vila do Conde	Reator	500	91440	JEUMONT SCHNEIDER

2.4.2 Diagnóstico:

Será mostrado o estudo de caso de um autotransformador monofásico de 100 MVA – 500 / 230 / 13,8 kV que foi fabricado em 1980 e reformado em fábrica em 2002. A sequência dos fatos inicia em abril/2008, quando foram realizados ensaios de resposta em frequência e impedância terminal no equipamento para obter a assinatura do equipamento.

No final do mês de setembro do mesmo ano, houve atuação do relé diferencial (87) e relés de gás do comutador (63CSC) e do autotransformador (63). Após ensaios e inspeções foram constatados atuação da válvula de segurança do tanque principal, rompimento da membrana de alívio de pressão do comutador, presença de 367 ppm de acetileno, alteração de fator de potência, resistência ôhmica e relação de transformação.

Para enriquecer o diagnóstico, novos ensaios de resposta em frequência e impedância terminal foram realizados. As Figuras 4 a 6 mostram os pontos de injeção e coleta dos sinais, e as amplitudes das respostas em frequência obtidas.

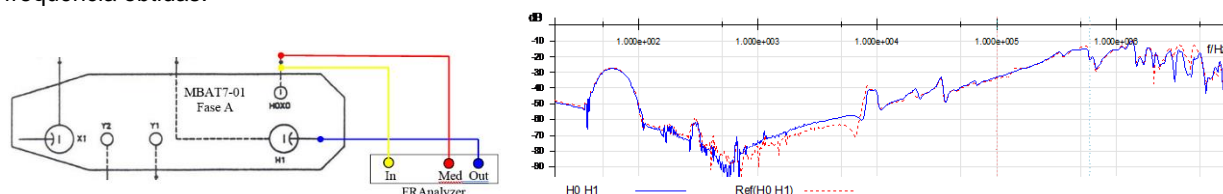


FIGURA 4 - Análise resposta em frequência no enrolamento de 500 kV.

Fonte: RT-VMB-2008013

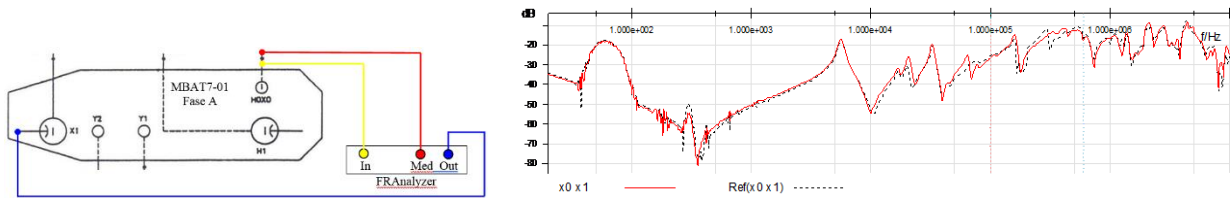


FIGURA 5 - Análise resposta em frequência no enrolamento de 230 kV.
Fonte: RT-VMB-2008013

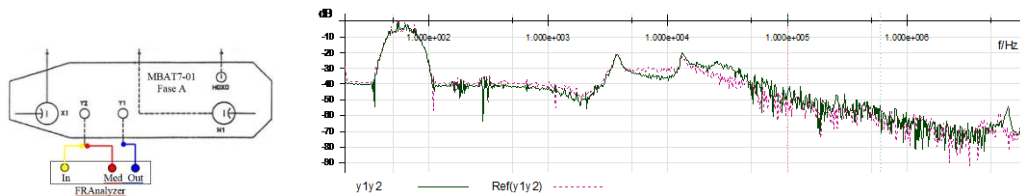


FIGURA 6 - Análise resposta em frequência no enrolamento de 13,8 kV.
Fonte: RT-VMB-2008013

Analisando as figuras 4 a 6, que se referem às respostas em frequências dos enrolamentos primário, secundário e terciário do autotransformador, percebe-se alterações em todos os enrolamentos. No entanto, após analisar as informações dos formulários de registro de teste, verificou-se que as medições de resposta em frequência do enrolamento terciário foram realizadas em condições diferentes. Em 04/2008 as medições foram realizadas com o enrolamento aterrado, já em 10/2008 este enrolamento foi medido sem aterramento. Por isto, para o enrolamento terciário, a análise de resposta em frequência não pôde ser levada em consideração.

As Figuras 7 a 8 mostram os pontos de injeção e coleta dos sinais, e as partes reais e imaginárias das impedâncias terminais obtidas para os enrolamentos primário, secundário e terciário do autotransformador. Percebe-se que os enrolamentos primário e secundário mostram diferenças significativas entre as medições realizadas em 04/2008 e as medições realizadas em 10/2008, indicando que havia um problema estrutural nos enrolamentos.

Já no enrolamento terciário, tais diferenças não são observadas, indicando que este enrolamento permaneceu nas mesmas condições que se encontrava na sua medição original, em 04/2008.

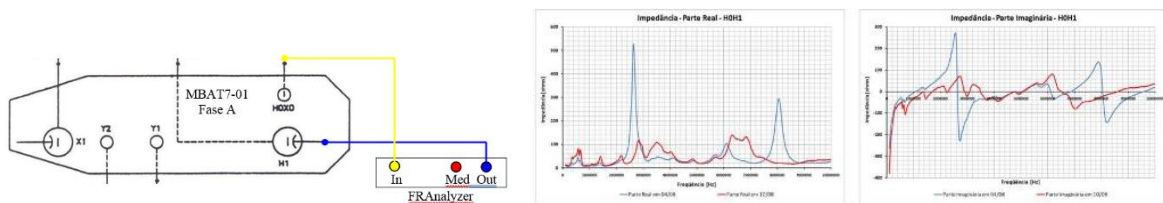


FIGURA 7 - Análise de impedância terminal no enrolamento de 500 kV.
Fonte: RT-VMB-2008013

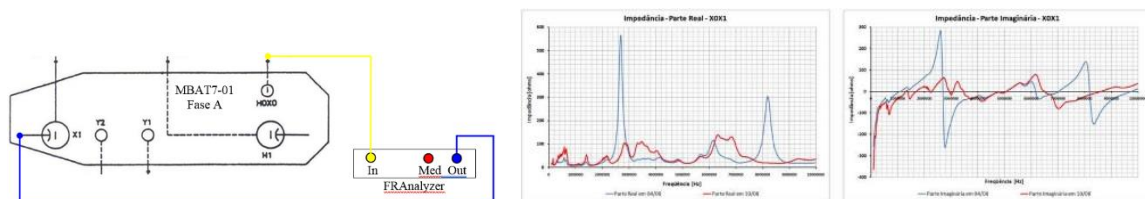


FIGURA 8 - Análise de impedância terminal no enrolamento de 230 kV.
Fonte: RT-VMB-2008013

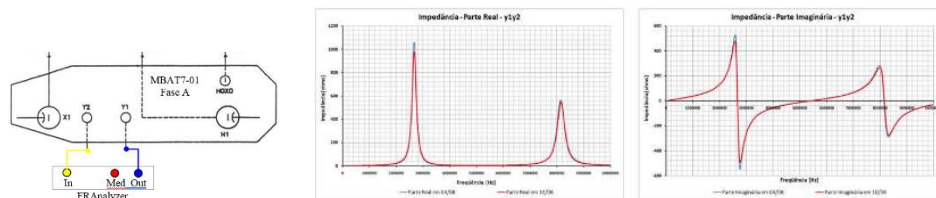


FIGURA 9 - Análise de impedância terminal no enrolamento de 13,8 kV.
Fonte: RT-VMB-2008013

Com base nos resultados obtidos, que apontavam haver um problema estrutural que atingia tanto o enrolamento primário quanto secundário, e no esquema de ligação do autotransformador, optou-se por fazer uma inspeção interna no equipamento iniciando pelo comutador, conforme mostra a Figura 10.

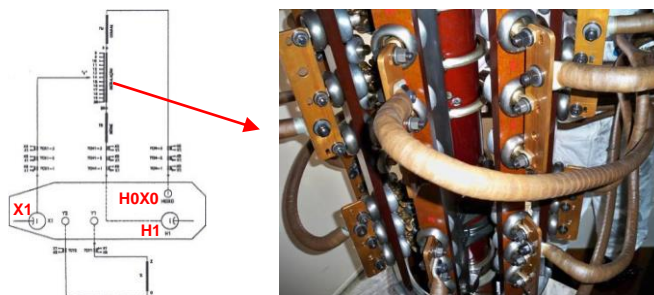


FIGURA 10 – Esquema de ligação do comutador no autotransformador.
Fonte: Adaptado de RT-VMB-2008013

A inspeção realizada no comutador, não encontrou nenhuma anomalia no cilindro de óleo nem na chave de carga, houve necessidade apenas de substituição da tampa do cilindro de óleo, que foi danificada na atuação da membrana de alívio de pressão do comutador.

Como não havia danos no comutador, decidiu-se baixar o óleo do tanque principal e inspecionar o circuito dos enrolamentos primário e secundário, onde foram constados danos no cabo de conexão H0X0, conforme sequência de fotos da inspeção mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Inspeção interna no tanque principal do autotransformador

<p>a) Vestígios de descarga elétrica e camada de papel isolante danificada</p>	<p>b) Vestígio de descarga elétrica na base do suporte isolante do condutor</p>	<p>c) Detalhe do caminho da descarga</p>
<p>d) Detalhe dos pinos isolantes de fixação do condutor</p>	<p>e) Ponto do dano na isolamento do condutor</p>	<p>f) Detalhe do condutor com mais de 60% dos fios rompidos</p>

Conclui-se que, o formato dos pinos isolantes gerou o desgaste na isolação de papel do cabo condutor o que provocou o rompimento da isolação neste ponto, com a abertura de arco elétrico. Esta situação foi caracterizada, pela seguradora, como defeito oculto, uma vez que pelo histórico de manutenção não havia como identificar tal defeito.

2.4.3 Consolidação:

O caso apresentado, foi somente um dos muitos que certificaram o potencial da técnica de resposta de frequência. No entanto, haviam muitas questões a serem alinhadas dentro do processo e, para resolvê-las, foi criado um grupo de estudo, com uma lista de tarefas a serem cumpridas:

a) Criar uma Instrução Técnica de Manutenção (ITM):

Com o objetivo de padronizar planejamento, execução, análise e arquivamento dos dados dos ensaios, foi elaborada uma ITM com os principais pontos a serem levados em consideração, conforme ilustra a Figura 11.

<p>INSTRUÇÃO TÉCNICA DE MANUTENÇÃO</p> <p>PROCEDIMENTOS DE ENSAIO DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA E IMPEDÂNCIA TERMINAL EM TRANSFORMADORES, AUTOTRANSFORMADORES E REATORES</p> <p>ITM-FRA-001-ELN</p>	<p>ÍNDICE</p> <table> <tr> <td>1. Objetivo</td><td>6. Atividades</td></tr> <tr> <td>2. Campo de aplicação</td><td>6.1. Ensaio de resposta em frequência</td></tr> <tr> <td>3. Considerações preliminares</td><td>6.1.1. Planejamento</td></tr> <tr> <td>3.1. Transformador / Autotransformador</td><td>6.1.2. Execução</td></tr> <tr> <td>3.1.1. Monofásicos</td><td>6.1.3. Análise</td></tr> <tr> <td>3.1.2. Trifásicos</td><td>6.2. Ensaio de impedância terminal</td></tr> <tr> <td>3.2. Reatores</td><td>6.2.1. Planejamento</td></tr> <tr> <td>3.2.1. Monofásicos</td><td>6.2.2. Execução</td></tr> <tr> <td>3.2.2. Trifásicos</td><td>6.2.3. Análise</td></tr> <tr> <td>4. Recursos para aplicação</td><td>7. Arquivamento no banco de dados</td></tr> <tr> <td>4.1. Recursos humanos</td><td>8. Referências</td></tr> <tr> <td>4.2. Recursos materiais</td><td>9. Anexos</td></tr> <tr> <td>5. Procedimentos de segurança</td><td></td></tr> </table>	1. Objetivo	6. Atividades	2. Campo de aplicação	6.1. Ensaio de resposta em frequência	3. Considerações preliminares	6.1.1. Planejamento	3.1. Transformador / Autotransformador	6.1.2. Execução	3.1.1. Monofásicos	6.1.3. Análise	3.1.2. Trifásicos	6.2. Ensaio de impedância terminal	3.2. Reatores	6.2.1. Planejamento	3.2.1. Monofásicos	6.2.2. Execução	3.2.2. Trifásicos	6.2.3. Análise	4. Recursos para aplicação	7. Arquivamento no banco de dados	4.1. Recursos humanos	8. Referências	4.2. Recursos materiais	9. Anexos	5. Procedimentos de segurança	
1. Objetivo	6. Atividades																										
2. Campo de aplicação	6.1. Ensaio de resposta em frequência																										
3. Considerações preliminares	6.1.1. Planejamento																										
3.1. Transformador / Autotransformador	6.1.2. Execução																										
3.1.1. Monofásicos	6.1.3. Análise																										
3.1.2. Trifásicos	6.2. Ensaio de impedância terminal																										
3.2. Reatores	6.2.1. Planejamento																										
3.2.1. Monofásicos	6.2.2. Execução																										
3.2.2. Trifásicos	6.2.3. Análise																										
4. Recursos para aplicação	7. Arquivamento no banco de dados																										
4.1. Recursos humanos	8. Referências																										
4.2. Recursos materiais	9. Anexos																										
5. Procedimentos de segurança																											

FIGURA 11 – Procedimento de ensaio de FRA.

Fonte: Adaptado de ITM-FRA-001-ELN

Um guia para testes de SFRA e IT, conforme ilustra a Figura 12, auxilia no planejamento do tempo e das condições necessárias para realização dos ensaios.

FIGURA 12 – Padrão de conexões do ensaio de FRA.
Fonte: Autoria própria

De acordo com a bibliografia consultada – Cigre WG A2.26 (Guide), DL 911/2004 (Standard), IEC 60076-18 (Draft) e IEEE WG PC57.149 (Guide) D8 – e, que trata sobre o circuito de medição e as conexões de SFRA, dependendo do equipamento sob ensaio, um transformador trifásico com três enrolamentos por exemplo, pode haver até 48 modos de teste, conforme ilustra a Figura 13.

Nº	In	Out	Others	Nº	In	Out	Others	Nº	In	Out	Others
	Red	Blue			Red	Blue			Red	Blue	
1	H0	H1	Open	17	H2	H0	Open	33	y3	y1	Short-circuit
2	H0	H2	Open	18	H3	H0	Open	34	H1	X1	Short-circuit
3	H0	H3	Open	19	X1	X0	Open	35	H2	X2	Short-circuit
4	X0	X1	Open	20	X2	X0	Open	36	H3	X3	Short-circuit
5	X0	X2	Open	21	X3	X0	Open	37	X1	y1	Short-circuit
6	X0	X3	Open	22	y2	y1	Open	38	X2	y2	Short-circuit
7	y1	y2	Open	23	y3	y2	Open	39	X3	y3	Short-circuit
8	y2	y3	Open	24	y1	y3	Open	40	H1	H0	Short-circuit
9	y3	y1	Open	25	H0	H1	Short-circuit	41	H2	H0	Short-circuit
10	H1	X1	Open	26	H0	H2	Short-circuit	42	H3	H0	Short-circuit
11	H2	X2	Open	27	H0	H3	Short-circuit	43	X1	X0	Short-circuit
12	H3	X3	Open	28	X0	X1	Short-circuit	44	X2	X0	Short-circuit
13	X1	y1	Open	29	X0	X2	Short-circuit	45	X3	X0	Short-circuit
14	X2	y2	Open	30	X0	X3	Short-circuit	46	y2	y1	Short-circuit
15	X3	y3	Open	31	y1	y2	Short-circuit	47	y3	y2	Short-circuit
16	H1	H0	Open	32	y2	y3	Short-circuit	48	y1	y3	Short-circuit

FIGURA 13 – Padrão de conexões do ensaio de FRA.
Fonte: Autoria própria

No entanto, realizar todas estas medidas, demandaria um tempo excessivo de indisponibilidade do equipamento, e por este motivo foi adotado, para este tipo de equipamento, um padrão reduzido de medições, conforme ilustra a Figura 14, mas estas conseguem caracterizar de forma satisfatória o equipamento sob análise.

Traces						
Name	Red	Blue	Tap Changer	Tertiary Winding	Other Windings	
H0 H1	H0	H1	1	closed	open	} Impedância Terminal
H0 H2	H0	H2	1	closed	open	
H0 H3	H0	H3	1	closed	open	
x0 x1	x0	x1	1	closed	open	
x0 x2	x0	x2	1	closed	open	
x0 x3	x0	x3	1	closed	open	
y1 y2	y1	y2	1	closed	open	
y2 y3	y2	y3	1	closed	open	
y3 y1	y3	y1	1	closed	open	
H1 x1	H1	x1	1	closed	open	
H2 x2	H2	x2	1	closed	open	
H3 x3	H3	x3	1	closed	open	
x1 y1	x1	y1	1	closed	open	
x2 y2	x2	y2	1	closed	open	
x3 y3	x3	y3	1	closed	open	

FIGURA 14 – Padrão de conexões do ensaio de SFRA e IT.
Fonte: Adaptado de Franalyzer - Omicron

Outras configurações de ensaio como faixa de frequência, nº de pontos medidos e modo de teste, conforme ilustra a Figura 15, podem influenciar significativamente na resposta obtida do equipamento sob ensaio, assim é importante padronizar essas configurações e garantir com isso a repetibilidade das medidas.

Settings

Start Frequency: 20 Hz
 Stop Frequency: 2 MHz
 Sweep Mode: customized frequency ranges
 Points / Sweep: 1000
 Receiver Bandwidth: <adapt automatically>
 Attenuator: <adapt automatically>
 Input Impedance: 50 Ω

Customized Frequency Ranges:

From Frequency	To Frequency	Sweep Mode	Points
20 Hz	100 Hz	logarithmic	50
100 Hz	1 kHz	logarithmic	210
1 kHz	10 kHz	logarithmic	210
10 kHz	100 kHz	logarithmic	210
100 kHz	1 MHz	logarithmic	210
1 MHz	2 MHz	logarithmic	110

Sweep

Start Frequency: 100.000 kHz
 Stop Frequency: 20.000 MHz
 Center Frequency: 10.050 MHz
 Span: 19.900 MHz
 Sweep Mode: Linear
 Number of Points: 801
 Copy from Zoom

Measurement

Reference Resistance: 50.00 Ω

Trace 1

Color: █
 Measurement: Impedance
 Display: Data
 Format: Mag
 Ymax: 100.000
 Ymin: -100.000

Trace 2

Color: █
 Measurement: Impedance
 Display: Data
 Format: Phase[1]
 Ymax: 200.00°
 Ymin: -200.00°

FIGURA 15 – Configurações do ensaio de SFRA e IT.

Fonte: Adaptado de Franalyzer / Bode 100 - Omicron

Com relação à análise dos ensaios, estas são baseadas na comparação das curvas medidas, e no caso específico do ensaio de SFRA, também são usados dois algoritmos de análise, NCPRI e DL 911/2004, conforme ilustra a Figura 16.

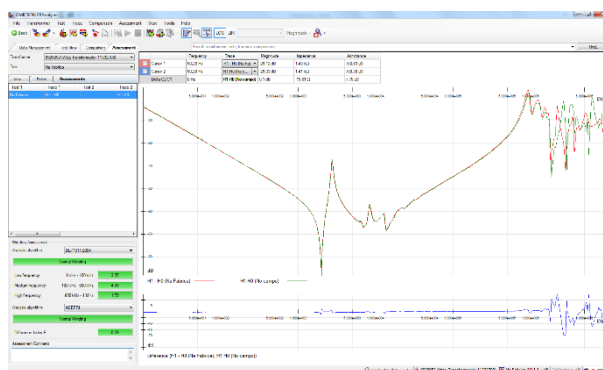


FIGURA 16 – Análise de ensaio de SFRA.

Fonte: Adaptado de Franalyzer - Omicron

O instrumento usado na medição de impedância terminal, Franalyzer – Omicron, disponibiliza os resultados no formato de arquivo “*.csv”, valores separados por vírgula. Anteriormente, estes arquivos precisavam ser tratados no Microsoft Excel, para serem transformados em gráficos e usados para o diagnóstico, isso demandava tempo e era passível de erro.

Foi criado então um script em linguagem VBA (*Visual Basic for Applications*) da Microsoft que gera automaticamente os gráficos das medições de impedância terminal e possibilita a comparação de duas ou três curvas medidas. A Figura 17 mostra as duas formas de análise e também *links* para a Lição Ponto a Ponto, que descreve como usar o script, e para o manual do instrumento de ensaio, facilitando o acesso a informações importantes para o responsável pelo ensaio.

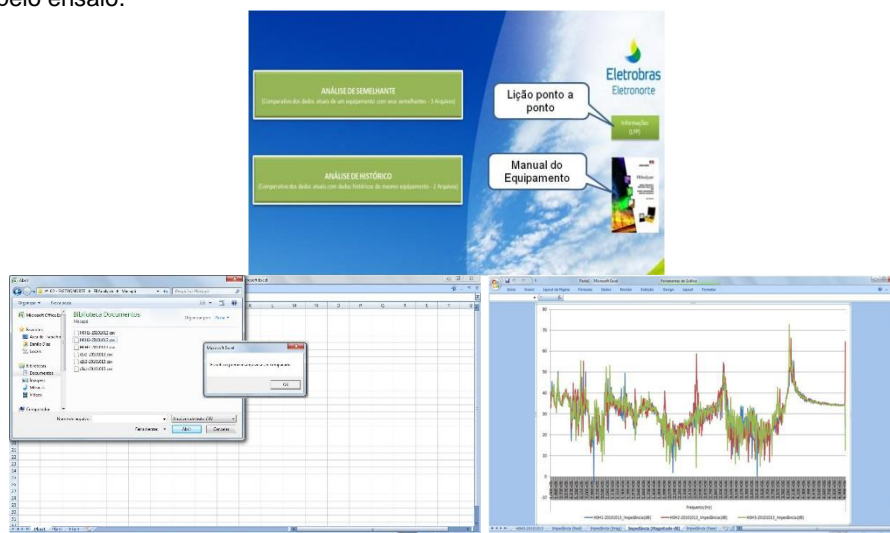


FIGURA 17 – Telas do Franalyzer Grafics.

Fonte: Franalyzer Grafics

Os relatórios foram compilados de forma a serem elaborados rapidamente e mostrar resultados concisos e diretos para uma tomada de decisão, conforme mostra a Figura 18.



FIGURA 18 – Relatórios de SRA e IT.
Fonte: Adaptado de RT-VMB-2015003

O arquivamento dos dados de ensaios segue alguns padrões: *Medições* – “nº de Série_Cod. Operacional_aaaammdd” e *Relatórios* – “RT-3 iniciais-aaaa sequencial”.

b) Alterar a especificação de transformadores e reatores:

Para que todos os equipamentos tivessem suas assinaturas registradas desde a fábrica, foi necessário alterar a especificação de transformadores e reatores, incluindo um item para realização do ensaio de resposta em frequência na fábrica (antes do transporte) e no campo (após sua montagem na base).

As condições de teste, configurações, quantidades de medidas, formato de relatórios e critério de aprovação são definidas em consenso com o fornecedor. Sendo uma cópia dos arquivos contendo as medidas de fábrica e de campo entregues à Eletronorte para inserção em seu banco de dados. Isto é importante, pois é com base nestas medidas que serão feitos os diagnósticos da condição destes equipamentos, durante todo o seu ciclo de vida.

c) Participar do grupo de trabalho GT D1.35 do Cigre:

Como este grupo de trabalho é responsável pelas questões referentes à FRA no Brasil, inclusive com a atribuição de elaborar normas e procedimentos, é extremamente importante a participação de pelo menos um representante no grupo e assim estar em consonância com as últimas atualizações sobre a técnica.

3.0 - CONCLUSÃO

Os ensaios de resposta em frequência e impedância terminal se mostraram uma ferramenta importante para diagnóstico de problemas elétricos e mecânicos internos aos transformadores, autotransformadores e reatores através da comparação de assinaturas.

Apesar de muitos problemas terem sido vencidos durante a implantação da técnica na Eletronorte, ainda existem muitas dificuldades que precisam ser superadas:

- Existem poucos cursos de capacitação;
- A formação de especialistas requer tempo e dedicação;
- A execução, análise e diagnósticos ainda são considerados complexos;
- Falta de padronização de forma geral, pois não existe uma Norma no Brasil.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Bechara, R. – Análise de Falhas de Transformadores de Potência – Dissertação (mestrado em Eng. Elétrica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- (2) A2.26 Working Group (CIGRÉ) – Brochure 342 Mechanical-Condition Assessment of Transformers Windings Using Frequency Analysis (FRA), 2008.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Vanessa Beltrão é Engenheira Eletricista e Doutoranda em Sistemas de Energia pela Universidade Federal do Pará - UFPA. Atualmente é engenheira de manutenção elétrica nas Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A, Eletrobras-Eletronorte e instrutora da UCEL - Universidade Corporativa Eletronorte. Tem experiência na área de Transmissão da Energia Elétrica, atuando nos temas de Gerenciamento da Manutenção, Ensaios Elétricos, Análise de Ocorrências e Pesquisa de Metodologias para Diagnóstico em Ativos do Setor Elétrico.