

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

FABIO AUGUSTO REZENDE

**VERIFICAÇÃO DA INTEGRIDADE DE TRANSFORMADOR DE  
DISTRIBUIÇÃO IMERSO EM ÓLEO ISOLANTE APÓS O TRANSLADO  
FÁBRICA/CAMPO ATRAVÉS DE ANÁLISE DE RESPOSTA EM  
FREQUÊNCIA DE VARREDURA (SFRA)**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2017

FABIO AUGUSTO REZENDE

**VERIFICAÇÃO DA INTEGRIDADE DE TRANSFORMADOR DE  
DISTRIBUIÇÃO IMERSO EM ÓLEO ISOLANTE APÓS O TRANSLADO  
FÁBRICA/CAMPO ATRAVÉS DE ANÁLISE DE RESPOSTA EM  
FREQUÊNCIA DE VARREDURA (SFRA)**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação como requisito parcial para a conclusão do Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como obtenção do título de Tecnólogo.

Orientador: Prof. Esp. Carlos Alberto Paschoalino

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017

**FABIO AUGUSTO REZENDE**

**VERIFICAÇÃO DA INTEGRIDADE DE TRANSFORMADOR DE  
DISTRIBUIÇÃO IMERSO EM ÓLEO ISOLANTE APÓS O TRANSLADO  
FÁBRICA/CAMPO ATRAVÉS DE ANÁLISE DE RESPOSTA EM  
FREQUÊNCIA DE VARREDURA (SFRA)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 14h00min do dia 14 de dezembro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo em Automação Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Esp. Carlos Alberto Paschoalino  
Professor Orientador  
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

---

Prof. Me. Marco Antônio Ferreira Finocchio  
Professor Convidado  
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

---

Prof. Esp. Edmar Piacentini Júnior  
Professor Convidado  
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico este trabalho a minha esposa, pai e filha.

## **AGRADECIMENTOS**

Estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida, portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte de minha gratidão.

Primeiramente a Deus por me abençoar, por ter me dado forças, persistência e sabedoria para concluir o curso.

Ao meu orientador Professor Especialista Carlos Alberto Paschoalino por ter me orientado, sempre disposto a ajudar para que fosse possível a conclusão desse trabalho.

A banca composta pelos Professores, Me. Marco Antonio Ferreira Finocchio e Esp. Edmar Piacentini Junior por terem acreditado na elaboração desse trabalho e pelas valiosas dicas que agregaram conteúdo ao mesmo.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

REZENDE, Fabio Augusto. **Verificação da Integridade de Transformador de Distribuição Imeroso em Óleo Isolante Após o Translado Fábrica/Campo Através de Análise de Resposta em Frequência de Varredura (SFRA)**. 2017. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Tecnologia em Automação Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Quando um transformador de potência é submetido a esforços mecânicos, impactos durante movimentação ou transporte, podem provocar alterações geométricas nos enrolamentos, como deformações e deslocamentos. Essas deformações são prejudiciais, pois diminuem a capacidade do transformador de suportar curto-circuito e surtos de tensão, diminuem a sua vida útil e precipitam falhas que podem tirá-lo de operação.

Neste trabalho foi dado um enfoque na realização do ensaio de Análise de Resposta em Frequência de Varredura (SFRA) na verificação da integridade do transformador após o transporte da fábrica onde foram realizados todos os ensaios previsto em norma até o local de instalação do equipamento.

**Palavras-chave:** Verificação da Integridade, Análise de Resposta em Frequência, Análise de Resposta em Frequência de Varredura (SFRA), Análise de Resposta em Frequência de Impulso (IFRA).

## ABSTRACT

REZENDE, Fabio Augusto. **Verification of Distribution Transformer Integrity Immersed in Insulating Oil After Factory / Field Transfer Through Scan Frequency Response Analysis (SFRA)**. 2017. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Tecnologia em Automação Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

When a power transformer is subjected to mechanical stresses, impacts during movement or transport, can cause geometric changes in the windings, such as deformations and displacements. These deformations are detrimental as they reduce the transformer's ability to withstand short-circuits and voltage surges, shorten its life and precipitate faults that can take it out of operation.

In this work, a focus was given on conducting the Scan Frequency Response Analysis (SFRA) test to verify the integrity of the transformer after transportation from the factory where all the tests were carried out in standard to the place of installation of the equipment.

**Keywords:** Integrity Check, Frequency Response Analysis, Scan Frequency Response Analysis (SFRA), Impulse Frequency Response Analysis (IFRA).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transformador imerso em óleo isolante, com potência de 2,5MVA 6,6/0,38 kV .....	10
Figura 2 – (a) Arranjo para a medição no IRM (b) Princípio de cálculo da função de transferência.. .....	12
Figura 3 – Configuração esquemática da medição da impedância / admitância com a SFRA.. .....	14
Figura 4 – Deformação radial em um enrolamento do transformador.....	20
Figura 5 – Deformação axial em um enrolamento do transformador.. .....	21
Figura 6 – Deslocamento de um enrolamento do transformador. ....	22
Figura 7 – Relatório dos ensaios realizados .....	25
Figura 8 – Comparativo resultados SFRA fábrica/campo. ....	26
Fotografia 1 – Deslocamento de núcleo.....	23
Fotografia 2 – Analisador de Resposta em Frequência de Varredura (SFRA) marca DOUBLE, modelo M5400.....	27
Fotografia 3 – Resultado registrador de impacto .....	28



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis de Deformação do Enrolamento.....	29
---	----

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
1.1 Justificativa.....	10
1.2 Objetivo .....	10
<b>2 ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA</b> .....	<b>11</b>
2.1 Domínio do Tempo.....	11
2.1.1 Método de Resposta ao Impulso (IRM).....	11
2.2 Domínio da Frequência .....	13
2.3 Considerações Gerais Quanto a Análise de Resposta em Frequência .....	15
2.3.1 Indicadores Numéricos Estatísticos (Soma do Erro Quadrático - SEQ) .....	17
2.3.2 Indicadores Numéricos Estatísticos (Coeficiente de Correlação - CC).....	17
2.3.3 Indicadores Numéricos Estatísticos (Soma Absoluta do Erro Logarítmico - SAEL).....	18
<b>3 ESFORÇOS MECÂNICOS NO TRANSFORMADOR DURANTE TRANSPORTE</b> .....	<b>19</b>
3.1. Falhas por Esforços Mecânicos .....	19
3.2. Tipos de Falhas Mecânicas.....	20
3.2.1. Deformação Radial .....	20
3.2.2. Deformação Axial.....	21
3.2.3. Deslocamento dos Enrolamentos .....	22
3.2.4. Deslocamento do Núcleo .....	22
<b>4. ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>24</b>
4.1. Análise dos Dados .....	29
4.1.1. Análise da Deformação Radial e Axial.....	29
4.1.2. Análise de Deformação do Núcleo .....	29
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>30</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>32</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência são equipamentos de grande importância para o sistema elétrico. Possuem elevado custo e são fundamentais para confiabilidade do sistema, pois é por estes que passa toda a energia fornecida para os centros de carga. Muitas falhas que ocorrem em transformadores são devido a estresses causados durante o transporte do equipamento, levando-o a uma redução do seu tempo de vida ou ainda a falhas diretas, culminando muitas vezes com a falta de fornecimento de energia elétrica. Diante desse cenário, diversas técnicas de diagnóstico têm sido desenvolvidas ao longo das últimas décadas.

Dentre elas o ensaio de resposta em frequência, denominado pela sigla FRA, do inglês “Frequency Response Analysis”, que 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, é necessário excitar o objeto sob ensaio com várias frequências para descobrir como o objeto se comporta dentro de uma faixa de interesse.

O ensaio pode ser realizado de duas formas, onde uma é a aplicação de 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 a aplicação de uma onda de impulso, do tipo dupla exponencial. De acordo com a teoria de Fourier, a onda de impulso no domínio do tempo, corresponde no domínio da frequência, a 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”.

## 1.1 Justificativa

Quando um transformador é submetido a esforços mecânicos, impactos durante movimentação ou transporte, podem provocar alterações geométricas nos enrolamentos, como deformações e deslocamentos. Essas deformações são prejudiciais, pois diminuem a capacidade do transformador de suportar curto-circuito e surtos de tensão, diminuem a sua vida útil e precipitam falhas que podem impossibilitar sua operação.

## 1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é empregar a análise de resposta em frequência de varredura (SFRA) em um transformador imerso em óleo isolante, com potência de 2,5MVA 6,6/0,38 kV Figura 1 quando da sua entrega no local de instalação para verificar a integridade, se está conforme fabricado e inspecionado em fábrica.

As alterações mecânicas no interior do transformador resultam em uma mudança das indutâncias e capacitâncias internas. Utilizando frequências variadas para a excitação do transformador é possível acentuar os efeitos indutivos e capacitivos e desta forma melhorar a sensibilidade das medições. Os ensaios de Resposta em frequência medem as impedâncias terminais e as relações de transformação do transformador por meio de uma varredura numa faixa de frequências e obtém as funções de transferência do equipamento para o domínio da frequência que são assinaturas do equipamento.

**Figura 1 - Transformador imerso em óleo isolante, com potência de 2,5MVA 6,6/0,38 kV**



## **2 ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA**

As medições de resposta em frequência podem ser obtidas de diferentes formas, ou no domínio do tempo, ou no domínio da frequência. Cada uma das metodologias apresenta algumas vantagens e desvantagens em relação a procedimentos de medição, processamento de sinais, etc. Do ponto de vista matemático, e para sistemas lineares, as metodologias são equivalentes e uma pode ser obtida da outra através da Transformada de Fourier. Os dois métodos mais utilizados para realizar a FRA são, o Método da Resposta ao Impulso (IRM) no domínio do tempo, e o Método da Resposta de Varredura em Frequências (SFRA) no domínio da frequência.

A duas metodologias de ensaio acima citadas são consideradas ideais para detecção de falhas “ocultas”, diagnóstico precoce e prevenção de avarias mais dispendiosas. Estes ensaios são realizados sem a necessidade de o transformador de potência estar energizado, podendo ser realizado sem a necessidade de grandes estruturas.

### **2.1 Domínio do Tempo**

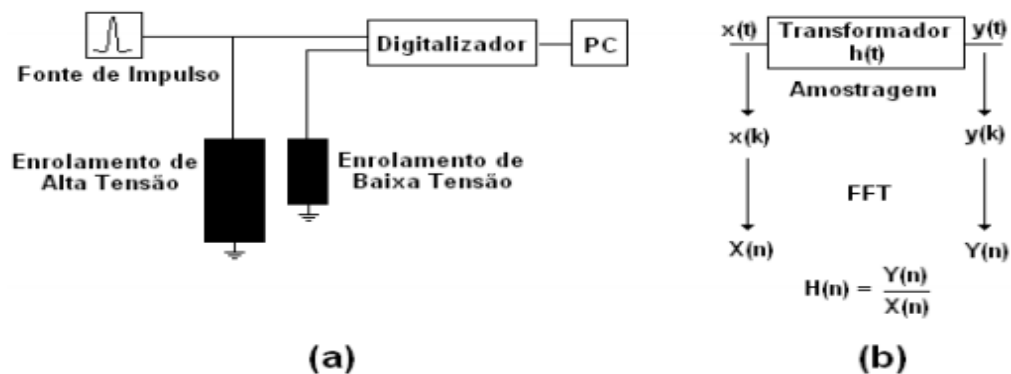
Em medições de resposta em frequência no domínio do tempo, os objetos em teste podem ser excitados por sinais de impulso de tensão de baixa ou alta amplitude. A função de transferência pode ser calculada através da Transformada de Fourier da resposta ao impulso. Como a função de transferência para sistemas lineares é independente do sinal de entrada aplicado, é possível aplicar sinais de impulso atmosféricos de onda completa ou cortada, obtendo-se funções de transferência idênticas para ambos casos.

#### **2.1.1 Método de Resposta ao Impulso (IRM)**

O Método da Resposta ao Impulso (IRM) consiste em injetar um impulso de baixa tensão, em um terminal do enrolamento do transformador a ser analisado. Este sinal de entrada e o sinal de saída são medidos, filtrados e amostrados no domínio do tempo. Posteriormente, os sinais são transformados

no domínio da frequência aplicando a transformada rápida de Fourier (FFT), e a função de transferência é calculada dividindo-se o sinal de saída pelo sinal de entrada. Dependendo do sinal de saída que é medido, a função de transferência calculada pode representar a relação de tensão entre enrolamentos ou a impedância/admitância de um enrolamento em função da frequência. A amplitude do sinal de impulso aplicado é tipicamente de 100 a 2000 Volts com um tempo de subida entre 100 e 500 ns e duração entre 40 e 200  $\mu$ s. A Figura 2(a) ilustra a topologia para a realização do IRM e a Figura 2(b) mostra o princípio do cálculo da função de transferência.

**Figura 2 – (a) Arranjo para a medição no IRM (b) Princípio de cálculo da função de transferência**



Segundo (TENBOHLEN, RYDER 2003), as principais vantagens e desvantagens do IRM são:

Vantagens:

- Várias funções de transferência podem ser obtidas simultaneamente.
- O tempo necessário para realizar uma medição é geralmente inferior a um minuto.
- Menor influência da impedância de medição na função de transferência medida e conseqüentemente uma faixa maior de frequências pode ser analisada.
- Pouco interferência dos cabos de medição nos resultados.

Desvantagens:

- A resolução da frequência é fixa, e em baixas frequências é pobre, dificultando a detecção de danos elétricos.
- Maior sensibilidade a sinais de ruído.
- A energia total injetada no transformador sob teste é diferente em diferentes frequências. Isto leva a diferenças na precisão na faixa de frequências obtida.
- Vários equipamentos são requeridos para as medições (gerador do sinal, digitalizadores, multímetros, computador, etc.)

## 2.2 Domínio da Frequência

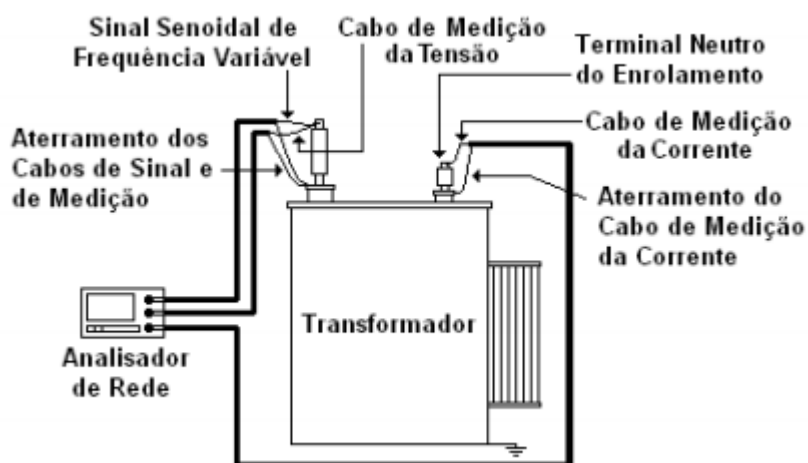
A técnica de medição no domínio da frequência é denominada SFRA - Método da Resposta de Varredura em Frequências (Swept Frequency Response Analysis) e foi desenvolvida por DICK e ERVIN entre 1977 e 1978 como ferramenta de diagnóstico de transformadores de potência. Esta técnica consiste em aplicar e medir um sinal de excitação senoidal com frequência variável, de baixa tensão, e com amplitude constante no enrolamento do transformador em estudo, também medindo o sinal de saída do enrolamento para assim calcular a função de transferência. A SFRA fornece informações na forma de uma função de transferência que modela o transformador de potência. O circuito RLC associado a este modelo é função da geometria interna e outros aspectos construtivos do transformador. Desta forma, mudanças na configuração geométrica do transformador alteram o circuito RLC do mesmo, e conseqüentemente, alteram a função de transferência associada.

As medições na SFRA geralmente são realizadas utilizando um analisador de rede que aplica uma tensão senoidal de baixa amplitude (normalmente 10 Volts) ao objeto em teste. Em baixas frequências (entre dezenas de Hz e poucos kHz), o instrumento tende a prover energia insuficiente para excitar um transformador de grande porte, devido à forte característica indutiva do núcleo. Nas altas frequências (entre 2 e 5 MHz), a energia provida também pode não ser suficiente, devido à característica altamente capacitiva consequência do alto valor de capacitância do sistema de isolamento do transformador. Por estes motivos, é recomendado analisar

diagramas de respostas de SFRA apenas na faixa de alguns Hz até 2 MHz, quando analisadores de redes são utilizados. A Figura 3 ilustra o diagrama esquemático para a medição da impedância/admitância de um enrolamento com a SFRA com um analisador de rede (BRITTON, 2006), esta metodologia, do ponto de vista intuitivo, é a forma mais direta de medir uma função de transferência, que pode ser considerado como benefício desta técnica.

A Análise da Resposta em Frequência de Varredura é uma técnica que fornece informação sem ser necessário ter acesso ao interior do transformador, sobre se houve movimento no núcleo, nos enrolamentos, nos componentes de ligação ou outra alteração que afete a integridade mecânica do transformador.

**Figura 3 – Configuração esquemática da medição da impedância/admitância com a SFRA**



Segundo (TENBOHLEN, RYDER, 2003; WENZEL, BORSI, GOCKENBACH, 1998; BRITTON, 2006), as principais vantagens e desvantagens do SFRA são:

Vantagens:

- Alta imunidade a ruídos em medições em laboratório.
- Uma ampla faixa de frequências pode ser varrida.



- É possível utilizar uma resolução mais precisa em baixas frequências. Como alternativa, a resolução da frequência pode ser adaptada à faixa de frequência a ser medida.
- Quando se utilizam analisadores de redes, somente um equipamento é necessário para realizar as medições.

Desvantagens:

- Somente uma medição pode ser realizada por vez, portanto, é possível determinar somente uma função de transferência por vez.
- O tempo demandado para realizar cada medição é geralmente de vários minutos.
- Em medições realizadas no lugar de operação do transformador a distorção dos sinais por ruídos no ambiente pode ser considerável.
- Influência significativa dos cabos de medição e da impedância de medição nos resultados em altas frequências.

### **2.3 Considerações Gerais Quanto a Análise de Resposta em Frequência**

A análise de resposta em frequência não é um método de diagnóstico absoluto, mas sim, um método de comparação, ou seja, os resultados de medições realizadas com a análise de resposta em frequência são comparados com medições denominadas “Impressões Digitais”, que são medições realizadas quando o transformador se encontrava em perfeito estado de funcionamento. Se não são encontradas diferenças significativas entre as medições comparadas, provavelmente não houve mudanças no interior do transformador, caracterizando ausência de danos no mesmo. Infelizmente, impressões digitais nem sempre estão disponíveis para comparação, por este motivo outras alternativas devem ser consideradas para a comparação entre as medições de resposta em frequência. Neste contexto, funções de transferência de transformadores de mesmas características construtivas (transformadores “irmãos”) podem ser utilizadas como referências para a comparação entre medições. As propriedades simétricas dos enrolamentos e do núcleo também

podem ser utilizadas para a comparação de medições de RF (resposta em frequência), ou seja, em transformadores trifásicos, pode-se realizar medições individuais de cada enrolamento para a comparação, mas isto somente quando danos afetam somente uma das três fases do transformador em estudo. Uma análise separada das três fases detectará as diferenças da fase danificada em relação às outras.

Na análise de resposta em frequência convencional é realizada uma comparação visual dos diagramas obtidos com o ensaio de resposta em frequência para o diagnóstico do estado do transformador em estudo, o que requer especialistas treinados e experientes para a correta interpretação dos resultados.

Na comparação de medições de resposta em frequência, os aspectos que devem ser observados como indicadores chave de danos no transformador são:

- Mudanças na forma global do gráfico,
- Criação de novas frequências de ressonância ou a eliminação de frequências de ressonância existentes,
- Mudanças significativas em frequências de ressonância existentes.

Considerando que as formas de onda dos diagramas de resposta em frequência de transformadores de potência contêm vários pontos de ressonâncias, principalmente nas frequências superiores, e que um pequeno deslocamento de um pico pode afetar drasticamente o desvio entre dois diagramas, um indicador apropriado deve ser implementado como ferramenta para avaliar diferenças entre medições de ensaios de resposta em frequência.

Desta forma, existem três indicadores numéricos estatísticos implementados como ferramentas de auxílio ao diagnóstico de danos em enrolamentos de transformadores de potência com a análise de resposta em frequência.

### 2.3.1 Indicadores Numéricos Estatísticos (Soma do Erro Quadrático - SEQ)

O desvio padrão e a raiz média quadrática podem ser classificados como uma SEQ, descrito pela equação:

$$\delta_{SEQ}(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N}$$

Onde  $x_i$  e  $y_i$  são os  $i$ -ésimos elementos da resposta em frequência a serem comparados, e  $N$  é o número de amostras.

Quando as magnitudes de  $x_i$  e  $y_i$  são da mesma ordem para todos os  $i$ , a SEQ é um bom indicador de diferenças entre as amostras, contribuindo para o diagnóstico do problema. Entretanto, se as ordens de  $x_i$  e  $y_i$  diferem em algumas regiões, o que frequentemente ocorre em picos ou vales de diagramas de resposta em frequência de transformadores de potência, este indicador não quantifica corretamente diferenças entre as amostras devido a que ele é afetado de forma dominante por um pequeno número de picos ou vales de magnitude relativamente alta.

### 2.3.2 Indicadores Numéricos Estatísticos (Coeficiente de Correlação - CC)

Indica a correlação entre dois valores ou curvas, se aproximando de 0 se os valores de amostras não se correlacionam, e se aproximando de 1 se os valores são similares. O coeficiente de correlação é descrito pela equação:

$$\delta_{CC}(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{i=1}^N y_i^2}}$$

A equação é normalizada pelo termo denominador, ao contrário da SEQ. Sob uma condição particular de  $y_i = cx_i$  na região  $i_l \leq i \leq i_h$  onde  $c$  é uma constante,  $\delta_{CC}$  é igual a 1 como mostrado a seguir:

$$\delta_{CC}(x,y) = \frac{\sum_{i=i_l}^{i_h} y_i x_i}{\sqrt{\sum_{i=i_l}^{i_h} x_i^2 \sum_{i=i_l}^{i_h} y_i^2}} = \frac{\sum_{i=i_l}^{i_h} cx_i^2}{\sqrt{\sum_{i=i_l}^{i_h} x_i^2 \sum_{i=i_l}^{i_h} c^2 x_i^2}} = \frac{\sum_{i=i_l}^{i_h} cx_i^2}{\sqrt{(\sum_{i=i_l}^{i_h} cx_i^2)^2}} = 1, \quad i_l < i < i_h.$$

Esta propriedade deste indicador numérico pode levar a tomar decisões equivocadas. Por exemplo, assumindo que  $c = 1000$ , ou seja, ( $y_i = 1000x_i$ ) para todo  $i$  em certa região, apesar de uma grande discrepância entre  $x_i$  e  $y_i$ , a correlação fornecida por CC entre  $x_i$  e  $y_i$  é igual a 1, falhando na detecção da anormalidade. Portanto, CC é um indicador numérico considerado inadequado para a comparação da resposta em frequência que possam incluir medições com padrões similares em forma de onda, mas diferentes em magnitude.

### 2.3.3 Indicadores Numéricos Estatísticos (Soma Absoluta do Erro Logarítmico - SAEL)

O indicador numérico descrito pela equação:

$$\delta_{SAEL}(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^N |20\log_{10} y_i - 20\log_{10} x_i|}{N}$$

Foi proposto (KIM, J. W. et al., 2005) como ferramenta para indicar relação entre medições de RF, o autor afirma que entre todos os critérios de comparação examinados por ele para comparação de medições de RF, a SAEL é o mais indicado. O motivo é que geralmente as medições de RF são apresentadas em escala logarítmica para a comparação visual dos resultados, portanto, o que é visto no gráfico em escala logarítmica é calculada pela SAEL.

### **3 ESFORÇOS MECÂNICOS NO TRANSFORMADOR DURANTE TRANSPORTE**

A questão logística de um transformador de potência é muito complexa, pois o mesmo não pode ser submetido a uma determinada aceleração (geralmente acima de três vezes a gravidade) pois corre o risco de sofrer alguma movimentação de seus enrolamentos. Por isso há uma grande preocupação quanto a impactos durante o transporte, que podem ocorrer com uma certa facilidade, tendo em vista as várias dificuldades encontradas no percurso da fábrica até o local de instalação do equipamento.

#### **3.1. Falhas por Esforços Mecânicos**

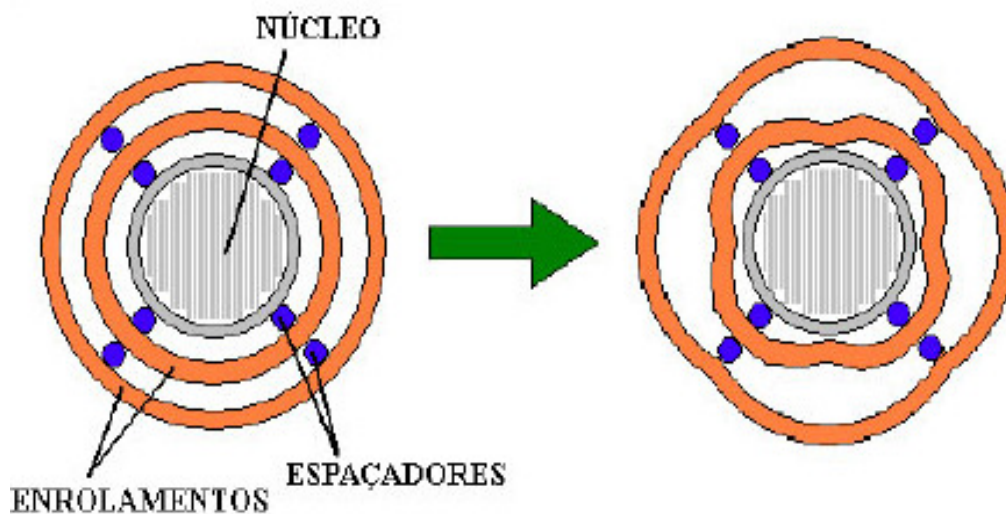
A falha por esforços mecânicos ocorre na parte ativa do equipamento, e constituem-se da deformação e/ou o deslocamento dos enrolamentos. Essas falhas são provocadas por esforços mecânicos internos (interação dos campos magnéticos) ou externos ao equipamento. A ocorrência desse tipo de defeito muitas vezes não é imediatamente perceptível, por isso geralmente estas falhas não impossibilitam a operação do transformador, entretanto, o transformador com alterações mecânicas em seus enrolamentos tem menor robustez, o que pode diminuir a capacidade do transformador de suportar curto-circuito e surtos de tensão e diminuir sua vida útil.

## 3.2. Tipos de Falhas Mecânicas

### 3.2.1. Deformação Radial

Abaixo a representação da deformação radial Figura 4 dos enrolamentos antes e depois da ocorrência.

Figura 4 – Deformação radial em um enrolamento do transformador.



As consequências desse tipo de deformação são:

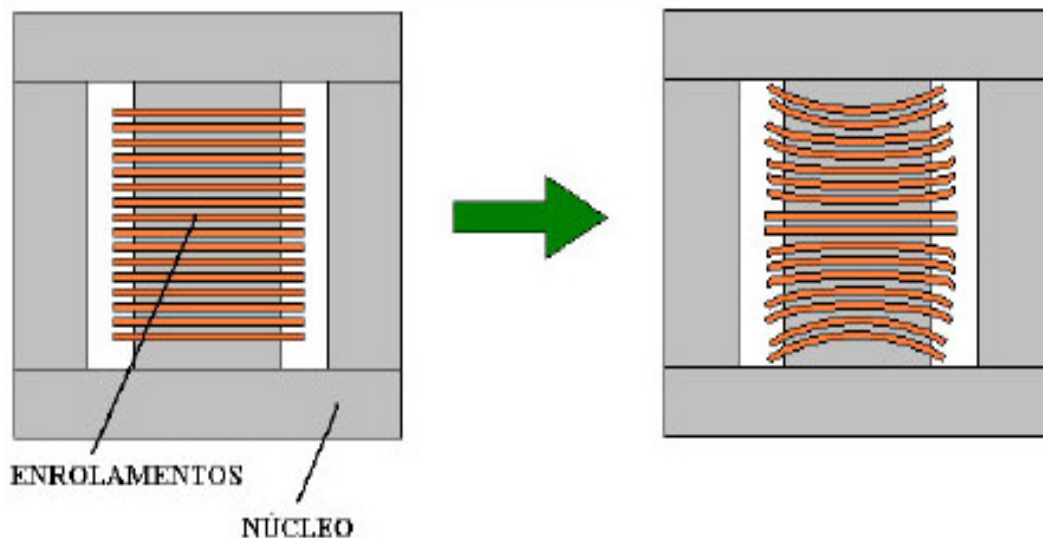
- Estiramento do isolante que reveste os condutores dos enrolamentos. Isto é altamente prejudicial, pois degrada significativamente o material isolante, reduzindo a vida útil do transformador.
- Diminuição das distâncias de isolamento entre o enrolamento interno e o núcleo. Com isso há uma redução da capacidade do transformador de suportar surtos de tensão. Além disso modifica a distribuição do campo elétrico ao longo do enrolamento, podendo submeter partes do material isolante a maiores estresses elétricos.
- Diminuição das distâncias de isolamento do enrolamento externo ao tanque ou a outro enrolamento do equipamento, no caso de transformadores trifásicos. Provoca os mesmos efeitos do anterior.

- Afrouxamento das amarrações dos enrolamentos. Isto permite uma certa mobilidade dos condutores, o que provoca vibrações e, a longo prazo, a fadiga do material isolante e das conexões. Além disso, reduz a robustez do transformador frente a correntes de curto-circuito

### 3.2.2. Deformação Axial

Abaixo a representação da deformação axial Figura 5 frente dos enrolamentos de um transformador antes e depois da ocorrência.

**Figura 5 – Deformação axial em um enrolamento do transformador.**



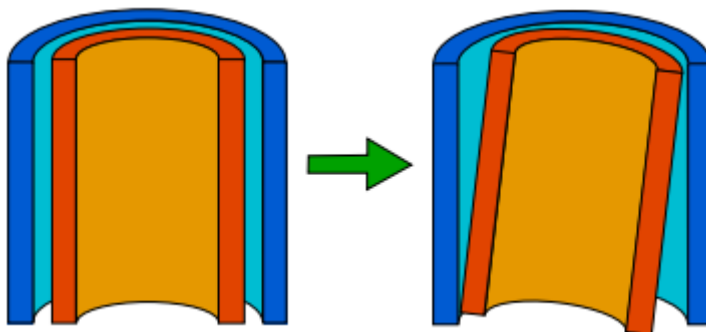
As consequências desse tipo de deformação são:

- Torção dos condutores dos enrolamentos. Isto faz com que haja estiramento e/ou esmagamento do material isolante que reveste os condutores, reduzindo a vida útil do transformador.
- Diminuição da rigidez mecânica do disco de compressão ou quebra do mesmo. Permite o deslocamento do enrolamento, provoca vibrações e também reduz a capacidade do equipamento em suportar correntes de curto-circuito.
- Afrouxamento das amarrações dos enrolamentos. Reduz a robustez do transformador frente a correntes de curto-circuito, provoca vibrações e fadiga do material isolante e das conexões.

### 3.2.3. Deslocamento dos Enrolamentos

Abaixo a representação do deslocamento dos enrolamentos Figura 6 onde é mostrado o enrolamento interno fora de seu eixo.

Figura 6 – Deslocamento de um enrolamento do transformador.



As principais consequências desse tipo de falta são:

- Diminuição das distâncias de isolamento entre os enrolamentos. Modifica a distribuição do campo elétrico ao longo dos enrolamentos e reduz a capacidade do transformador de suportar surtos de tensão.
- Diminuição da rigidez mecânica do conjunto do enrolamento. Um deslocamento do enrolamento indica que há mobilidade do enrolamento, o que provoca vibrações e também reduz a capacidade do equipamento em suportar correntes de curto-circuito.

### 3.2.4. Deslocamento do Núcleo

Abaixo a representação do deslocamento do núcleo Fotografia 1, que é o impacto causado pela variação da geometria do núcleo do transformador.

As principais consequências desse tipo de falta são:

- As alterações na disposição dos enrolamentos (eventualmente oriundas de solicitações mecânicas extremas em condições de curto) ou do núcleo (pancadas em decorrência do transporte, por exemplo) podem iniciar



processos de falha. Ao mesmo tempo, tais alterações modificam também a distribuição de capacitâncias parasitas no transformador.

**Fotografia 1 – Deslocamento de núcleo**



#### 4. ESTUDO DE CASO

O objetivo desse estudo do ponto de vista de suas características elétricas e operacionais é apresentar por meio da análise de resposta de frequência de varredura (SFRA) uma situação verificada pela equipe técnica do fabricante do transformador. Equipe esta responsável pelo comissionamento e start-up do equipamento em campo.

Em fábrica foram realizados os ensaios previstos em norma, ABNT NBR 5356 – Transformadores de Potência, onde os resultados foram satisfatórios Figura 7:

- Resistência dos enrolamentos;
- Resistência do isolamento;
- Relação de tensões, deslocamento angular e sequência de fases;
- Fator de potência do isolamento e capacitância do transformador e tap capacitivo;
- Tensão suportável nominal à frequência industrial;
- Tensão induzida;
- Perdas em vazio;
- Perdas em carga;
- Nível de ruído;
- Elevação de temperatura;
- Tensão suportável nominal de impulso atmosférico;
- Pintura;
- Ensaio de SFRA – Medição de Resposta a Frequência;
- Levantamento da Curva de Saturação;
- Harmônicos da Corrente de Excitação;
- Impedância de Sequência Zero;

**Figura 7 – Relatório dos ensaios realizados**

**PROTOCOLO DE ENSAYOS DE TRANSFORMADOR** R.Q.: AS-82401.02 Rev.08

*Ensayo de Rutina del Transformador con las características abajo:*

<b>CLIENTE : SUR ENERGY</b>		<b>ALTIMUD [msnm]:</b>		<b>BIL Int/Ext [KV]:</b>	
<b>NÚMERO :</b> 223740101	<b>FRECUENCIA [Hz]:</b> 50			<b>CORRIENTE A.T. [A]:</b> 218,69	
<b>POTENCIA [kVA]:</b> 2500,0	<b>TENSIONES A.T. [kV]:</b> 6,93 a 6,27			<b>CORRIENTE B.T. [A]:</b> 3798,36	
<b>FASES :</b> 3	<b>TENSIONES B.T. [V]:</b> 380			<b>Fecha de fabricación:</b> 30/09/2016	
<b>CONEXIÓN:</b> Estrella/Triángulo	<b>DERIVACIONES :</b> 5			<b>ESTADO :</b> NUEVO	
<b>TIPO :</b> SUBESTACIÓN C/CONSERV.	<b>A.T. activado en [kV]:</b> 6,60			<b>MASA [Kg]:</b> 5700	
<b>MODELO :</b> OLEO	<b>B.T. activado en [V]:</b> 380			<b>FABRICANTE :</b> COMTRAFO	

<p style="text-align: center;"><b>RESISTENCIA ELÉCTRICA DE LOS ARROLLAMIENTOS</b></p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td><b>HIH2:</b> 0,14 [OHMS]</td> <td><b>X1X2:</b> 0,39 [mOHMS]</td> </tr> <tr> <td><b>HIH3:</b> 0,14 [OHMS]</td> <td><b>X1X3:</b> 0,41 [mOHMS]</td> </tr> <tr> <td><b>H2H3:</b> 0,14 [OHMS]</td> <td><b>X2X3:</b> 0,39 [mOHMS]</td> </tr> <tr> <td><b>Arrollam. AT:</b> Cobre</td> <td><b>Arrollam. BT:</b> Cobre</td> </tr> <tr> <td><b>TEMPERATURA AMBIENTAL [°C]:</b> 24,5</td> <td></td> </tr> </table>	<b>HIH2:</b> 0,14 [OHMS]	<b>X1X2:</b> 0,39 [mOHMS]	<b>HIH3:</b> 0,14 [OHMS]	<b>X1X3:</b> 0,41 [mOHMS]	<b>H2H3:</b> 0,14 [OHMS]	<b>X2X3:</b> 0,39 [mOHMS]	<b>Arrollam. AT:</b> Cobre	<b>Arrollam. BT:</b> Cobre	<b>TEMPERATURA AMBIENTAL [°C]:</b> 24,5		<p style="text-align: center;"><b>DISLOCACION ANGULAR</b></p> <p style="text-align: center;">30 Graus</p>
<b>HIH2:</b> 0,14 [OHMS]	<b>X1X2:</b> 0,39 [mOHMS]										
<b>HIH3:</b> 0,14 [OHMS]	<b>X1X3:</b> 0,41 [mOHMS]										
<b>H2H3:</b> 0,14 [OHMS]	<b>X2X3:</b> 0,39 [mOHMS]										
<b>Arrollam. AT:</b> Cobre	<b>Arrollam. BT:</b> Cobre										
<b>TEMPERATURA AMBIENTAL [°C]:</b> 24,5											

<p style="text-align: center;"><b>RESISTENCIA DE AISLAMIENTO</b></p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td><b>LECTURA AT/BT [MOHMS]:</b> 7000</td> </tr> <tr> <td><b>LECTURA AT/MASA [MOHMS]:</b> 10000</td> </tr> <tr> <td><b>LECTURA BT/MASA [MOHMS]:</b> 4000</td> </tr> <tr> <td><b>TENSIÓN del MEGOHMETER [V]:</b> 5000</td> </tr> </table>	<b>LECTURA AT/BT [MOHMS]:</b> 7000	<b>LECTURA AT/MASA [MOHMS]:</b> 10000	<b>LECTURA BT/MASA [MOHMS]:</b> 4000	<b>TENSIÓN del MEGOHMETER [V]:</b> 5000	<p style="text-align: center;"><b>TENSIÓN APLICADA</b></p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td><b>AT/BT A MASA [kV]:</b> 20,00</td> </tr> <tr> <td><b>BT/AT A MASA [kV]:</b> 10,00</td> </tr> <tr> <td><b>FRECUENCIA [Hz]:</b> 50</td> </tr> <tr> <td><b>TIEMPO DE PRUEBA [S]:</b> 60</td> </tr> </table>	<b>AT/BT A MASA [kV]:</b> 20,00	<b>BT/AT A MASA [kV]:</b> 10,00	<b>FRECUENCIA [Hz]:</b> 50	<b>TIEMPO DE PRUEBA [S]:</b> 60	<p style="text-align: center;"><b>TENSIÓN INDUCIDA</b></p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td><b>TENSIÓN INDUCIDA [V]:</b> 760</td> </tr> <tr> <td><b>FRECUENCIA [Hz]:</b> 120</td> </tr> <tr> <td><b>TIEMPO DE PRUEBA [S]:</b> 60</td> </tr> <tr> <td><b>MÉTODO DE PRUEBA :</b> NORMAL</td> </tr> </table>	<b>TENSIÓN INDUCIDA [V]:</b> 760	<b>FRECUENCIA [Hz]:</b> 120	<b>TIEMPO DE PRUEBA [S]:</b> 60	<b>MÉTODO DE PRUEBA :</b> NORMAL
<b>LECTURA AT/BT [MOHMS]:</b> 7000														
<b>LECTURA AT/MASA [MOHMS]:</b> 10000														
<b>LECTURA BT/MASA [MOHMS]:</b> 4000														
<b>TENSIÓN del MEGOHMETER [V]:</b> 5000														
<b>AT/BT A MASA [kV]:</b> 20,00														
<b>BT/AT A MASA [kV]:</b> 10,00														
<b>FRECUENCIA [Hz]:</b> 50														
<b>TIEMPO DE PRUEBA [S]:</b> 60														
<b>TENSIÓN INDUCIDA [V]:</b> 760														
<b>FRECUENCIA [Hz]:</b> 120														
<b>TIEMPO DE PRUEBA [S]:</b> 60														
<b>MÉTODO DE PRUEBA :</b> NORMAL														

<b>ENSAYO DE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN</b>					
<b>TAP [V]:</b> 6930	6765	6600	6435	6270	
<b>FASE 1 :</b> 10,51	10,26	10,02	9,764	9,515	
<b>FASE 2 :</b> 10,51	10,27	10,02	9,770	9,517	
<b>FASE 3 :</b> 10,51	10,26	10,01	9,762	9,514	
<b>ERROR[%]:</b> -0,19	-0,17	-0,19	-0,15	-0,13	

<p style="text-align: center;"><b>ENSAYO EN VACIO</b></p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td><b>TENSIÓN DE PRUEBA [V]:</b> 380</td> </tr> <tr> <td><b>EXITACIÓN DE CORRIENTE [A]:</b> 13,17</td> </tr> <tr> <td><b>EXITACIÓN CORRIENTE [%]:</b> 0,35</td> </tr> <tr> <td><b>PÉRDIDAS EN VACIO [W]:</b> 3058</td> </tr> </table>	<b>TENSIÓN DE PRUEBA [V]:</b> 380	<b>EXITACIÓN DE CORRIENTE [A]:</b> 13,17	<b>EXITACIÓN CORRIENTE [%]:</b> 0,35	<b>PÉRDIDAS EN VACIO [W]:</b> 3058	<p style="text-align: center;"><b>ENSAYO EN CORTO CIRCUITO</b></p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td><b>CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO [A]:</b> 218,69</td> </tr> <tr> <td><b>CORTO CIRCUITO TENSIÓN [V]:</b> 386,66</td> </tr> <tr> <td><b>PÉRDIDAS CORTO CIRCUITO [W]:</b> 23391</td> </tr> <tr> <td><b>MEDIO AMBIENTE [°C]:</b> 25,0</td> </tr> </table>	<b>CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO [A]:</b> 218,69	<b>CORTO CIRCUITO TENSIÓN [V]:</b> 386,66	<b>PÉRDIDAS CORTO CIRCUITO [W]:</b> 23391	<b>MEDIO AMBIENTE [°C]:</b> 25,0
<b>TENSIÓN DE PRUEBA [V]:</b> 380									
<b>EXITACIÓN DE CORRIENTE [A]:</b> 13,17									
<b>EXITACIÓN CORRIENTE [%]:</b> 0,35									
<b>PÉRDIDAS EN VACIO [W]:</b> 3058									
<b>CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO [A]:</b> 218,69									
<b>CORTO CIRCUITO TENSIÓN [V]:</b> 386,66									
<b>PÉRDIDAS CORTO CIRCUITO [W]:</b> 23391									
<b>MEDIO AMBIENTE [°C]:</b> 25,0									

<p style="text-align: center;"><b>VALORES CORREGIDOS A 75 [°C]</b></p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td><b>PÉRDIDA EN LOS ARROLLAMIENTOS [W]:</b> 26090</td> </tr> <tr> <td><b>PÉRDIDAS TOTAL [W]:</b> 29148</td> </tr> <tr> <td><b>EFICIENCIA EN LA CARGA [%]:</b> 98,8</td> </tr> <tr> <td><b>IMPEDANCIA DE CORTO CIRCUITO [%]:</b> 5,88</td> </tr> </table>	<b>PÉRDIDA EN LOS ARROLLAMIENTOS [W]:</b> 26090	<b>PÉRDIDAS TOTAL [W]:</b> 29148	<b>EFICIENCIA EN LA CARGA [%]:</b> 98,8	<b>IMPEDANCIA DE CORTO CIRCUITO [%]:</b> 5,88	<p style="text-align: center;"><b>ENSAYO DE PINTURA</b></p> <p><b>Espesor de la Capa:</b> (NBR 10443)</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td><b>ESPECIFICACIONES:</b> 140</td> <td><b>PINTURA del Fondo:</b> 80</td> </tr> <tr> <td><b>MÍNIMO :</b> 140</td> <td><b>PINTURA FINAL :</b> 140</td> </tr> <tr> <td><b>MEDIO :</b> 160</td> <td></td> </tr> <tr> <td><b>MÁXIMO :</b> 180</td> <td><b>Unidad:</b> microns</td> </tr> </table> <p><b>Adherencia</b> (NBR 11003)</p> <p><b>GRADO:</b> X0Y0 <b>RESULTADO:</b> SATISFACTORIO</p>	<b>ESPECIFICACIONES:</b> 140	<b>PINTURA del Fondo:</b> 80	<b>MÍNIMO :</b> 140	<b>PINTURA FINAL :</b> 140	<b>MEDIO :</b> 160		<b>MÁXIMO :</b> 180	<b>Unidad:</b> microns
<b>PÉRDIDA EN LOS ARROLLAMIENTOS [W]:</b> 26090													
<b>PÉRDIDAS TOTAL [W]:</b> 29148													
<b>EFICIENCIA EN LA CARGA [%]:</b> 98,8													
<b>IMPEDANCIA DE CORTO CIRCUITO [%]:</b> 5,88													
<b>ESPECIFICACIONES:</b> 140	<b>PINTURA del Fondo:</b> 80												
<b>MÍNIMO :</b> 140	<b>PINTURA FINAL :</b> 140												
<b>MEDIO :</b> 160													
<b>MÁXIMO :</b> 180	<b>Unidad:</b> microns												

<p style="text-align: center;"><b>ENSAYO DEL ACEITE AISLANTE</b></p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td><b>TIPO DE ACEITE :</b> TIPO A</td> <td><b>Vol.:</b> 1740 [Litros]</td> </tr> <tr> <td><b>RIGIDEZ DIELECTRICA:</b> 80,00 [kV]</td> <td>(IEC 60156)</td> </tr> <tr> <td><b>TENSIÓN INTERFACIAL:</b> 46,00 [mN/m]</td> <td>(NBR 6234)</td> </tr> <tr> <td><b>TENOR DE AGUA :</b> 7,00 [ppm]</td> <td>(NBR 10710)</td> </tr> <tr> <td><b>DENSIDAD :</b> 0,878</td> <td>(NBR 7148)</td> </tr> <tr> <td><b>NEUTRALIZACIÓN IND.:</b> &lt;0,01 [mgKOH/g]</td> <td>(NBR 14248)</td> </tr> <tr> <td><b>F.P. EN 100 [°C]:</b> 0,20 [%]</td> <td>(NBR 12133)</td> </tr> <tr> <td><b>COLOR :</b></td> <td><b>Fracción de PCB:</b> no Detectable</td> </tr> </table>	<b>TIPO DE ACEITE :</b> TIPO A	<b>Vol.:</b> 1740 [Litros]	<b>RIGIDEZ DIELECTRICA:</b> 80,00 [kV]	(IEC 60156)	<b>TENSIÓN INTERFACIAL:</b> 46,00 [mN/m]	(NBR 6234)	<b>TENOR DE AGUA :</b> 7,00 [ppm]	(NBR 10710)	<b>DENSIDAD :</b> 0,878	(NBR 7148)	<b>NEUTRALIZACIÓN IND.:</b> <0,01 [mgKOH/g]	(NBR 14248)	<b>F.P. EN 100 [°C]:</b> 0,20 [%]	(NBR 12133)	<b>COLOR :</b>	<b>Fracción de PCB:</b> no Detectable	<p style="text-align: center;"><b>ESTANQUEIDAD Y RESISTENCIA A PRESIÓN</b></p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td><b>PRESIÓN [Kgf/cm2]:</b> 0,3</td> <td><b>TIEMPO [Hora]:</b> 24</td> </tr> </table>	<b>PRESIÓN [Kgf/cm2]:</b> 0,3	<b>TIEMPO [Hora]:</b> 24
<b>TIPO DE ACEITE :</b> TIPO A	<b>Vol.:</b> 1740 [Litros]																		
<b>RIGIDEZ DIELECTRICA:</b> 80,00 [kV]	(IEC 60156)																		
<b>TENSIÓN INTERFACIAL:</b> 46,00 [mN/m]	(NBR 6234)																		
<b>TENOR DE AGUA :</b> 7,00 [ppm]	(NBR 10710)																		
<b>DENSIDAD :</b> 0,878	(NBR 7148)																		
<b>NEUTRALIZACIÓN IND.:</b> <0,01 [mgKOH/g]	(NBR 14248)																		
<b>F.P. EN 100 [°C]:</b> 0,20 [%]	(NBR 12133)																		
<b>COLOR :</b>	<b>Fracción de PCB:</b> no Detectable																		
<b>PRESIÓN [Kgf/cm2]:</b> 0,3	<b>TIEMPO [Hora]:</b> 24																		

<b>OBSERVACION</b>	
PED 022374/01 NBI 60/20 kV.	
Número Cia: IM-0-2416/00	
El transformador arriba referido está "APROBADO" POR LA GARANTIA DE LA CALIDAD NBR-5356	

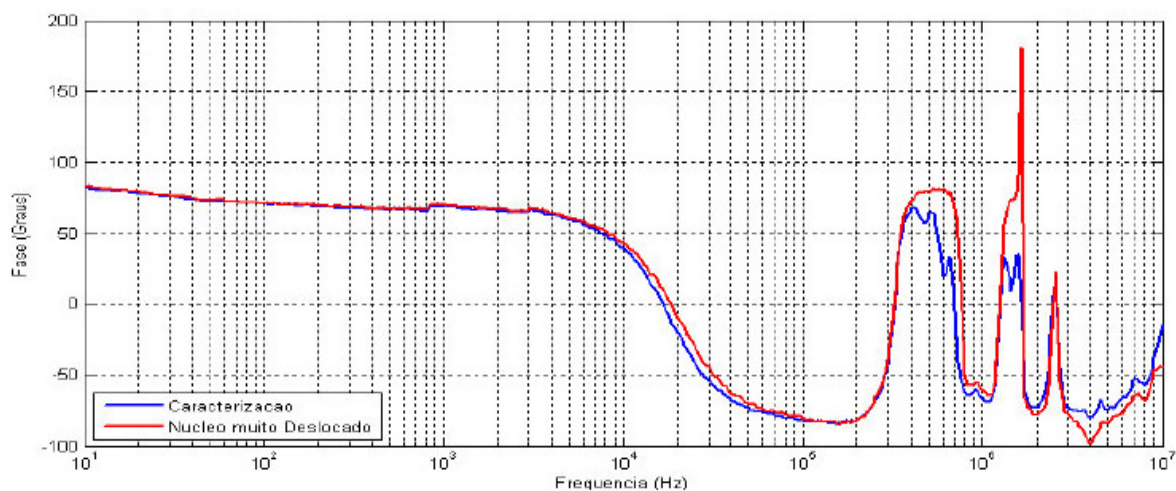
O equipamento foi despachado da fábrica, que está situada no norte do Paraná, até o local de instalação, Cobija - Bolívia.

De posse destas informações, foram realizados em campo a reaplicação dos ensaios:

- Resistência dos enrolamentos;
- Resistência do isolamento;
- Relação de tensões, deslocamento angular e sequência de fases;
- Fator de potência do isolamento e capacitância do transformador e tap capacitivo;
- Tensão suportável nominal à frequência industrial;
- Tensão induzida;
- Perdas em vazio;
- Perdas em carga;
- Nível de ruído;
- Ensaio de SFRA – Medição de Resposta a Frequência;
- Impedância de Sequência Zero;

Onde foi verificada divergência quando a aplicação da análise de resposta em frequência de varredura Figura 8, no qual somente pode ser levado em consideração se realizado em fábrica, tendo assim valores para comparação em campo, ou seja, deve ser realizado antes da movimentação/transporte e após o recebimento em campo.

**Figura 8 – Comparativo resultados SFRA fábrica/campo**



Para a aplicação deste ensaio foi utilizado analisador de resposta em frequência de varredura (SFRA), marca Double, modelo M5400 Fotografia 2.

**Fotografia 2 – Analisador de Resposta em Frequência de Varredura (SFRA) marca DOUBLE, modelo M5400**



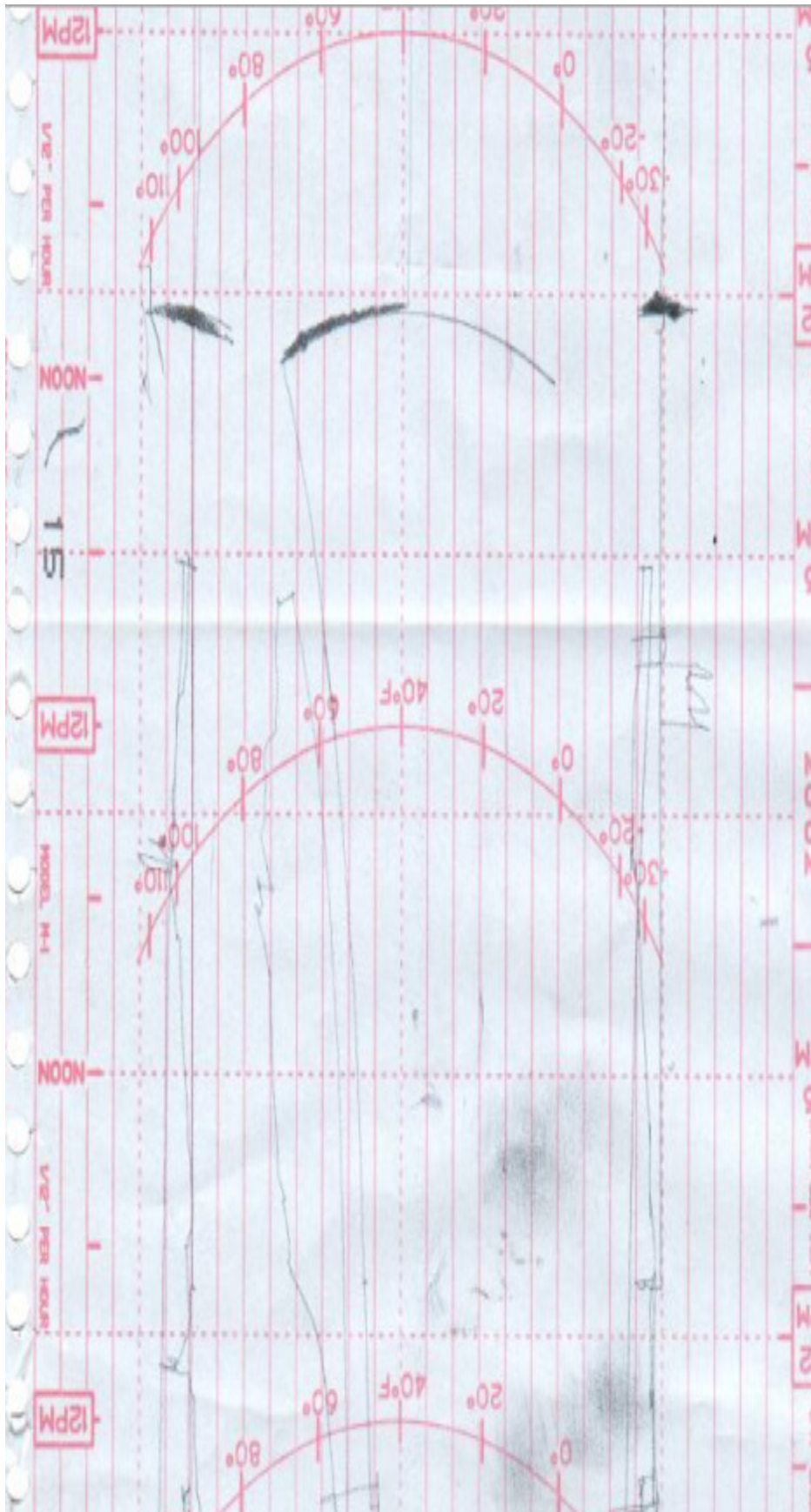
Com base nas informações acima foi constatado através do relatório do registrador de impacto, que é um equipamento utilizado para gravar continuamente a que condições o transformador de potência foi exposto durante transporte, que os resultados apresentaram distorções, ou seja, impactos ou movimentações bruscas Fotografia 3, o que é considerado estressante para toda estrutura do transformador.

Com isto foi tomada a decisão do retorno do transformador para análise.

Com o transformador em fábrica, foi confirmado que as condições do transporte foram responsáveis por provocar o deslocamento do núcleo. Desta forma foram realizadas as devidas tratativas.



Fotografía 3 – Resultado registrador de impacto



## 4.1. Análise dos Dados

### 4.1.1. Análise de Deformação Radial e Axial

Para a análise em questão não foram verificadas nenhuma deformação nos enrolamentos.

**Tabela 1 – Níveis de deformação do enrolamento**

Nível de Deformação N.D	Profundidade Radial	Dimensão Relativa da Deformação Axial			
		Face A	Face B	Face C	Face D
0					
1	1 cm Correspondente a 3,5 % do diâmetro do enrolamento	10 %			
2		30 %			
3		60 %			
4		100 %			
5		100 %			
6		100 %	100 %		
7		100 %	100 %	50 %	
8		100 %	100 %	100 %	
9		100 %	100 %	100 %	50 %

### 4.1.2. Análise de Deformação do Núcleo

Devido à alta robustez mecânica, os esforços em geral observados sobre o núcleo do transformador em decorrência de esforços elétricos não foram capazes de provocar alterações visíveis, contudo, impactos mecânicos em decorrência do transporte provocaram alterações na geometria do núcleo do transformador que podem se traduzir em estresses da isolação e estruturas de fixação, permitindo vibrações e a redução da vida útil do transformador à medida que facilitam outros processos degenerativos, como os próprios deslocamentos de enrolamentos.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O transformador de potência é projetado de forma que o conjunto seja capaz de suportar as forças mecânicas decorrentes do funcionamento nominal em segurança. Contudo, alguns esforços elétricos em funcionamento podem ultrapassar o limite máximo de suportabilidade ou gerar fadiga. Dentre tais esforços estão, principalmente, as correntes de curto-circuito e energizações.

Outro tipo de esforço que pode resultar em danos ao equipamento são os acidentes em transporte, que além de deslocamento dos enrolamentos, pode gerar também o deslocamento do núcleo do transformador.

Devido à alta robustez mecânica, em geral, os esforços elétricos não são capazes de provocar alterações visíveis e detectáveis através da realização dos ensaios normativos. Contudo, impactos mecânicos em decorrência do transporte pode provocar alterações na geometria do núcleo do transformador que se traduz em estresses da isolação e estruturas de fixação, permitindo vibrações e a redução de sua vida útil à medida que facilitam outros processos degenerativos.

Observando os resultados da análise de resposta em frequência de varredura, onde o resultado da comparação entre o ensaio realizado em fábrica e em campo apresentou alterações, foi possível detectar uma anormalidade, e fez-se necessário o retorno do transformador de potência à fábrica para as devidas análises e tratativas.

Em fábrica o transformador foi desmontado e em cada etapa foram realizados ensaios nos processos e assim foi possível verificar que o mesmo apresentava divergências no núcleo.

Com base nos resultados chegou-se à conclusão das causas das divergências apresentadas em campo, sendo elas, lâminas de silício em curto e espaço de ar entre as lâminas.

A importância do ensaio de SFRA se destaca visto que os ensaios em campo não apresentaram divergência, e caso o transformador entrasse em operação sem ser detectado o deslocamento do núcleo, as consequências poderiam ser perda da vida útil, diminuição da capacidade do transformador de suportar curto-circuito e surtos de tensão, o que ocasionaria diversos



transtornos a concessionaria e conseqüentemente seus consumidores. Como trata-se de uma região remota, com recursos limitados e de difícil acesso, a falha somente seria detectada quando o equipamento se encontrasse danificado a ponto de ocasionar a parada de seu funcionamento.

Após as análises de todas as etapas dos processos, o transformador foi retrabalhado e retornado ao cliente, foram realizados novamente todos os ensaios em fábrica e campo e os resultados foram satisfatórios.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, Ezequiel Rabelo de. **Análise de Resposta em Frequência Aplicada em Transformadores de Potência**. Belo Horizonte: UFMG, 2007. Dissertação de Mestrado.
  
- AGUIAR, R.; TEIXEIRA JÚNIOR, J. A.; LIMA MARTINS, C. L. **Análise de Varredura de Resposta em Frequência em Transformadores: Aplicação no Campo**. In: XX SNPTEE, 2009, Recife. Anais do XX SNPTEE, 2009. Disponível em: <http://studylibpt.com/doc/5690593/analise-de-varredura-de-resposta-em-frequencia-emf> Acesso em: 20 set. 2017.
  
- ARAUJO, Daniel Carrijo Polonio. **Estudo de Metodologia e Técnicas para Execução de Ensaios de Resposta em Frequência em Transformadores de Potência**. Belo Horizonte: UFMG, 2009. Dissertação de Mestrado.
  
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5356-1 - Transformador de Potência - Generalidades**. Rio de Janeiro, 2007. Errata 1, 2010. 107 p.
  
- DOBLE ENGINEERING. **SFRA M5100B User Guide**. Watertown, USA, June 2002.
  
- KIM, J. W. et al. **Fault Diagnosis of a Power Transformer Using an Improved Frequency Response Analysis**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 1, p. 169–178, 2005.
  
- RAHIMPOUR, E. et al. **Transfer Function Method to Diagnose Axial Displacement and Radial Deformation of Transformer Winding**. IEEE Transactions on Power Delivery, v.18, n.2, p. 493- 505, 2003.
  
- RYDER, S. **Frequency Response Analysis for Diagnostic Testing of Power Transformers**. *Electricity Today*, v. 13, n. 6, p. 14–19, 2001.
  
- RYDER, S. **Diagnosing Transformer Faults Using Frequency Response Analysis**. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 19, n. 2, p. 16–22, 2003.
  
- RYDER, S. **Methods for Comparing Frequency Response Analysis Measurements**. In: CONFERENCE RECORD OF THE 2002 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION. Boston, USA, 2002. p. 187–190.
  
- RYDER, S. **Transformer Diagnosis Using Frequency Response Analysis: Results From Fault Simulations**. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 19, n. 2, p. 16–22, 2002.
  
- SWEETSER, Charles. **Swweep Frequency Response Analysis Transformer Applications**. Detroit, 2003. Folheto DOBLE, 2003.

- TENBOHLEN, S.; RYDER, S. **Making Frequency Response Analysis Measurements: A Comparison of the Swept Frequency and Low Voltage Impulse Methods.** In: XIII<sup>TH</sup> INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. Netherlands, 2003.
  
- VAESSEN, P. T. M.; HANIQUE, E. **A New Frequency Response Analysis Method for Power Transformers.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 7, n. 1, p. 384–390, 1992.