

**GRUPO - XIII**

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

**A INFLUÊNCIA DA POLARIDADE DA CHAVE COMUTADORA SOB CARGA DE AUTOTRANSFORMADORES NOS ENSAIOS DE ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA COMISSIONAMENTO AT2 SE JAURU.**

**S. A. Cleiner**  
**Eletrobrás**  
**Eletronorte**

**D. Q. Gil Alessandro**  
**Eletrobrás**  
**Eletronorte**

**A. K. A. M. Lena**  
**ABB**

**M. E. C. Paulino**  
**Adimarco**

**RESUMO**

Em meados de 2011 a Eletrobras Eletronorte adquiriu um banco de autotransformadores 230/138 kV para ampliação da SE Jauru. Nas especificações foram solicitados ensaios de FRA (*Frequency Response Analyses*) na fábrica e no campo. Em uma das unidades autotransformadoras do referido banco foi verificada uma discrepância considerável entre os ensaios realizados em fábrica com os ensaios realizados em campo. O objetivo deste Informe Técnico é analisar e discutir a influência da polaridade da chave comutadora dos transformadores nos ensaios de Análise de Resposta em Frequência e propor metodologias para reduzir o risco de erros que podem culminar em diagnósticos imprecisos.

Palavra - Chave

Autotransformadores - Polaridade - Chaves comutadora sob carga (OLTC) - Ensaios Elétricos  
Análise de resposta em frequência

**1. INTRODUÇÃO**

O Ensaio de Análise de Resposta em Frequência (FRA do inglês *Frequency Response Analyses*) em transformadores de potência tem como principal finalidade detectar deformações nos enrolamentos, núcleo e conexões internas, tais deformações podem ser resultantes de impactos durante o transporte do equipamento, forças eletromagnéticas resultante de faltas no sistema ao qual esta conectado, falhas no comutador sob carga, descarga atmosféricas, ou mesmo uma falta interna no equipamento. A técnica consiste em analisar a partir de um sinal de tensão em uma ampla faixa de frequência as respostas elétricas (funções de transferências) da interação entre enrolamento, núcleo e estrutura interna. Verificando assim deformações internas a partir da alteração do circuito R-L-C existente em função dessas interações. O circuito representativo de um transformador é complexo e composto de resistências, indutâncias e capacitâncias provenientes dos enrolamentos, assim como capacitâncias parasitas entre espiras, entre bobinas e destas para o tanque. Como demonstrado na figura 1:

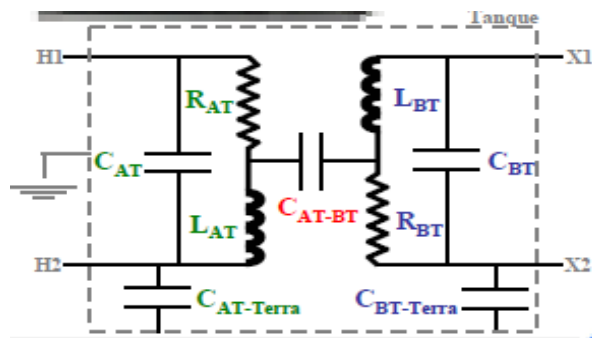


Figura 1 – Circuito representando um transformador.

Como a fabricação destes equipamentos é de forma artesanal esse circuito possui características únicas para cada transformador, resultando em uma impressão digital, assinatura da máquina. Os estudos da resposta em frequência dessa função de transferência aplicada em amplitude e fase podem ser representados no domínio do tempo ou no

domínio da frequência sendo relacionado por uma transformada, usando as relações de Fourier, a função  $F(j\omega)$  é a transformada de Fourier de  $f(t)$ , e  $f(t)$  é a transformada inversa de Fourier de  $F(j\omega)$ . Expressa pela equação abaixo.

$$f(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} \cdot f(t) \cdot dt \leftrightarrow f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} \cdot F(j\omega) \cdot d\omega \quad (1)$$

A análise das respostas de sistemas baseadas no domínio do tempo, não é trivial, levando em consideração a dificuldade de identificar características predominantes dos sistemas, tais como a ressonância. As técnicas do domínio da frequência apresentam mais clareza e confiança na determinação de tais características. Os traços obtidos nos resultados dos ensaios de FRA são a representação gráfica das funções amplitude e fase da resposta em frequência na escala logarítmica. De forma que a frequência é representada no eixo horizontal e a amplitude no eixo vertical representada em função  $20\log_{10}(\text{amplitude})$  dos sinais de tensão de entrada e saída, conforme expressão abaixo:

$$A(dB) = 20 \cdot \log_{10} \left[ \frac{V_{Saída}}{V_{Entrada}} \right] \quad (2)$$

E a relação das fases é representada pela seguinte expressão:

$$A(dB) = \tan^{-1} \left[ \frac{V_{Saída}}{V_{Entrada}} \right] \quad (3)$$

Desta forma, a avaliação destes resultados é baseada em comparações dessas representações gráficas dos elementos testados. Um dos entraves da análise de resposta em frequência é a falta de procedimento padronizado internacional para a comparação dos traços obtidos, ficando a cargo da experiência técnica dos analistas, o que pode levar ao erro na interpretação das diferenças entre as duas assinaturas.

Segue abaixo tabela 1 que auxilia na interpretação dos dados relacionando a faixa de frequência com a estruturação interna dos transformadores:

Tabela 1 – Faixas de frequências referenciando a estrutura interna de transformadores [1]

Faixa de Frequência	Estrutura interna transformadores
10 Hz à 5 kHz	Núcleo
5 kHz à 50 kHz	Interação entre os enrolamentos
50 kHz à 1 MHz	Estrutura do Enrolamento
1 MHz à 2 MHz	Cabos de medida, conexões e aterramento

Devido à importância desses diagnósticos e o método comparativo utilizado na análise, a repetitividade dos ensaios, procurando manter as mesmas condições do ensaio de referência, é fundamental para assertividade da análise. Existem diversos fatores que podem influenciar nessa repetitividade, culminando em diagnósticos imprecisos, um deles é a posição da chave comutadora sobcarga (OLTC) em Autotransformadores.

O enfoque deste artigo técnico é descrever uma aplicação real do ensaio de Análise de Resposta em frequência (FRA) em equipamentos recém-adquiridos, onde foram constatadas discrepâncias consideráveis entre testes realizados em fábrica e testes realizados em campo (comissionamento). A ferramenta de análise comparativa apontava para uma avaria interna na unidade Autotransformadora. Descreveremos a seguir toda a pesquisa realizada para o estudo do problema, elencando todos os ensaios e suas repetições, demonstrando os resultados que apontaram um fato inesperado que poderia ter culminado em um grave erro de diagnóstico.

## 2. PREMISSAS, METODOLOGIAS E ENSAIOS.

A Eletrobras Eletronorte adquiriu em meados de 2011 um Banco de Autotransformadores 230/138/13,8 kV com 3 unidades de 100 MVA cada, denominado AT6-02 para ampliação da SE Jauru 230/138 kV pertencente ao sistema interligado nacional situada no sudoeste do Mato Grosso. A SE Jauru é responsável pela transmissão de toda energia gerada no complexo hidrelétrico da região do Vale do Jauru, além de ser a interligação elétrica entre dois estados; Mato Grosso e Rondônia, logo essa subestação é considerada estratégica pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Uma falha de um equipamento na SE Jauru pode levar ao blecaute os estados de Rondônia e Acre. Visando a confiabilidade na operação do Banco de Autotransformadores foram especificados ensaios de FRA na fábrica logo após a confecção das unidades monofásicas e no campo após o transporte, durante o comissionamento dessas máquinas. O objetivo era se certificar da inexistência de avarias internas no equipamento e obter também um resultado (traço) de referência para futuras análises. O instrumento utilizado nos ensaios em fábrica e em campo foi o SFRA Doble M5400. Para comparação dos resultados e diagnósticos de defeitos foi usada a ferramenta computacional FRAnalyser 2.2 da OMICRON que utiliza a norma DL/T911-2004.

### 2.1 Ensaios realizados em Fábrica.

As medições de FRA em fábrica, quando especificada pelo cliente, são realizadas durante os ensaios de rotina. Apesar da falta de normatização, alguns fabricantes já realizam o FRA em todos os seus equipamentos como procedimento padrão. O principal objetivo do ensaio de FRA em fábrica é obter um traço (Assinatura) de referência para futuras análises. A figura 2 mostra o esquema elétrico do Autotransformador Monofásico e seus respectivos terminais.

No diagrama a seguir percebe-se que a chave comutadora sobcarga esta conectada ao terminal X1 no lado de 138 kV. Essa chave possui 17 posições de TAP e é composta por resistores não lineares com varistores de óxido de Zinco. Sendo que, para as posições de TAP 1 à TAP 9, os resistores possuem polaridade positiva. Contudo para as posições de TAP 9 à TAP 17, os resistores possuem polaridade negativa.

Segue abaixo tabela 2.1 com todos os arranjos de medição para os ensaios de FRA realizados nas unidades do AT6-02 da SE Jauru.

Nº do Ensaio	Terminais Ensaiaados	Arranjo de Medição	Terciário(Y1-Y2)	Posição OLTC (TAP)
1	H1-H0X0	X1-H0X0 curto-circuitados	Aberto	9
2	X1-H0X0	Terminais Enrol. principal flutuando	Aberto	9
3	H1-H0X0	Terminais Enrol. principal flutuando	Curto-circuitados	9
4	X1-H0X0	Terminais Enrol. principal flutuando	Curto-circuitados	9
5	H1-X1	Terminais Enrol. principal flutuando	Aberto	9
6	Y1-Y2	Terminais Enrol. principal flutuando	-	9

## 2.2 Ensaio realizados em campo.

Durante a obtenção dos traços resultantes dos ensaios, em todos os arranjos de medições, foram notadas discrepâncias visuais (sem o auxílio de ferramenta computacional)consideráveis na unidade de numero de série 1ZBR61065, correspondente a fase "A" do Banco de Autotransformadores.A figura a seguir mostra o comparativo entre as assinaturas (tracos) evidenciando área com maior discrepância.

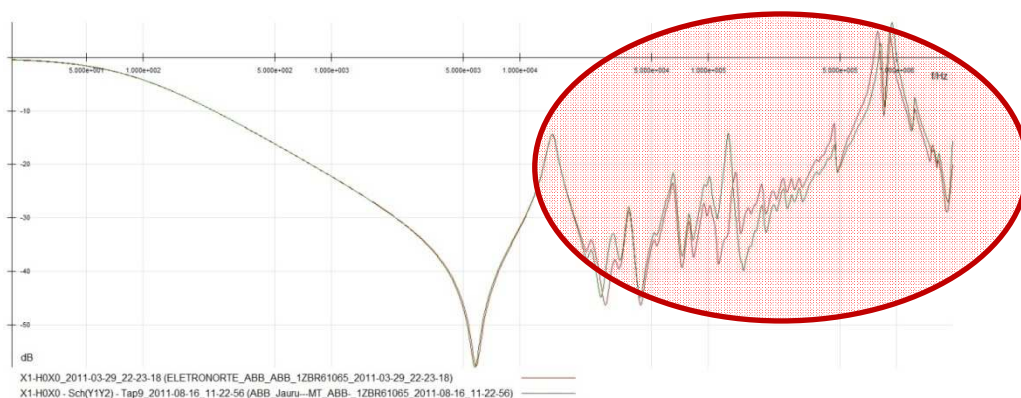


Figura 3 - Traços comparativos de medições de fábrica(vermelho)x campo (Verde) - configuração de teste X1-H0X0-SCH (Y1Y2)

Após as análises comparativas que serão mais detalhadas no item resultados e análises, a equipe técnica da SE Jauru solicitou a realização de novos ensaios para a certificação de que não existia nenhuma avaria interna no equipamento.

### 2.3 – Repetições dos ensaios em campo para pesquisa de defeito.

A pesquisa de defeito, com a repetição dos ensaios em campo, foi realizada com urgência na unidade IZBR61065, a fim de se obter uma constatação sobre a real condição do equipamento, evitando assim maiores transtornos. Os arranjos de ensaios foram os mesmos, mas com variações da posição do TAP1 ao 17 na chave comutadora sobcarga (OLTC), conforme tabela 3 a seguir:

Tabela 3 - Pesquisa defeito com variação do OLTC

Nº Ensaio em Campo na Pesquisa de Defeito	Variação da Posição do OLTC (Chave comutadora sob carga)	Terminais Ensaiaados
1.1 / 1.2 / 1.3 / 1.4 / 1.5 / 1.6	17 / 9C / 9B(-) / 9B(+) / 9A / 1	H1-H0X0
2.1 / 2.2 / 2.3 / 2.4 / 2.5 / 2.6	17 / 9C / 9B(-) / 9B(+) / 9A / 1	X1-H0X0
3.1 / 3.2 / 3.3 / 3.4 / 3.5 / 3.6	17 / 9C / 9B(-) / 9B(+) / 9A / 1	H1-H0X0
4.1 / 4.2 / 4.3 / 4.4 / 4.5 / 4.6	17 / 9C / 9B(-) / 9B(+) / 9A / 1	X1-H0X0
5.1 / 5.2 / 5.3 / 5.4 / 5.5 / 5.6	17 / 9C / 9B(-) / 9B(+) / 9A / 1	H1-X1
6.1 / 6.2 / 6.3 / 6.4 / 6.5 / 6.6	17 / 9C / 9B(-) / 9B(+) / 9A / 1	Y1-Y2

As posições 9A, 9B e 9C são posições intermediárias da posição central do OLTC, para fins práticos de operação, no comando elétrico local ou remoto do comutador, a chave sai da posição 8 ou 10 direto para posição 9. As posições intermediárias só se tornam acessíveis na operação manual (manivela) da chave. Conforme figura 4, demonstrada abaixo, a posição 9B é a central. Sendo que 9B(-) é equivalente a posição 9C e 9B(+) é equivalente a posição 9A. Os sinais (+) e (-) indicam a polaridade da chave comutadora.

ENROLAMENTO DE BAIXA TENSÃO						
TERMINAIS	COMUTADOR DE DERIVAÇÕES EM CARGA		TENSÃO (V)	CORRENTE (A)		
	POS.	O COM. A COM.		ONAN (60MVA)	ONAF 1 (80MVA)	ONAF 2 (100MVA)
X1-H0X0	1	1	151800/ $\sqrt{3}$	684,6	912,8	1141,0
	2	2	150075/ $\sqrt{3}$	692,5	923,3	1154,1
	3	3	148350/ $\sqrt{3}$	700,5	934,0	1167,5
	4	4	146625/ $\sqrt{3}$	708,8	945,0	1181,3
	5	5	144900/ $\sqrt{3}$	717,2	956,3	1195,3
	6	6	143175/ $\sqrt{3}$	725,8	967,8	1209,7
	7	7	141450/ $\sqrt{3}$	734,7	979,6	1224,5
	8	8	139725/ $\sqrt{3}$	743,8	991,7	1239,6
	9A	9	138000/ $\sqrt{3}$	753,1	1004,1	1255,1
	9B	K				
	9C	9				
	10	8	136275/ $\sqrt{3}$	762,6	1016,8	1271,0
	11	7	134550/ $\sqrt{3}$	772,4	1029,8	1287,3
	12	6	132825/ $\sqrt{3}$	782,4	1043,2	1304,0
	13	5	131100/ $\sqrt{3}$	792,7	1056,9	1321,2
	14	4	129375/ $\sqrt{3}$	803,3	1071,0	1338,8
	15	3	127650/ $\sqrt{3}$	814,1	1085,5	1356,9
	16	2	125925/ $\sqrt{3}$	825,3	1100,4	1375,5
	17	1	124200/ $\sqrt{3}$	836,7	1115,7	1394,6

Figura 4 – Detalhamento das posições do comutador sobre carga.

## 3. RESULTADOS E ANÁLISES

Como já mencionado anteriormente a ferramenta utilizada para comparação entre os traços obtidos em fábrica e em campo foi um software da OMICRON, o FRA Analyse 2.2.

Os resultados e análises aqui demonstrados serão a cerca dos ensaios, que apresentaram diferenças significativas, realizados na unidade autotransformadora de nº de série 1ZBR61065, correspondente a fase "A" do AT6-02 e algumas análises comparativas dessa unidade com sua unidade "irmã" de nº de série 1ZBR61066, correspondente a fase "B" do AT6-02 da SE Jauru.

### 3.1 Ensaios Fábrica x Campo (Comissionamento).

A figura 5 mostra a comparação entre as assinaturas obtidas na fábrica e no primeiro ensaio em campo, a partir do teste Nº 2 (X1-H0X0 - outros terminais fluando) da unidade IZBR61065 com o OLTC na posição 9, sem levar em consideração posições intermediárias 9A e 9C.

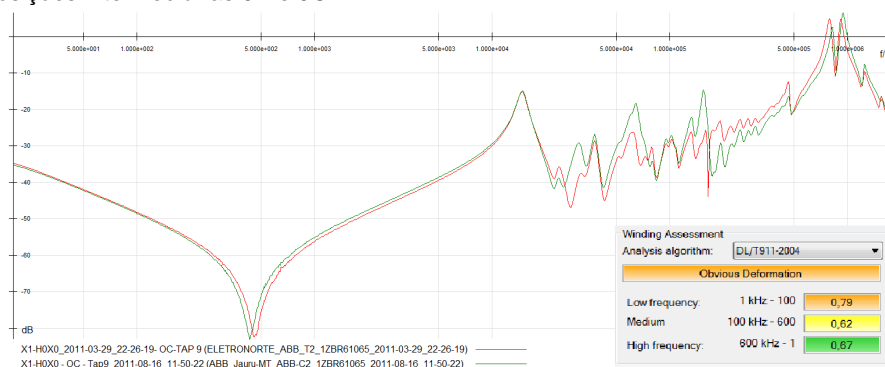


Figura 5 Análise do ensaio de nº 2 (X1-H0X0- OC) - Fábrica (Vermelho) e Campo (Verde)

O algoritmo de análise utilizado confirmou a suspeita de discrepância, já notada visualmente na Figura 3, apontando para uma deformação óbvia no equipamento medido. Essa diferença era mais acentuada à média frequência, indicando uma provável avaria no enrolamento da unidade autotransformadora.

A fim de se obter mais embasamento nos resultados, buscando uma maior assertividade no diagnóstico, fizemos uma análise comparativa entre as assinaturas obtidas no ensaio em campo da unidade 1ZBR61065, com a assinatura obtida no ensaio em fábrica da sua unidade "irmã" 1ZBR61066 com o mesmo arranjo de ensaio demonstrado acima na figura 5 (X1-H0X0 - outros terminais flutuando). Abaixo, na figura 6, segue o resultado dessa análise.



Figura 6 -Análise do ensaio de nº 2 (X1-H0X0- OC)- unidades irmãs - Fábrica 1ZBR61066- Fase "B" (vermelho) e Campo 1ZBR61065- Fase "A" (Verde)

O resultado acima, demonstrado na figura 6, indica a ausência de qualquer avaria na análise comparativa entre as unidades irmãs (testes em fábrica x campo). As pequenas diferenças entre as assinaturas são normais, visto que se trata de unidades diferentes. Como o comparativo entre as outras unidades (Fábrica x Campo) apresentavam similaridade, sendo que somente o teste de fábrica da 1ZBR61065 apresentava discrepância com os demais, a suspeita se recaiu para alguma irregularidade realizada no ensaio em fábrica dessa unidade.

### 3.2 Ensaios Fábrica x Campo x Pesquisa de Defeito.

A figura 7, abaixo, mostra a análise comparativa entre a assinatura obtida no ensaio nº 2 (X1-H0X0 - outros terminais flutuando) realizado nos primeiros testes em campo e o seu ensaio equivalente nº 2.4 (OLTC na posição central "9B+" conforme tabela 3) realizado durante a pesquisa de defeito na repetição dos testes em campo.

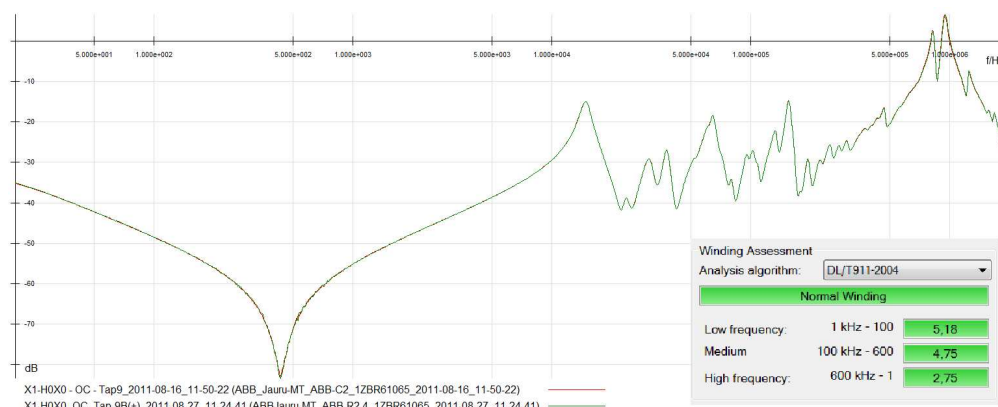


Figura 7-Análise do ensaio de nº 2 (X1-H0X0- OC) - Primeiro teste em campo (Vermelho) e Pesquisa de defeitos repetição dos testes em campo (Verde).

O resultado acima, demonstrado na figura 7, indica a total similaridade entre as assinaturas analisadas, constatando que no primeiro ensaio em campo, como as condições dos ensaios eram exatamente as mesmas, o OLTC estava na posição central "9B+".

A figura 8, abaixo, mostra a análise entre as assinaturas obtidas no ensaio nº 2 (X1-H0X0 com os outros terminais flutuando) em fábrica, e o seu ensaio equivalente nº 2.3 (OLTC na posição central intermediária "9B-", ver tabela 3) realizado durante a pesquisa de defeito na repetição dos testes em campo.

A análise comparativa a seguir, demonstrada na figura 8, mostra a similaridade entre as duas assinaturas analisadas, indicando a ausência de avaria. Essa constatação nos proporcionou definir o motivo das discrepâncias entre os traços de fábrica e campo para unidade 1ZBR61065.

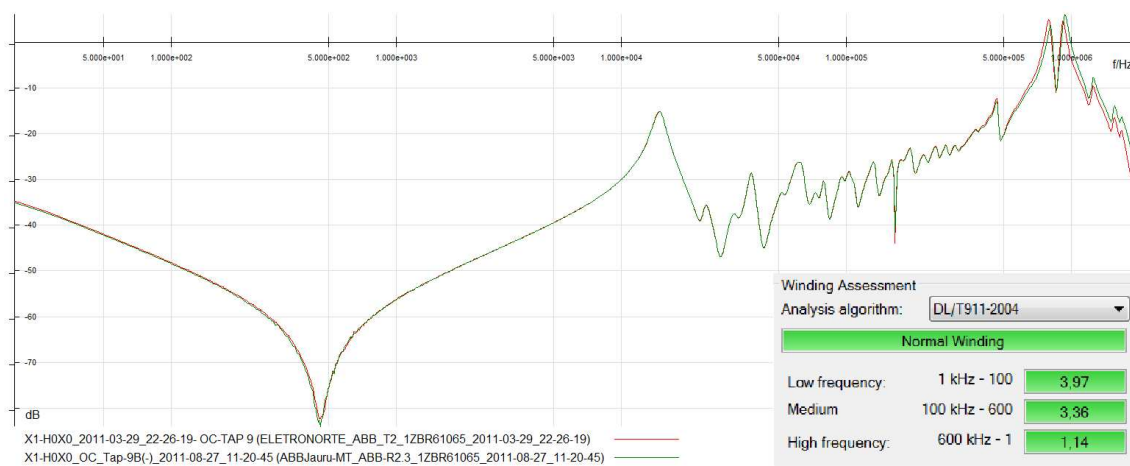


Figura 8 -Análise do ensaio de nº 2 (X1-H0X0- OC) - Teste em fábrica (Vermelho) e Pesquisa de defeitos repetição dos testes em campo (Verde).

#### 4. CONCLUSÕES

As Conclusões, a seguir, se aplicam aos ensaios de FRA realizados em fábrica, campo e a repetição dos ensaios em campo, denominada pesquisa de defeito, a cerca da suspeita de avaria interna da unidade autotransformadora monofásica, nº de série 1ZBR61065 correspondente à fase "A" do AT6-02 da SE Jauru.

- 4.1 A discrepância entre as assinaturas(traços) obtidas a partir dos ensaios em fábrica e nos primeiros ensaios em campo foram em função da influência do fluxo magnético causado pela polaridade da chave comutadora sobcarga.
- 4.2 É sabido que a chave comutadora sobcarga da referida unidade tem 17 posições, sendo que para as posições de 1 a 9(+), a polaridade dos resistores não lineares com óxido de zinco que compõe o comutador OLTC é positiva, para as posições de 17 à 9(-), inverte-se a polaridade desses resistores, passando a ser negativa (Ver Figura2).Portanto quando a chave comutadora sobcarga (OLTC) é deslocada da posições 1 à 8 para a posição central 9B, os resistores continuam com a polaridade positiva. Por sua vez quando a chave é deslocada da posição 17 à 10 para a posição central 9B os resistores mantêm a polaridade negativa. Os resistores não lineares só invertem a polaridade quando a chave comuta da posição 8 para a 10 ou vice-versa (Ver figura 4). Logo com a chave comutadora sobcarga (OLTC) na posição central 9B, a polaridade dos resistores não lineares, depende da última posição em que o OLTC estava.
- 4.3 Nos ensaios em fábrica, da referida unidade autotransformadora, o OLTC estava entre as posições 10 e 17 antes de ser deslocado para a posição central 9B para a realização das medições. Com isso os resistores não lineares mantiveram polaridade negativa. Isso ficou comprovado com a análise comparativa que indicava a similaridade entre os traços do ensaio 2.4 (OLTC na posição 9B"-") da pesquisa de defeito e o seu respectivo realizado em fábrica. Por sua vez no primeiro ensaio em campo (comissionamento)da referida unidade, os resistores lineares estavam com a polaridade positiva (OLTC na posição 9b"+"), o que aconteceu em todos as outras medições. Isso ficou comprovado na análise comparativa demonstrada na Figura 7.
- 4.4 A influência da polaridade dos resistores não lineares que compõem a chave comutadora aconteceu em função do sentido do fluxo eletromagnético determinado por essa polaridade. A interação desse fluxo com o fluxo do enrolamento secundário, que por se tratar de um autotransformador tem uma conexão com o enrolamento primário, altera o circuito R-L-C equivalente, modificando a assinatura (traço) obtida a partir da função de transferência. Isso explica porque as maiores discrepância resultaram das medições do enrolamento secundário com o enrolamento comum (X1-HOXO) com os outros terminais flutuando.
- 4.5 A unidade autotransformadora monofásica 1ZBR61065 não possui nenhuma avaria interna, conforme demonstrado com as análises comparativas dos ensaios realizados em fábrica, campo e a repetição dos ensaios em campo (pesquisa de defeitos). A causa de todas as discrepâncias verificadas nas análises das assinaturas (traços) esta explicada nas conclusões acima.

#### 5. RECOMENDAÇÕES

Recomendamos que na realização de ensaios de Análise de Resposta em frequência em transformadores que possuam chave comutadora sob carga, as medições com seus respectivos arranjos sejam feitas pelo menos em três posições do OLTC diferentes, de preferência a posição central e as duas posições extremas; inicial e final. Diminuindo assim a chance de que influências como a descrita nesse artigo técnico possa ocasionar em diagnósticos imprecisos.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- (1) Aguiar, E. R. de, "Análise de Resposta em Frequência Aplicada a Transformadores de Potência", Dissertação de Mestrado – UFMG, BELO HORIZONTE-MG, 2007.
- (2) Costa, A. C. F. M., "Características Elétricas do Sistema Varistor ZnO", UFPB – CAMPINA GRANDE-PB, 1998.
- (3) Hey, H. L. "Análise do Método de Resposta em Frequência", UFSM – SÃO MARCOS – SP, 1997, Apostila de Sistema de Controle – Graduação Engenharia Elétrica.
- (4) Carrijo, D "Estudo de Metodologia e Técnicas para Execução de Ensaio de Resposta em Frequência em Transformadores de Potência" - UFMG, BELO HORIZONTE-MG, 2009.
- (5) Paulino, M. E. C., "Avaliação de Transformador Utilizando Análise de Resposta em Frequência", Apostila Treinamento FRAnalyzer, 2012.

## 7. DADOS BIÓGRAFICOS



Cleiner da Silva Assis graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Minas Gerais no ano de 2006. Possui experiência profissional na área de coordenação técnica de projeto e execução de obras em Eletrificação Rural e urbana, prestando serviço para COELBA (Cia Elétrica da Bahia) e Elektro (Cia Elétrica de São Paulo) no período de 2007 à 2008; Ministrou aulas no IFET-BA para curso técnico de Eletromecânica e Eletrônica de 2006 à 2009; Na ELETROBRAS ELETRONORTE atuou na área de planejamento elétrico da operação (Estudos Elétricos) da transmissão, na sede em Brasília, no período de 2008 à 2010 e atualmente é responsável técnico da operação e manutenção da Subestação de Jauru na regional de transmissão do Mato Grosso, onde coordena e executa ensaios e testes elétricos em comissionamentos e manutenções de equipamentos de alta tensão. Participou de alguns congressos, como autor e apresentador de informe técnico, entre eles; SBSE em 2010, em Belém-PA e o ERIAC em 2011, na Ciudad Del Este-PY.