



MODELAGEM DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA  
UTILIZANDO TÉCNICAS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Leonardo Martins de Almeida Coutinho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Antonio Carlos Ferreira  
Helvio Jailson Azevedo Martins

Rio de Janeiro  
Setembro de 2010

MODELAGEM DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA UTILIZANDO  
TÉCNICAS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Leonardo Martins de Almeida Coutinho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.

---

Dr. Helvio Jailson Azevedo Martins, D.Sc.

---

Prof. Sebastião Ercules Melo de Oliveira, D.Sc.

---

Dr. Francisco Manoel Salgado Carvalho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2010

Coutinho, Leonardo Martins de Almeida

Modelagem de Transformadores de Potência Utilizando Técnicas no Domínio da Frequência/ Leonardo Martins de Almeida Coutinho – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XI, 55 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Antonio Carlos Ferreira

Helvio Jailson Azevedo Martins

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 54-55.

1. Transformadores de Potência. 2. Resposta em Frequência. 3. Impedância Terminal. I. Ferreira, Antonio Carlos *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

À minha família e amigos,  
que estão sempre presentes  
acrescentando vida aos meus dias.

# AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais, Clécio Coutinho e Teresa de Fátima Martins de Almeida, que sempre acreditaram em mim e com todo seu apoio me incentivaram a ampliar meus conhecimentos, expandindo meus horizontes.

Agradeço também aos meus familiares, que se aproximam sempre que possível, contribuindo para me apoiar no que for necessário.

Agradeço a todos os meus amigos, próximos ou distantes, que me mostram que ainda estão presentes apesar dos caminhos diferentes que seguimos.

À Gisella que me apoiou muito durante a realização deste trabalho, e com muita paciência dedicada me mostrou os caminhos que poderiam ser seguidos durante esta dissertação. Agradeço também a ela pelas rotinas fornecidas e pelo seu empenho em alterá-las sempre que era preciso.

Ao Professor Antônio Carlos, que me incentivou acreditando na possibilidade de realização deste trabalho.

Ao Helvio Martins pela sua orientação e amizade, sempre acreditando em meu potencial, ajudando desde o início no desenvolvimento desta dissertação.

Ao Professor Sebastião e ao Engenheiro Francisco Salgado pela disponibilidade e esforço em participar da banca examinadora deste trabalho.

E por fim, faço meu agradecimento a todos os que ajudaram direta ou indiretamente não só no meu crescimento profissional como no meu aprendizado ao longo de toda minha vida.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MODELAGEM DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA UTILIZANDO  
TÉCNICAS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Leonardo Martins de Almeida Coutinho

Setembro/2010

Orientadores: Antonio Carlos Ferreira

Helvio Jailson Azevedo Martins

Programa: Engenharia Elétrica

Neste trabalho são estudadas as propriedades dos ensaios de Resposta em Frequência e Impedância Terminal, auxiliando na análise de transformadores de potência.

É estudada uma metodologia que estima os parâmetros de um circuito equivalente que modela o transformador com base em suas curvas de Impedância Terminal no domínio da frequência.

Através deste circuito equivalente são estimadas as curvas de Impedância Terminal e verificadas as alterações esperadas de acordo com modificações no circuito. Assim o modelo estudado pode ser validado.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MODELING OF POWER TRANSFORMERS USING  
FREQUENCY DOMAIN TECHNIQUES

Leonardo Martins de Almeida Coutinho

September/2010

Advisors: Antonio Carlos Ferreira

Helvio Jailson Azevedo Martins

Department: Electrical Engineering

In this work the properties of the Frequency Response and Terminal Impedance test procedures are studied, helping in the analysis of power transformers.

It is studied a methodology that estimates the parameters of an equivalent circuit which model the transformer considering its Terminal Impedance curves in the frequency domain.

By using this equivalent circuit the Terminal Impedance curves are estimated and the expected changes according to the circuit modifications are checked. Therefore, the model in study can be validated.

# ÍNDICE

CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO .....	1
1.1 O SISTEMA ELÉTRICO.....	1
1.2 OS TRANSFORMADORES.....	1
1.3 TÉCNICAS DE ENSAIOS .....	3
1.4 OBJETIVO .....	5
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	5
CAPÍTULO 2.....	7
ENSAIOS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA .....	7
2.1 INTRODUÇÃO .....	7
2.2 DEFINIÇÕES .....	9
2.3 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA.....	9
2.3.1 <i>Formas de Realização do Ensaio</i> .....	10
2.3.2 <i>Curvas Características de Resposta em Frequência</i> .....	13
2.4 IMPEDÂNCIA TERMINAL .....	17
2.4.1 <i>Formas de Realização do Ensaio</i> .....	18
2.4.2 <i>Curvas Típicas de Impedância Terminal</i> .....	19
2.5 COMPARAÇÃO ENTRE AS TÉCNICAS .....	21
2.6 CUIDADOS NA MEDIÇÃO .....	24
2.7 CONCLUSÕES.....	26
CAPÍTULO 3.....	27
AVALIAÇÃO DE TRANSFORMADORES.....	27
3.1 INTRODUÇÃO .....	27
3.2 REGIÕES DAS CURVAS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....	29
3.3 CONCLUSÕES .....	32
CAPÍTULO 4.....	34
MODELO UTILIZADO .....	34
4.1 INTRODUÇÃO .....	34
4.2 MÉTODO DO GRADIENTE DESCENDENTE.....	35
4.3 OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS .....	36
4.4 VALORES INICIAIS.....	38
4.5 CONCLUSÃO.....	38



<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>40</b>
<b>O USO DO MODELO PARA PROSPECÇÃO DE DEFEITOS FUTUROS.....</b>	<b>40</b>
<b>5.1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>40</b>
<b>5.2 PARÂMETROS EQUIVALENTES.....</b>	<b>41</b>
<b>5.3 CURVA ESTIMADA .....</b>	<b>42</b>
<b>5.4 REGIÕES DA CURVA DE IMPEDÂNCIA.....</b>	<b>44</b>
<b>5.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....</b>	<b>44</b>
<b>5.5.1 Núcleo .....</b>	<b>45</b>
<b>5.5.2 Conexões .....</b>	<b>47</b>
<b>5.5.3 Enrolamentos.....</b>	<b>49</b>
<b>5.6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>51</b>
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>52</b>
<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>52</b>
<b>6.1 CONCLUSÕES.....</b>	<b>52</b>
<b>6.2 TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>54</b>

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Transformador de potência de grande porte .....	2
Figura 2.1: Relação de tensão entre enrolamentos correspondentes .....	11
Figura 2.2: Transferência de sinal entre enrolamentos correspondentes.....	11
Figura 2.3: Transferência de sinal ao longo do enrolamento .....	12
Figura 2.4: Circuito de medição de Resposta em Frequência em transformador trifásico .....	12
Figura 2.5: Curva característica de Resposta em Frequência ( $X1-X2 / H1-H0$ ).....	14
Figura 2.6: Curva característica de Resposta em Frequência ( $H1-H0 / X1-X2$ ).....	14
Figura 2.7: Comparação da Resposta em Frequência realizada em ambos os enrolamentos.....	15
Figura 2.8: Diferença de fase e entre amplitudes dos sinais aplicados e medidos .....	18
Figura 2.9: Ligação das pontes RLC para medição da Impedância Terminal.....	18
Figura 2.10: Módulo e ângulo da curva de Impedância Terminal.....	20
Figura 2.11: Comparação entre Resposta em Frequência e Impedância Terminal .....	22
Figura 2.12: Fluxo magnético em transformador trifásico .....	23
Figura 2.13: Medição de Impedância Terminal com interferências .....	24
Figura 2.14: Circuito equivalente do transformador para ensaios de circuito aberto e curto-circuito .....	25
Figura 3.1: Exemplo da malha de parâmetros geométricos do transformador.....	28
Figura 3.2: Circuito equivalente de parâmetros distribuídos do transformador .....	29
Figura 3.3: Curva de Impedância Terminal, resistência e reatância.....	30
Figura 3.4: Curvas de Impedância Terminal do enrolamento de alta tensão .....	31
Figura 3.5: Principais faixas de frequência da curva de Impedância Terminal.....	32
Figura 4.1: Fluxograma do método utilizado .....	39

Figura 5.1: Circuito equivalente de parâmetros distribuídos do transformador .....	40
Figura 5.2: Módulo da Impedância Terminal do enrolamento de alta tensão .....	42
Figura 5.3: Fase da Impedância Terminal do enrolamento de alta tensão .....	42
Figura 5.4: Módulo da Impedância Terminal do enrolamento de baixa tensão .....	43
Figura 5.5: Fase da Impedância Terminal do enrolamento de baixa tensão.....	43
Figura 5.6: Principais faixas de frequência de um transformador .....	44
Figura 5.7: Módulo da Impedância Terminal com a indutância $L_{\text{núcleo}}$ em 50% .....	46
Figura 5.8: Módulo da Impedância Terminal com a resistência $R_{\text{núcleo}}$ em 15% .....	47
Figura 5.9: Módulo da Impedância Terminal com a indutância $L_{\text{conexões}}$ em 10% .....	48
Figura 5.10: Fase da Impedância Terminal com a indutância $L_{\text{conexões}}$ em 10%) .....	48
Figura 5.11: Módulo da Impedância Terminal do enrolamento de alta tensão com a capacitância $C_{g4}$ modificada .....	49
Figura 5.12: Módulo da Impedância Terminal do enrolamento de baixa tensão com a capacitância $C_{g4}$ modificada .....	50

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 O Sistema Elétrico

Os sistemas elétricos de potência (SEP) são umas das maiores e mais complexas obras de engenharia já construídas. O Sistema Interligado Nacional é uma rede elétrica única que engloba quase todo o território brasileiro e tem se tornado cada vez maior, interligando as regiões mais afastadas, o que o torna cada vez mais complexo e difícil de operar.

Este sistema é composto de vários elementos elétricos, como linhas de transmissão, pára-raios, transformadores, disjuntores etc. Estes equipamentos ficam expostos a condições adversas e por isso podem apresentar falhas ou má operação. Devido a isto, é necessário o aprimoramento de estudos, tecnologias e técnicas de monitoramento e diagnóstico cada vez mais refinadas de modo a manter este sistema elétrico operando com a qualidade e confiabilidade cada vez mais exigida pelo ser humano moderno.

Um dos equipamentos mais complexos e de mais alto custo do sistema elétrico é o transformador de potência. Estes são máquinas estáticas de corrente alternada, capazes de elevar ou reduzir a tensão, de forma a reduzir as perdas no sistema de transmissão pela redução da corrente requerida para determinada potência elétrica.

### 1.2 Os Transformadores

Estas máquinas são compostas de componentes isolantes (papel isolante e óleo mineral), magnéticos (núcleo ferromagnético) e condutores (bobinas de cobre), dispostos fisicamente de uma forma que faz com que sua manutenção seja um pouco complexa. Por este motivo é necessário o desenvolvimento de técnicas de diagnóstico

de falhas que facilitem a sua manutenção corretiva, indicando os possíveis defeitos ocorridos ou antecipando-os para que possam ser tomadas medidas preventivas adequadas.



**Figura 1.1: Transformador de potência de grande porte**

Devido a sua importância no sistema elétrico, os transformadores devem ser bem projetados e dimensionados para que respondam de forma robusta aos diversos tipos de distúrbios do sistema elétrico.

Ao longo de sua vida útil, os transformadores suportam muitos esforços eletromecânicos devido à sobretensões e curtos-circuitos, o que pode causar movimentos e deformações internas em seus componentes elétricos. As deformações internas podem ser causadas pelo afrouxamento de seus enrolamentos e a perda de pressão nas suas bobinas, causando uma diminuição na capacidade de suportar outros curtos-circuitos. Estas alterações são cumulativas e podem um dia ser responsáveis por uma falha que pode retirá-lo de operação. Técnicas de monitoramento possibilitam identificar estas mudanças sutis em sua característica mecânica, prevendo uma possível falha.

No seu monitoramento tem sido importante o desenvolvimento de modelos matemáticos complexos que possam simular o seu comportamento elétrico e eletro-

magnético ao longo da sua vida útil. A simulação destes modelos matemáticos tem evoluído bastante devido ao crescente poder computacional disponível atualmente.

### 1.3 Técnicas de Ensaio

Atualmente as técnicas de monitoramento de transformadores ainda precisam se desenvolver muito para conseguir prever falhas corretamente, visando uma manutenção preventiva e preditiva, aumentando a vida útil destes equipamentos e evitando desligamentos indevidos no sistema elétrico.

Existem diversas técnicas utilizadas para se monitorar o estado de um transformador de potência, são elas:

**Descargas parciais:** São fenômenos ocasionados pelo rompimento localizado da rigidez dielétrica do material isolante, ou seja, são descargas elétricas devido a um elevado campo elétrico. Elas podem deteriorar completamente o sistema de isolamento de um equipamento. Este ensaio detecta o nível de descargas e identifica em que região do transformador está ocorrendo o problema.

Um problema deste ensaio é que este tem uma grande susceptibilidade a ruídos, fazendo com que, às vezes, seja impossível distinguir entre ruídos e o sinal da descarga parcial, necessitando a aplicação de um processamento mais específico dos sinais coletados.

**Emissão acústica:** A aplicação desse método no campo é relativamente recente e tem o objetivo de detectar e localizar focos de descargas parciais que possam estar acontecendo na parte ativa de transformadores de potência, através da medição dos sinais acústicos característicos que são emitidos no momento de cada descarga. Este ensaio possibilita a avaliação da gravidade do defeito e sua origem, elétrica ou mecânica.

O ensaio deve ser realizado com o equipamento energizado e nas suas condições normais de operação. Isso permite determinar a localização do ponto da descarga, a intensidade e frequência do seu aparecimento em função do ciclo de carga ao qual o transformador é submetido.

**Termovisão:** A técnica consiste na medição a distância da temperatura através da radiação infravermelha que é emitida espontaneamente pelos equipamentos, utilizando-se de um sistema que permite a formação de imagens termográficas.

Um benefício adicional da termografia é que se trata de uma técnica que permite realizar as inspeções em equipamentos que se encontram operando com carga. Como se trata de um método de diagnóstico sem contato, pode-se rapidamente inspecionar um componente de equipamento desde uma distância segura e analisar as imagens sem nunca ter colocado em perigo sua integridade física. Esta técnica é muito útil para inspecionar componentes internos dos equipamentos, sendo utilizada também para os transformadores.

**Análise cromatográfica do óleo isolante:** Esta análise visa diagnosticar a condição operativa do equipamento através da identificação, quantificação e medição da concentração dos gases presentes no óleo mineral isolante, que podem caracterizar a evolução de um defeito. Esta técnica pode detectar defeitos ainda no estágio inicial a partir da composição destes gases e da rapidez com que eles são formados.

**Resposta em Frequência:** Uma das técnicas bastante utilizadas para se verificar a integridade de equipamentos elétricos é a Resposta em Frequência, onde é percebida uma variação de um sinal ao longo de uma larga escala de frequência. Através desta técnica, pode ser verificada uma identidade única do transformador de potência, verificando-se suas ressonâncias e anti-ressonâncias naturais e deslocamentos geométricos internos.

Através desta técnica, também é possível auxiliar na modelagem do transformador, estimando-se seus parâmetros elétricos, tais como resistência, capacitância e indutância. Além disso, estes modelos podem ser utilizados para o diagnóstico de falhas internas.

Este método se mostrou eficaz para diagnosticar movimentos de bobinas de enrolamentos, o que pode evoluir para um defeito, enquanto que os outros métodos não se mostraram tão eficazes neste caso. Por este motivo este método foi escolhido como tema deste trabalho e será detalhado no Capítulo 2.

## **1.4 Objetivo**

Este trabalho visa identificar os parâmetros elétricos dos transformadores e aprimorar uma das técnicas de análise aplicadas aos transformadores de potência de forma a contribuir com a qualidade e confiabilidade do sistema elétrico brasileiro.

Este trabalho foi desenvolvido com o auxílio da técnica da Resposta em Frequência e Impedância Terminal. Ao longo deste trabalho será explicado um método de cálculo do circuito equivalente do transformador a partir das suas curvas no domínio da frequência. Depois de aplicado o modelo estudado serão feitas alterações no circuito equivalente, ajudando a identificar as diferenças nas curvas e associar ao defeito ocorrido.

## **1.5 Estrutura da Dissertação**

No Capítulo 2 será explicado detalhadamente o método da relação de tensão ao longo frequência e sua diferença do método da Impedância Terminal, incluindo os equipamentos necessários para execução do ensaio e exemplos das curvas medidas.

No Capítulo 3 é mostrado um circuito equivalente para o transformador e seus principais parâmetros elétricos. São feitas algumas correlações entre os principais tipos de falhas e os parâmetros elétricos alterados, verificando assim influências causadas nas regiões das curvas no domínio da frequência.

O Capítulo 4 descreve o modelo utilizado nesta dissertação para cálculo dos circuitos equivalentes dos transformadores a partir das suas curvas no domínio da frequência. O método utilizado foi o Gradiente Descendente que tende a diminuir o erro entre as curvas originais de impedância dos transformadores e suas curvas estimadas através dos parâmetros elétricos calculados pelo modelo.

O uso do modelo descrito é feito no Capítulo 5, onde são mostrados os resultados e conclusões observadas a partir de cada curva estimada. Serão feitas comparações entre as curvas originais e as curvas estimadas após modificações no circuito equivalente do transformador, verificando a sensibilidade destas técnicas no domínio da frequência em relação aos parâmetros alterados.



O Capítulo 6 conclui este trabalho e são indicados trabalhos futuros que complementariam esta dissertação, assim como caminhos que ainda precisam ser percorridos para aperfeiçoar este método de diagnóstico.

No último capítulo são relacionadas as Referências Bibliográficas que serviram de apoio para o desenvolvimento deste trabalho.

# Capítulo 2

## Ensaio no Domínio da Frequência

### 2.1 Introdução

Os transformadores são basicamente formados por fios de cobre enrolados ao redor de um núcleo ferromagnético, imersos em um tanque com óleo isolante. Através deste aspecto construtivo relativamente simples se forma um circuito complexo com resistências, indutâncias e capacitâncias entre espiras, bobinas, enrolamentos, núcleo e tanque. Este circuito complexo faz com que os transformadores apresentem uma assinatura única expressa através de uma função de transferência que reflete essencialmente as variações de seus parâmetros internos em função da frequência, tendo como característica principal as várias frequências de ressonância.

Devido a isto, os métodos de análise de transformadores de potência baseados no seu comportamento ao longo das frequências são largamente utilizados pelos fabricantes e concessionárias da atualidade. Estes ensaios de Resposta em Frequência são relativamente fáceis de realizar, necessitando apenas que o equipamento esteja desenergizado.

A análise da Resposta em Frequência é um ensaio em algum equipamento tal como um resistor, indutor, capacitor, transistor, ou transformadores, reatores, máquinas rotativas, etc., realizado através da relação entre grandezas para cada componente de frequência.

Estas grandezas podem ser tensões, correntes, tensão e corrente, etc., que significam uma relação entre um sinal de entrada e um de saída em uma faixa de frequência especificada, se traduzindo como uma curva característica do equipamento, sendo bastante úteis para a análise de transformadores de potência.

Este tipo de ensaio é não invasivo e não destrutivo, ou seja, o equipamento não precisa ser desmontado para a realização desta medição, significando uma vantagem

adicional em relação a outros métodos ao não provocar possíveis danos aos enrolamentos e evitar a contaminação do óleo isolante.

Estas medições às vezes são realizadas em transformadores ainda na fábrica, de modo a se ter um registro deles em perfeito estado de funcionamento. Ao se suspeitar de algum problema no equipamento, ou apenas para monitorá-lo depois de anos de funcionamento, realiza-se outra medição e a compara com a medição anterior. É necessário inclusive realizar estes ensaios nos equipamentos depois de transportados para a sua localização final, pois problemas no transporte podem ocorrer, causando deslocamentos internos não percebidos visualmente, mas que estas técnicas têm a sensibilidade de verificar.

Estas medições podem ser utilizadas sozinhas para o diagnóstico do equipamento ou utilizadas para complementar outras técnicas. Ao ficar evidenciada a ocorrência de determinado defeito ou alteração em sua geometria o transformador deverá passar por detalhadas inspeções internas.

Os ensaios de Resposta em Frequência são relativamente simples de se realizar, não necessitando do transporte do equipamento para um laboratório, podendo ser feito em campo. Além disso, este pode ser feito de forma rápida com poucos equipamentos e de forma automatizada.

A desvantagem deste método é que o transformador precisa ser desconectado do sistema elétrico, pois sua característica envolve a injeção e medição de sinais em seus enrolamentos. Atualmente estudam-se métodos que visam realizar este ensaio com o equipamento energizado, mas medições em equipamentos energizados necessitariam de geradores de sinais em cada enrolamento do transformador, operando sob potencial. Para isso, deve-se encontrar uma forma de aplicar os sinais no equipamento sem que suas tensões normais de operação interfiram na medição, causem danos nos equipamentos utilizados e exponham a riscos vidas humanas [2].

Ao longo deste capítulo serão explicados os métodos de realização dos ensaios de Resposta em Frequência, assim como os principais detalhes de suas curvas características, comparando-as.

## 2.2 Definições

Nos ensaios de Resposta em Frequência o sinal medido pode ser em forma de tensão ou corrente. Quando for utilizado na forma de corrente, pode-se obter tanto a impedância  $Z(\omega)$  quanto a admitância  $Y(\omega)$  entre os pontos.

Como o ensaio de Resposta em Frequência é qualquer ensaio envolvendo relações entre duas grandezas características de um equipamento em uma faixa de frequências especificadas, algumas definições se fazem necessárias.

Na literatura técnica a relação de tensão  $\frac{V_2(\omega)}{V_1(\omega)}$ , onde  $V_1$  é a tensão aplicada e  $V_2$  é a tensão medida, calculadas em uma ampla faixa de frequências é freqüentemente denominada de Resposta em Frequência. Uma variação deste ensaio, ainda no domínio da frequência, é a realização da medição das impedâncias de entrada ( $Z(\omega)$ ) de um dos enrolamentos do transformador.

As duas técnicas são obviamente caracterizáveis como Respostas em Frequência. Portanto neste trabalho, visando melhor entendimento, a primeira técnica de relação de tensões será designada como Resposta em Frequência (RF), enquanto que a segunda técnica será chamada de Impedância Terminal,  $Z(\omega)$ .

## 2.3 Resposta em Frequência

A Resposta em Frequência em transformadores, ou seja, a medição da relação entre a tensão medida e a aplicada ( $V_{med.}/V_{apl.}$ ) é realizada aplicando-se um sinal senoidal (entre  $1 V_{ef}$  e  $10 V_{ef}$ ), com frequência variável na ampla faixa de 20 Hz a 10 MHz, a um dos enrolamentos do transformador. Esta faixa de frequências pode variar para cada instrumento de medição. O sinal aplicado é transferido para o outro enrolamento ou ao longo do próprio e medido. A relação entre os sinais se traduz na curva de Resposta em Frequência, ou seja, na tensão transferida pelos enrolamentos a cada ponto de frequência.

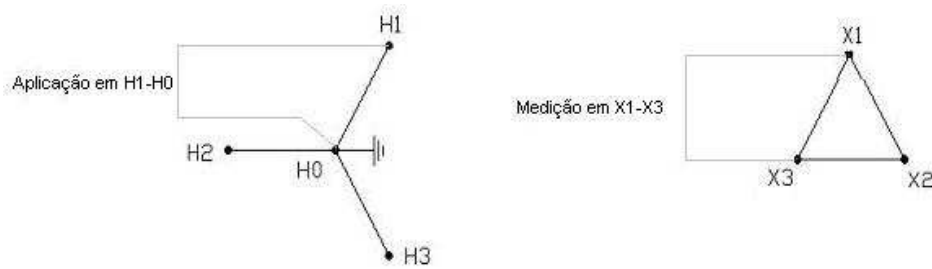
A característica de cada transformador, assim como a configuração de seus enrolamentos (delta, estrela) irá influenciar a amplitude do sinal que será aplicado e no tipo de ligação dos instrumentos.

### **2.3.1 Formas de Realização do Ensaio**

Existem duas formas de injeção dos sinais nos enrolamentos dos transformadores. Um dos métodos é através da aplicação de um impulso de tensão de baixa amplitude para obtenção da função de transferência, onde a amplitude do sinal é atenuada em função da frequência. Na utilização de sinais impulsivos é necessário transformar tanto o sinal aplicado quanto o medido para o domínio da frequência aplicando-se a transformada de Fourier.

A outra forma de realização deste ensaio, mais comum e utilizada para o desenvolvimento deste trabalho é através da aplicação de sinais senoidais em uma ampla faixa de frequências. Esta técnica é mais nova, possibilitada através dos geradores de sinais, o que tornou possível injetar sinais senoidais na faixa de frequência desejada, tendo aproximadamente uma mesma amplitude de tensão para cada componente de frequência. Assim, foi possibilitada a obtenção de espectros de frequência até 10 MHz e um resultado direto no domínio da frequência, não sendo necessário aplicar a transformada de Fourier. Através destes geradores de sinais também é possível a medição de Impedâncias Terminais além da medição de tensão transferida entre os enrolamentos.

Assim como citado, a Resposta em Frequência pode ser realizada aplicando-se um sinal a um dos enrolamentos (H1-H0) e medida no enrolamento correspondente (X1-X3), por exemplo, de acordo com a Figura 2.1, ligação estrela-delta. Nada impede que sejam feitas medições nos outros enrolamentos, medindo-se uma transferência de tensão indireta, verificando a influência nos enrolamentos não correspondentes.

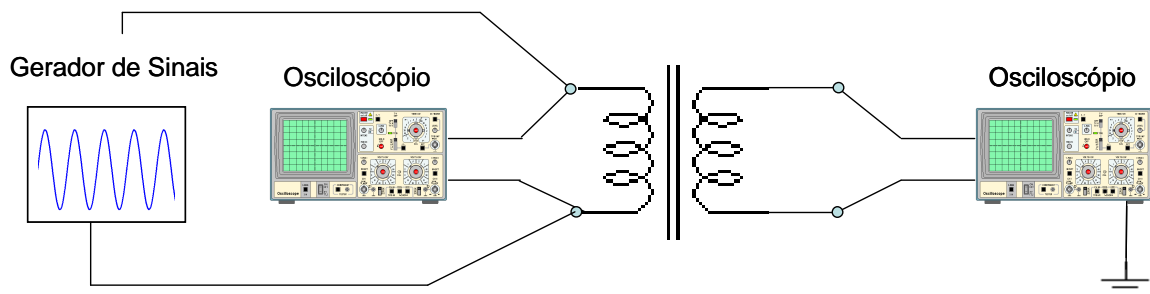


**Figura 2.1: Relação de tensão entre enrolamentos correspondentes**

A Tabela 2.1 mostra os terminais envolvidos na sequência de ensaios que podem ser realizados nos transformadores trifásicos [2].

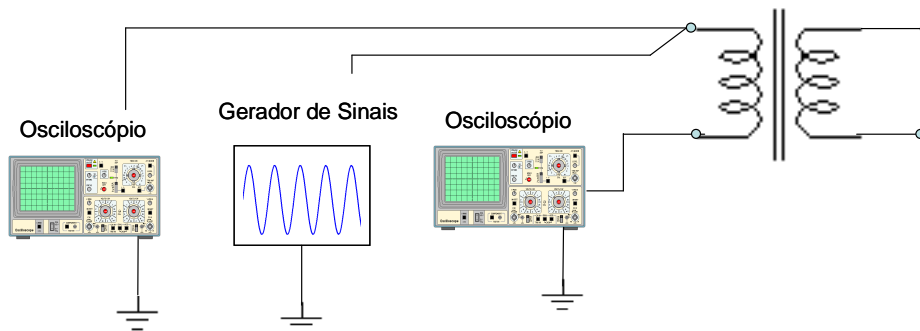
**Tabela 2.1: Sequência de ensaio para equipamentos trifásicos**

Ligação	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9
$\Delta - Y$	H <sub>1</sub> -H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> -H <sub>3</sub>	H <sub>3</sub> -H <sub>1</sub>	H <sub>1</sub> -X <sub>0</sub>	H <sub>2</sub> -X <sub>0</sub>	H <sub>3</sub> -X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub> -X <sub>0</sub>	X <sub>2</sub> -X <sub>0</sub>	X <sub>3</sub> -X <sub>0</sub>
$\Delta - \Delta$	H <sub>1</sub> -H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> -H <sub>3</sub>	H <sub>3</sub> -H <sub>1</sub>	H <sub>1</sub> -X <sub>1</sub>	H <sub>2</sub> -X <sub>2</sub>	H <sub>3</sub> -X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> -X <sub>2</sub>	X <sub>2</sub> -X <sub>3</sub>	X <sub>3</sub> -X <sub>1</sub>
	Admitâncias / Impedâncias Próprias			Admitâncias / Impedâncias de Transferência			Admitâncias / Impedâncias Próprias		



**Figura 2.2: Transferência de sinal entre enrolamentos correspondentes**

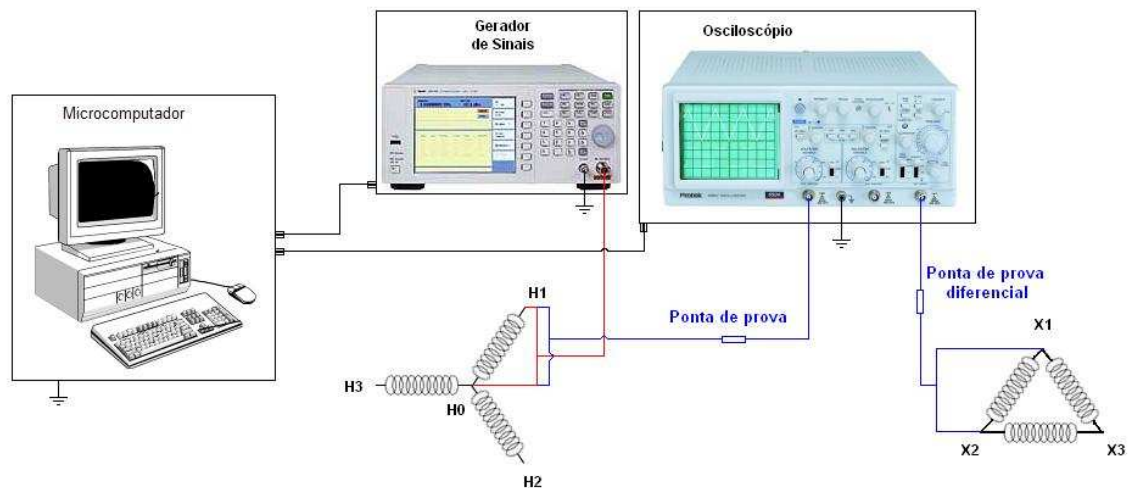
Este ensaio pode ser feito aplicando-se um sinal a um enrolamento com o gerador de sinais e medindo-se o sinal induzido em outro enrolamento com o osciloscópio, verificando-se uma transferência de sinal entre enrolamentos, exemplificado na Figura 2.2. O ensaio também pode ser realizado injetando-se um sinal em uma extremidade do enrolamento em relação a uma referência e medindo-se na outra extremidade do enrolamento, se traduzindo em uma transferência de sinal ao longo do enrolamento, como na Figura 2.3. Os resultados destes ensaios são medidos por  $V_{saída}/V_{entrada}$ , em p.u. ou em dB, mostrados em um gráfico em função da frequência.



**Figura 2.3: Transferência de sinal ao longo do enrolamento**

Os instrumentos necessários para a realização deste ensaio são os geradores de sinais, osciloscópios, ponta de provas, pontas de provas diferenciais e um microcomputador para automatização das medições, que são equipamentos portáteis e por isso facilitam as medições em campo.

Um gerador de sinais aplica uma tensão ao enrolamento e um osciloscópio monitora tanto o sinal aplicado como o sinal medido através de pontas de prova. Um microcomputador é utilizado requisitando os sinais do osciloscópio e tratando os dados. Estes equipamentos são mostrados na Figura 2.4.



**Figura 2.4: Circuito de medição de Resposta em Frequência em transformador trifásico**

### 2.3.2 *Curvas Características de Resposta em Frequência*

As curvas de Resposta em Frequência são normalmente normalizadas com base na relação nominal do transformador na frequência de 60 Hz, de acordo com a Equação 2.1.

$$\frac{\frac{\text{Medição}}{\text{Aplicação}}}{\frac{\text{Medição}(60\text{Hz})}{\text{Aplicação}(60\text{Hz})}} \quad (2.1)$$

Pode-se encontrar na literatura trabalhos em que as curvas não estão normalizadas em relação aos 60 Hz. Neste presente trabalho esta normalização é feita, resultando em valores próximos a 1 p.u. nestas baixas frequências.

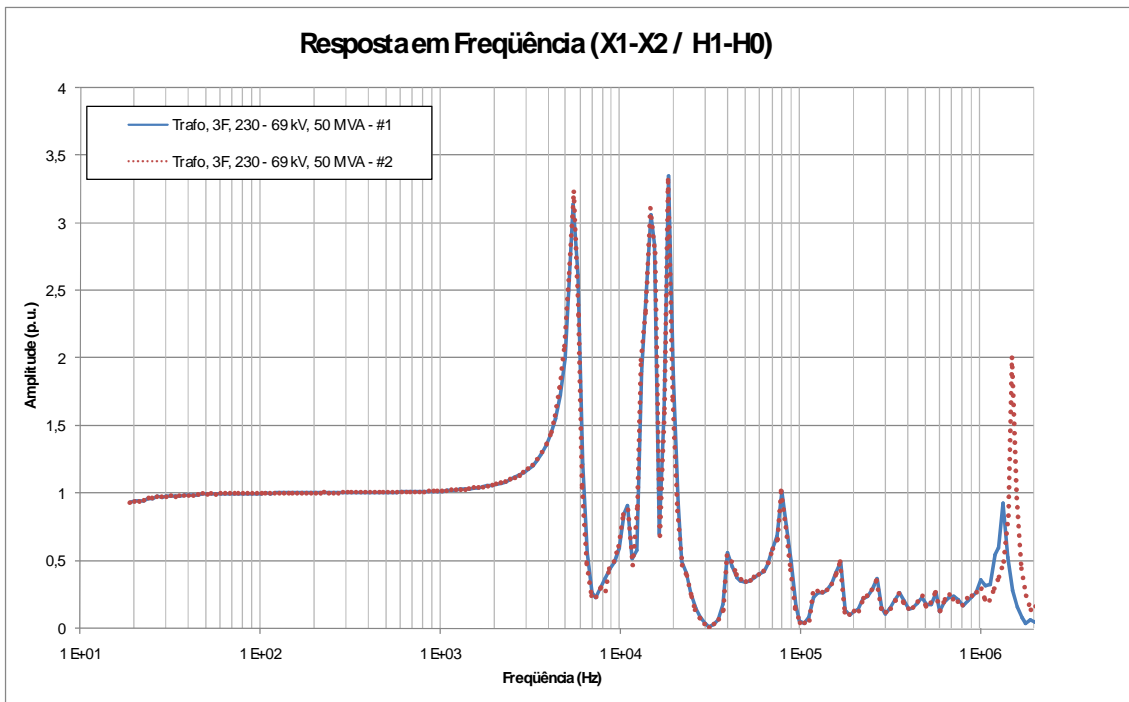
Neste trabalho os gráficos de Resposta em Frequência são exibidos com amplitude em p.u. no eixo das ordenadas e a frequência no eixo das abscissas na escala logarítmica, mas no exterior pode-se observar a predominância de curvas com o eixo das ordenadas em dB.

Nas Figuras 2.5 e 2.6 estão mostrados exemplos de curvas de Resposta em Frequência de dois transformadores trifásicos semelhantes, de mesmas características e mesmo fabricante. Estes equipamentos são trifásicos e operam com a tensão de 230-69 kV e 50 MVA de potência.

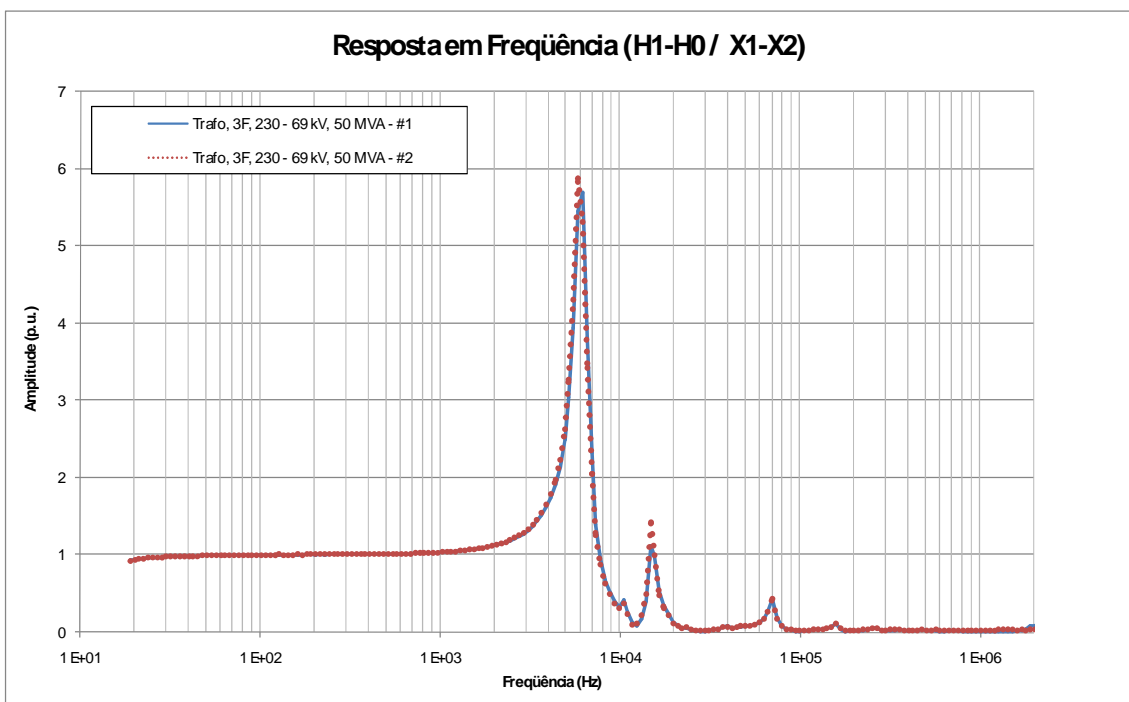
As curvas de Resposta em Frequência seguem o padrão (*Medição / Aplicação*), portanto na Figura 2.5 é mostrada a aplicação no enrolamento de alta tensão (H1-H0) e a medição no enrolamento de baixa tensão (X1-X2), ou seja, (X1-X2 / H1-H0). Na Figura 2.6 é mostrada a medição em alta tensão, através do sinal aplicado no enrolamento correspondente de baixa tensão.

Das Figuras 2.5 e 2.6 podem-se notar visualmente as ressonâncias e atenuações ao longo da faixa de frequências. Nestes ensaios de Resposta em Frequência pode-se perceber que como as medições estão normalizadas em 60 Hz, o transformador mantém uma relação de tensão próxima a 1 p.u. para baixas frequências, mas em altas frequências esta relação de tensão pode ser bem maior, como os 6 p.u. do exemplo mostrado na Figura 2.6 (aplicação em baixa tensão e medição no enrolamento de alta tensão).





**Figura 2.5: Curva característica de Resposta em Frequência (X1-X2 / H1-H0)**

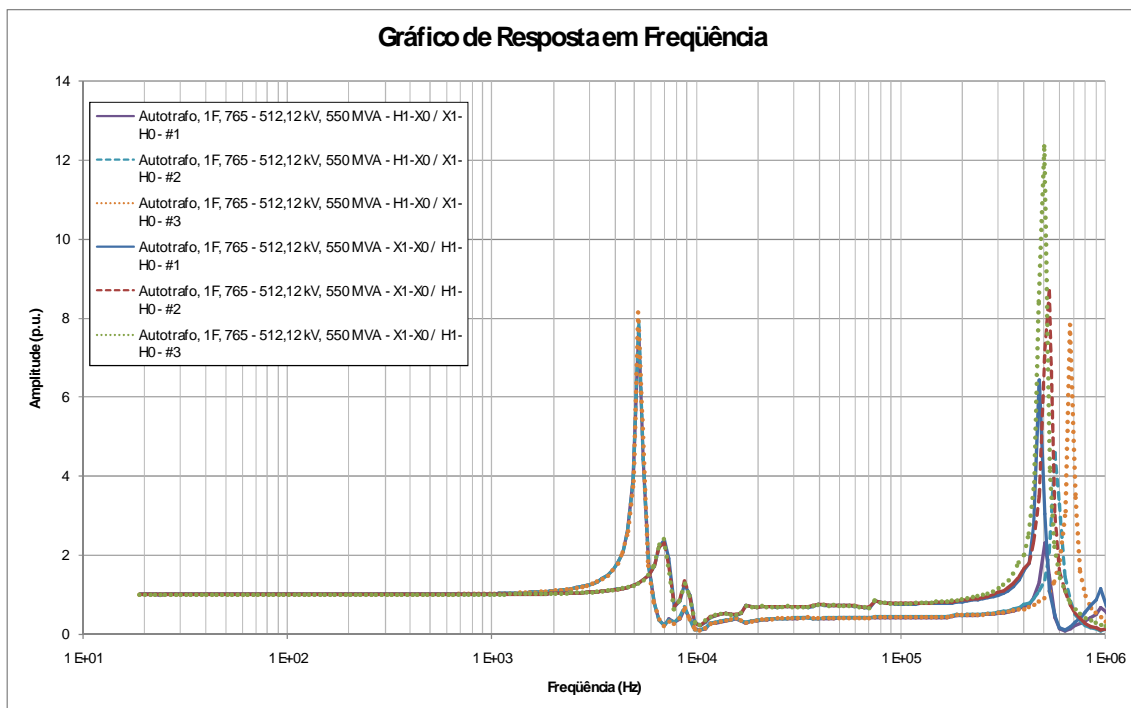


**Figura 2.6: Curva característica de Resposta em Frequência (H1-H0 / X1-X2)**

Da comparação entre as Figuras 2.5 e 2.6 notam-se algumas características, como o maior grau de detalhes na curva onde é feita a aplicação do sinal no enrolamento de alta tensão e medição no enrolamento de baixa tensão da Figura 2.5. Desta medição

podem-se tirar mais informações, pois aparecem ressonâncias inclusive em altas frequências. Na Figura 2.6 pode-se perceber que quando a aplicação do sinal é feita na baixa tensão e medições no enrolamento de alta tensão a curva se apresenta mais simples, verificando-se uma grande atenuação para altas frequências. Isto mostra que o ensaio de Resposta em Frequência tem pouca sensibilidade na identificação de defeitos provenientes de enrolamentos de menor tensão.

A Figura 2.7 exibe a Resposta em Frequência com aplicação do sinal em ambos os enrolamentos de um equipamento monofásico. Os equipamentos utilizados neste ensaio são três autotransformadores iguais que operam em um mesmo banco trifásico. Eles operam com a tensão de 765 – 512 kV e 550 MVA de potência.



**Figura 2.7: Comparação da Resposta em Frequência realizada em ambos os enrolamentos**

Assim como na comparação mostrada nas Figuras 2.5 e 2.6, os ensaios nestes autotransformadores também semelhantes da Figura 2.7 são muito parecidos, tendo as suas curvas passando por pontos muito próximos, ficando até difícil de distinguir uma da outra. Isto ocorre, pois o fabricante utilizou o mesmo método de fabricação, deixando os equipamentos idênticos internamente. Percebe-se que as diferenças entre estes equipamentos aparecem nas altas frequências, provavelmente por diferenças nas

conexões utilizadas nos ensaios (cabos entre o equipamento de medição e o transformador). Como os transformadores são semelhantes, em caso de suspeita de defeito em um deles o outro pode ser utilizado como base de comparação.

Desta Figura 2.7 (autotransformadores) também é possível notar que as medições em ambos os enrolamentos do equipamento contém bastantes detalhes, ao contrário do mostrado na Figura 2.6 (comparação entre transformadores). A explicação disto é que por este equipamento ensaiado ser um autotransformador, devido à sua forma construtiva que faz com que um enrolamento esteja parcialmente contido no outro, ambas as curvas de Resposta em Frequência possuem bastantes ressonâncias, ocorrendo em frequências próximas.

Atualmente verifica-se a necessidade da medição da Resposta em Frequência em conjunto com o ângulo da relação de tensão. Considerando na referência o ângulo de aplicação da tensão, pode-se medir a tensão transferida com seu ângulo em relação à referência. Deste modo pode-se calcular a relação de tensão em conjunto com a sua defasagem angular, como na Equação 2.2.

$$H \angle \theta = \frac{V_{med} \angle \varphi}{V_{apl} \angle 0^\circ} \quad (2.2)$$

A forma mais usual de apresentação do gráfico de Resposta em Frequência é com o eixo das abscissas com a frequência em escala logarítmica, amplificando as informações contidas nas frequências mais baixas. Para a utilização em escala linear seria preciso verificar o gráfico a cada década de frequência, de forma com que os detalhes de cada faixa de frequência se sobressaíam.

Na literatura podem-se encontrar os gráficos de Resposta em Frequência em dB, pois alguns autores preferem mostrar este ensaio com o eixo das ordenadas em logaritmo, assim como na Equação 2.3.

$$H_{dB} = -20 \cdot \log \left( \frac{V_{saída}}{V_{entrada}} \right) \quad (2.3)$$

A utilização dos gráficos em escala logarítmica ou em dB para análises e comparações deve ser avaliada, pois esta escala amplifica as informações contidas nas

baixas frequências. Por questões de padronização neste trabalho as relações de tensão estão sempre mostradas em p.u., com o eixo das ordenadas em escala linear.

## 2.4 Impedância Terminal

O ensaio de Impedância Terminal é realizado medindo-se a impedância de um enrolamento do transformador de potência através da injeção de um sinal em um dos terminais do enrolamento e a medição do sinal na sua outra extremidade. A impedância deste enrolamento é medida enquanto os outros enrolamentos correspondentes ficam em aberto ou em curto-circuito.

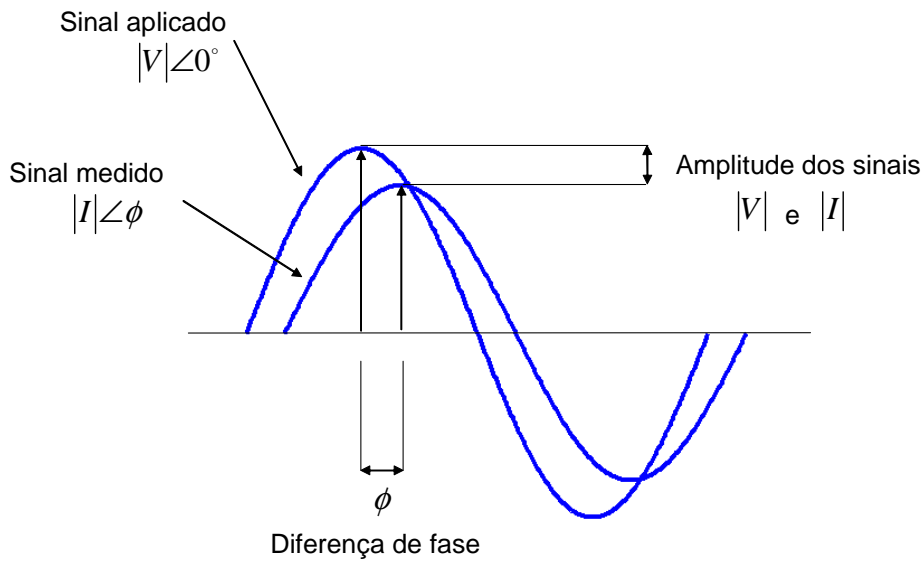
Em geral o sinal aplicado é uma tensão, submetida a um dos enrolamentos do transformador, enquanto que o equipamento de medição (ponte de medição) mede uma corrente na outra extremidade do enrolamento. A tensão aplicada pode ser considerada com seu ângulo na referência e a corrente é medida com módulo e ângulo de defasagem. Calculando assim a impedância através da Equação 2.4.

$$|Z|\angle\theta = \frac{V\angle 0^\circ}{I\angle\varphi} \quad (2.4)$$

O ensaio trata-se desta verificação de impedância em cada ponto de frequência, onde os intervalos de frequência são escolhidos manualmente ou automaticamente dependendo do equipamento utilizado.

Assim como na Resposta em Frequência (relação de tensão), as frequências variam desde 20 Hz a até uns 10 MHz, através de pelo menos uns 200 pontos de medição ao longo desta faixa de frequência. Os pontos de medição devem ficar bem distribuídos para cada década de frequência, detectando-se influências tanto dos enrolamentos quanto do núcleo e conexões.

A curva de Impedância Terminal consiste da relação entre os módulos do sinal aplicado e medido (tensão e corrente) e da diferença de fase entre sinal medido e o aplicado, exemplificados através da Figura 2.8.

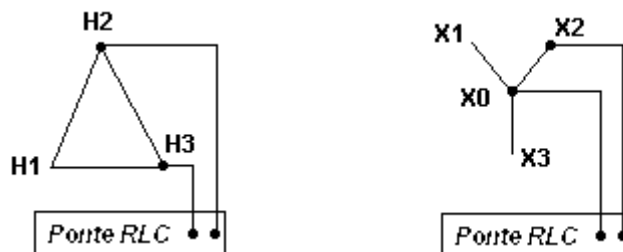


**Figura 2.8: Diferença de fase e entre amplitudes dos sinais aplicados e medidos**

#### 2.4.1 Formas de Realização do Ensaio

A realização do ensaio de Impedância Terminal é feita com o auxílio de uma ponte de impedâncias de frequência variável conectada aos terminais do enrolamento a ser analisado e um microcomputador para aquisição dos dados. A ponte de impedâncias injeta um sinal em um lado do enrolamento e mede a transferência deste ao longo do enrolamento, variando-se a frequência do sinal injetado e medindo sua amplitude e a diferença de fase em relação ao sinal medido para cada ponto de frequência.

Para cada enrolamento é feito o mesmo procedimento, podendo-se manter os outros enrolamentos em aberto ou em curto circuito. A Figura 2.9 apresenta a ponte de impedâncias RLC ligadas aos terminais em delta e em estrela.



**Figura 2.9: Ligação das pontes RLC para medição da Impedância Terminal**

As medições de Impedância Terminal realizadas por pontes tipo RLC têm como princípio a injeção de um sinal de tensão através de um oscilador no circuito e a conseqüente medição da corrente circulante resultante. Da relação entre a tensão aplicada e a corrente resultante obtém-se a impedância desejada [2].

Normalmente o número de medições a ser realizado depende do número de enrolamentos do transformador, ou seja, para um transformador trifásico, realizam-se seis medições, uma para cada enrolamento, de acordo com a Tabela 2.2.

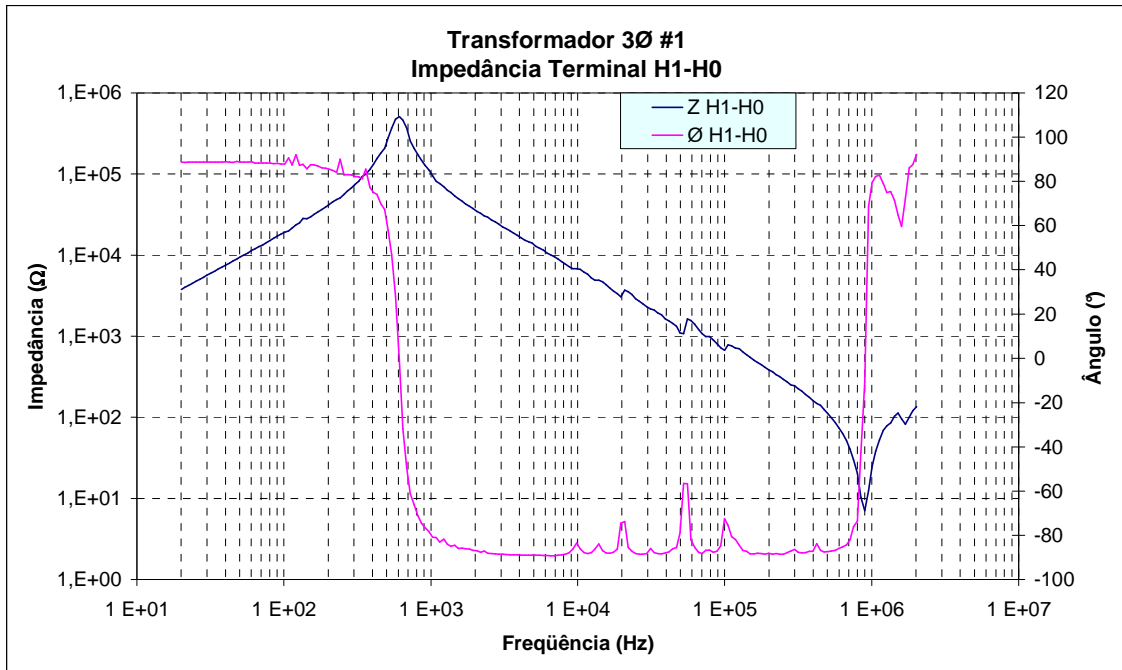
**Tabela 2.2: Terminais envolvidos na medição da Impedância Terminal**

	Terminais de alta tensão			Terminais de baixa tensão		
Enrolamento Y	H1-H0	H2-H0	H3-H0	X1-X0	X2-X0	X3-X0
Enrolamento Δ	H1-H2	H2-H3	H3-H1	X1-X2	X2-X3	X3-X1

É comum que a medição da Impedância Terminal seja feita com os enrolamentos secundários e terciários em aberto, mas a medição com os demais enrolamentos em curto circuito pode ser necessária, pois este tipo de prática evita interferências causadas por ambientes fabris ou de subestações.

#### 2.4.2 *Curvas Típicas de Impedância Terminal*

A curva de Impedância Terminal é traçada com o seu módulo e seu respectivo ângulo variando ao longo das faixas de frequência. Assim como a curva de Resposta em Frequência (relação de tensão), a curva de Impedância Terminal possui o eixo das frequências em logaritmo, facilitando a exibição de toda a faixa de frequências medida. Este ensaio é comumente mostrado com o eixo das ordenadas também em logaritmo, com as impedâncias calculadas diretamente em ohms. O ângulo é sempre mostrado em uma escala linear no eixo das ordenadas. Esta curva citada está exemplificada na Figura 2.10.



**Figura 2.10: Módulo e ângulo da curva de Impedância Terminal**

As variações de amplitude e fase se dão devido à malha RLC que compõe a geometria interna do transformador. Sua configuração interna faz variar sua impedância para cada faixa de frequência em que é calculada, pois as reatâncias indutivas e capacitivas são dependentes da frequência.

Em geral as curvas de Impedância Terminal seguem o padrão do gráfico mostrado, onde o ângulo deixa de ser positivo e se torna negativo, passando por zero, onde ocorre a primeira ressonância na curva do módulo da impedância. Nas altas frequências, por volta de 1 MHz existe uma anti-ressonância, que é um ponto de mínimo na curva do módulo da impedância, neste ponto o ângulo deixa de ser negativo e volta a ser positivo.

Deste gráfico nota-se que até a primeira ressonância o ângulo era aproximadamente 90 graus, resultando em um circuito indutivo para baixas frequências. Entre a ressonância e a anti-ressonância o circuito é capacitivo e após a anti-ressonância volta a ser indutivo, apenas olhando do ponto de vista da diferença angular medida.

Nessas ressonâncias e anti-ressonâncias a reatância indutiva ( $X_L = j\omega L$ ) é igual à capacitiva ( $X_C = 1/j\omega C$ ) e, portanto, o circuito é puramente resistivo e o ângulo passa por zero. Portanto quando o ângulo deixa de ser positivo ocorre uma ressonância e quando ele deixa de ser negativo ocorre uma anti-ressonância ou atenuação.

## 2.5 Comparação entre as Técnicas

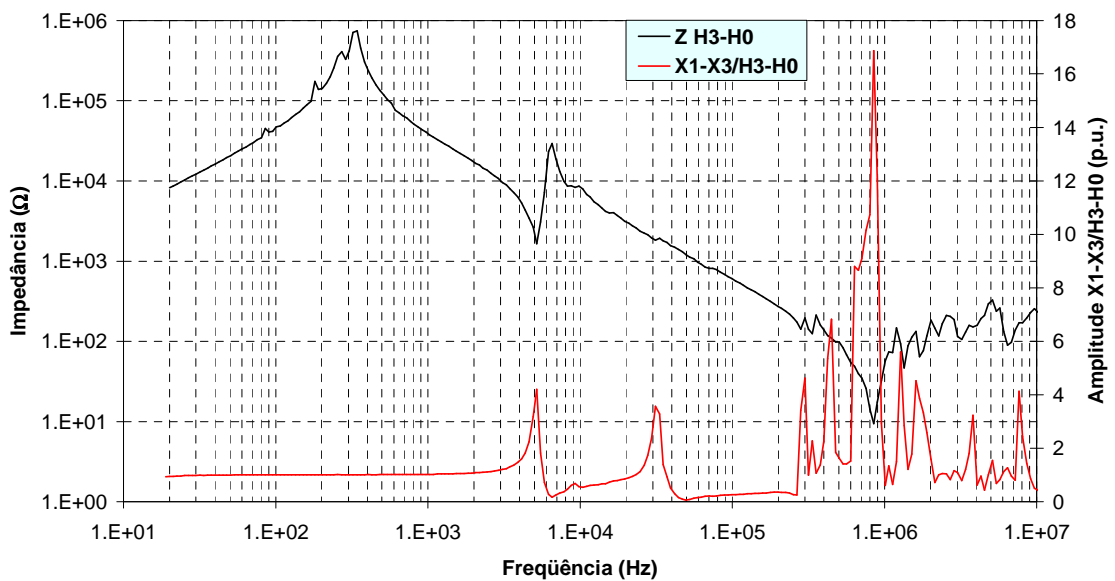
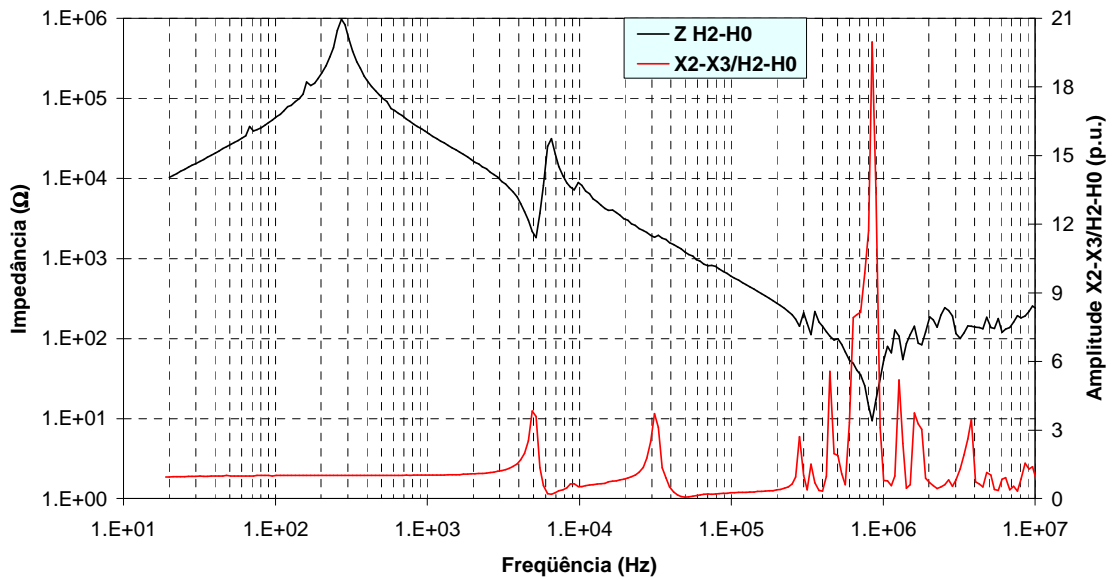
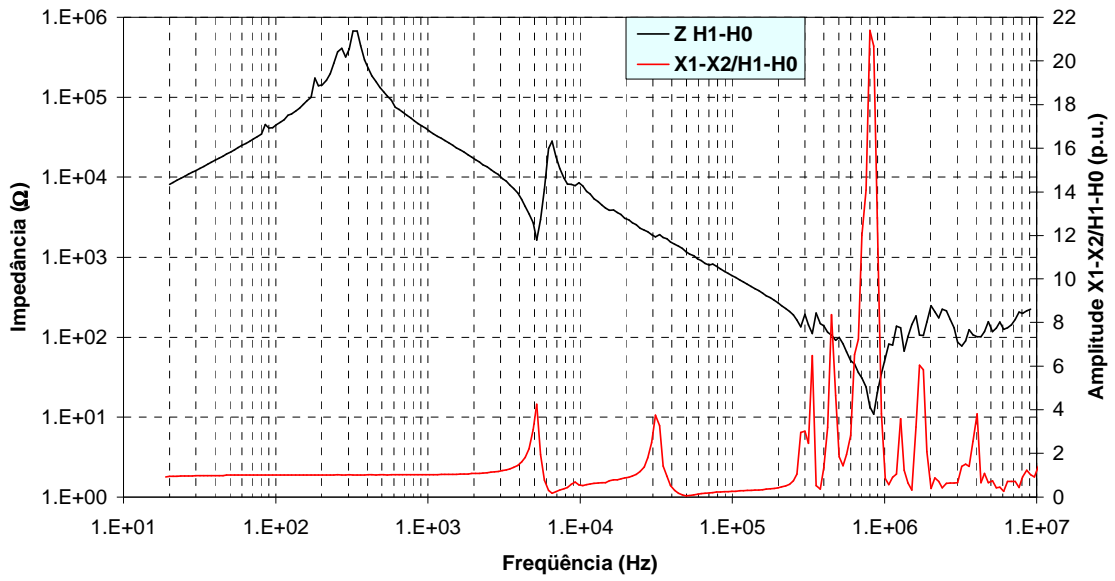
A partir das definições das técnicas no domínio da frequência, mostrando-se a relação de tensão e as curvas de Impedância Terminal, algumas comparações dos detalhes desses dois tipos de ensaios podem ser analisadas.

Como a Resposta em Frequência foi realizada através da relação de tensão entre dois enrolamentos, quanto maior a impedância vista através destes enrolamentos menor a transferência de tensão entre eles. Uma menor impedância (atenuação no ensaio de Impedância Terminal) se traduz em ressonâncias no ensaio de Resposta em Frequência, provocando grandes relações de tensão. Ou seja, os pólos da curva de Resposta em Frequência ocorrem na mesma frequência que os zeros na curva de Impedância Terminal.

Na Figura 2.11 são mostradas as comparações entre as curvas de Impedância Terminal e de Resposta em Frequência nos três enrolamentos de um transformador trifásico. Aplicação no enrolamento de alta tensão e medição no enrolamento de baixa tensão, no caso da Resposta em Frequência. A Impedância Terminal foi medida no enrolamento de alta tensão, mantendo-se os outros enrolamentos em aberto.

Nas frequências iniciais a curva de Resposta em Frequência não é sensível às variações da curva de Impedância Terminal. A variação na curva de Resposta em Frequência ocorre a partir de 1 kHz, onde aparecem diferenças nas impedâncias de cada enrolamento, determinando a região de influência dos enrolamentos. A partir desta frequência a curva de Resposta em Frequência varia de acordo com a de Impedância Terminal, onde os mínimos da curva de Impedância Terminal se traduzem nas ressonâncias da curva de Resposta em Frequência.





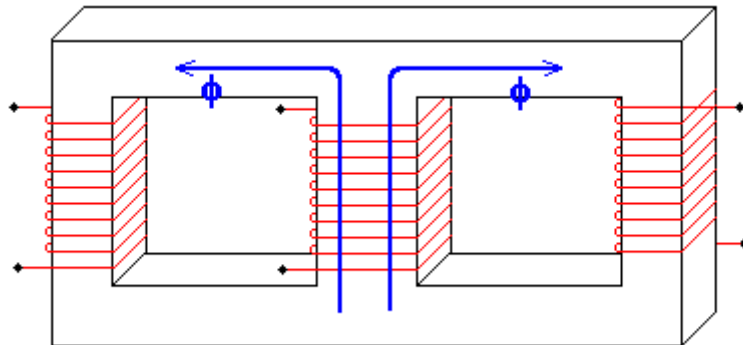
**Figura 2.11: Comparação entre Resposta em Frequência e Impedância Terminal**

A função de transferência de um transformador é uma equação de dois polinômios, assim como o da Equação 2.4:

$$H = \frac{a \cdot S^2 + b \cdot S + c}{a' \cdot S^2 + b' \cdot S + c'} \quad (2.4)$$

A ressonância desta função de transferência ocorre nas raízes destes polinômios. As raízes do denominador ou pólos da função são responsáveis por uma diminuição no ganho, ou seja, uma atenuação na curva de Resposta em Frequência, causando uma ressonância na mesma frequência na curva de Impedância Terminal. As raízes do numerador ou zeros da função provocam um efeito contrário, ou seja, uma ressonância na Resposta em Frequência e uma atenuação na curva de Impedância Terminal.

Na Figura 2.11 pode-se notar que o primeiro máximo da curva de Impedância Terminal possui uma dupla ressonância em X1-X0 e X3-X0, e em X2-X0 isto não ocorre. Este fato pode ser explicado pela geometria do transformador trifásico exemplificado na Figura 2.12, onde o fluxo magnético que circula o núcleo percorre caminhos de comprimentos diferentes, fazendo com que esta primeira ressonância fique duplicada nas fases laterais, o que não ocorre com equipamentos monofásicos.



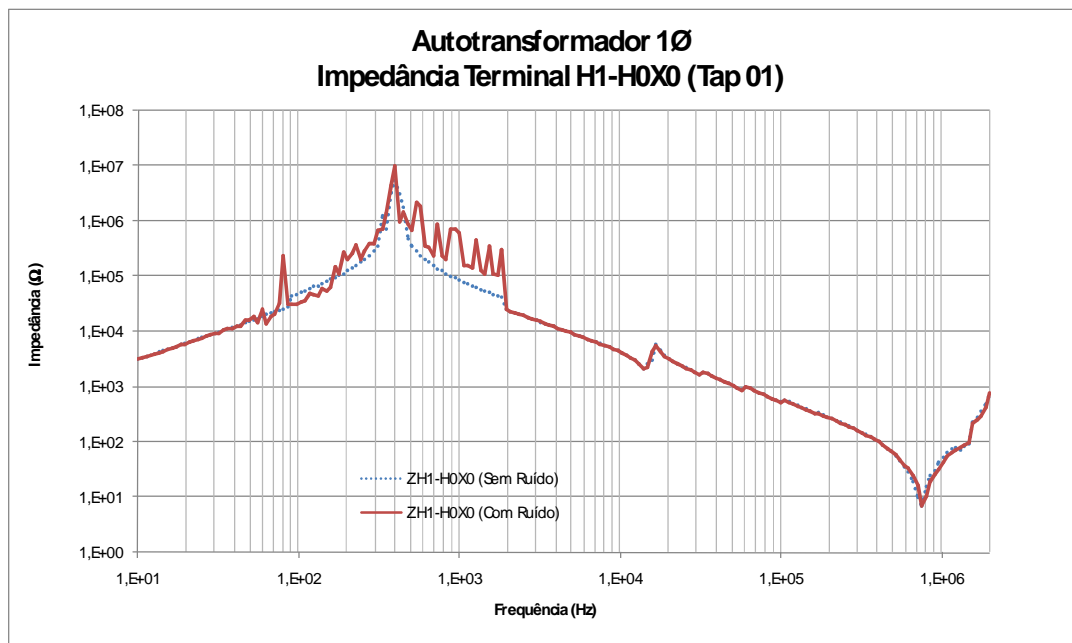
**Figura 2.12: Fluxo magnético em transformador trifásico**

Devido a esta simetria entre enrolamentos, as fases laterais de um transformador trifásico possuem as curvas bem semelhantes, se diferenciando da fase central.

## 2.6 Cuidados na Medição

Freqüentemente são verificadas dificuldades nas medições em campo, o que acontece devido às interferências eletromagnéticas causadas por equipamentos energizados nas proximidades, no caso da realização desses ensaios em subestações. Estas interferências podem inviabilizar ou mascarar as medições, devendo-se ter cuidado ao analisar comparações entre equipamentos ensaiados no campo ou na fábrica, por exemplo.

A Figura 2.13 exemplifica uma espécie de ruído que interferiu parcialmente nas medições de impedância, causando variações na faixa das baixas frequências. Neste caso este ruído pode ser facilmente identificado, mas em alguns casos as interferências podem ser confundidas com medições, induzindo a análise equivocada de que houve alguma alteração interna ao equipamento.

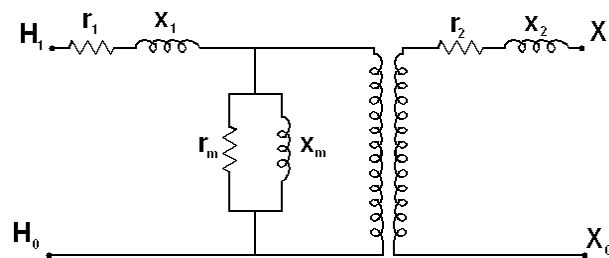


**Figura 2.13: Medição de Impedância Terminal com interferências**

Outra questão que afeta as medições em subestações é o efeito do fluxo residual. Equipamentos que foram desenergizados a pouco tempo ou estão sujeitos a tensões induzidas por equipamentos próximos podem apresentar um fluxo residual em seu núcleo que interfere ou distorce as medições, podendo amplificar ou atenuar as curvas ao longo da frequência.

Desta forma é coerente minimizar ou anular a influência do núcleo nas medições, diminuindo o efeito de alguns desses ruídos. Isto pode ser feito curto-circuitando alguns ou todos os terminais não envolvidos nas medições.

Quando a medição é feita com os terminais dos enrolamentos não envolvidos em aberto é medida praticamente a impedância de magnetização, pois o valor da impedância de magnetização é bem maior do que a de dispersão. Quando a medição é realizada com os outros terminais em curto, mede-se basicamente a impedância de dispersão [2]. Isto pode facilmente ser verificado através da modelagem do transformador para ensaios de circuito aberto e curto-circuito da Figura 2.14.



**Figura 2.14: Circuito equivalente do transformador para ensaios de circuito aberto e curto-circuito**

onde  $r_1$  e  $r_2$  são as resistências de dispersão dos enrolamentos de alta e baixa tensão respectivamente e  $x_1$  e  $x_2$  são as reatâncias de dispersão.  $r_m$  e  $x_m$  são respectivamente as resistências e reatâncias de magnetização.

Essa medição com os outros enrolamentos em curto-circuito minimizam o efeito do núcleo, o que causa alterações nas suas curvas no domínio da frequência. Provocando um deslocamento à direita na região de baixas frequências e preservando o restante da curva.

Outra questão que afeta bastante as medições são os cabos utilizados para conexão dos equipamentos às buchas dos transformadores. Como estes ensaios medem basicamente as indutâncias e capacitâncias do equipamento, traduzindo-se em diversas frequências de ressonância, qualquer indutância ou capacitância inserida no sistema afetará sua resposta no domínio da frequência.

Portanto é necessária a utilização de cabos que não acrescentem indutâncias ou capacitâncias ao sistema. Utilizam-se atualmente fitas metálicas em vez de cabos, pois

estas fitas diminuem os efeitos indutivos produzidos pelos cabos. É notado também que o posicionamento e o comprimento destas fitas também interferem nas medições, devendo-se sempre realizar medições padronizando estas conexões.

É importante ressaltar que como estes ensaios são utilizados na maioria das vezes de forma comparativa é extremamente importante que as medições em diversas fases da vida útil de um equipamento sejam feitas nas mesmas condições, padronizando-se a forma de medição adotada e evitando ao máximo a presença de interferências.

## **2.7 Conclusões**

As técnicas no domínio da frequência são bem sensíveis às características construtivas do equipamento, sendo bastante úteis para verificar problemas internos aparentemente imperceptíveis.

Para a identificação de defeitos através das técnicas no domínio da frequência é necessária a comparação de medições através da utilização de um misto entre as técnicas mostradas, explorando a potencialidade de cada uma.

Verifica-se a importância de se observar as condições do ensaio de modo a se evitar os problemas nas medições, o que pode inviabilizar as comparações.

Para a utilização das técnicas é importante a comparação das medições realizadas em diversas fases da vida útil do equipamento. Na ausência de medições anteriores, podem ser utilizadas medições em transformadores semelhantes, pois as curvas no domínio da frequência são bem parecidas. Além disto, as curvas das fases laterais também podem ser comparadas devido à característica da simetria entre essas fases. As diferenças observadas entre as medições comparadas podem ser indicio de um dano interno ao equipamento, devendo ser investigados através de outras técnicas e em seguida pode-se fazer um exame detalhado através da desmontagem do equipamento.

# Capítulo 3

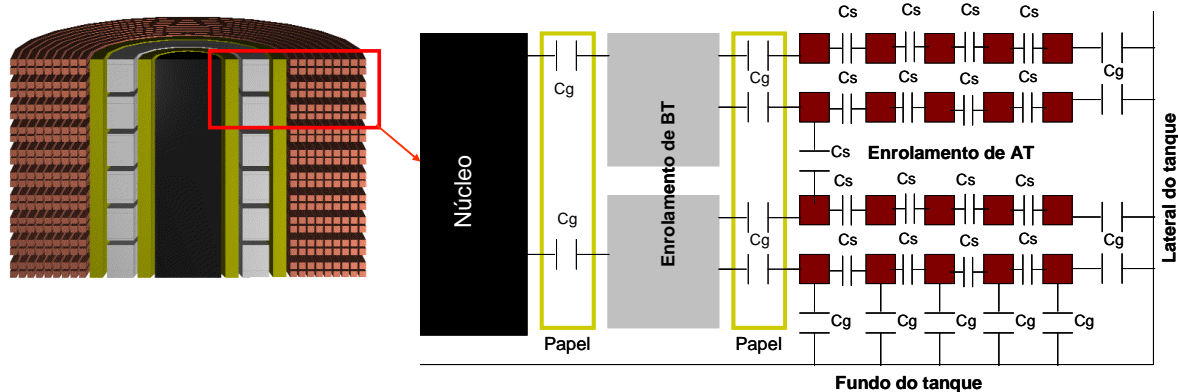
## Avaliação de Transformadores

### 3.1 Introdução

A avaliação de transformadores de potência estudada neste trabalho se baseia na identificação de ressonâncias e anti-ressonâncias naturais do equipamento. Tem a intenção de se correlacionar com os deslocamentos geométricos dos enrolamentos, curtos-circuitos e outros defeitos frequentes, devido a estes ensaios serem sensíveis a alterações que ocorram nos parâmetros dos enrolamentos, núcleo, isolamento elétrico, ligações internas ao tanque e buchas.

Com o envelhecimento natural dos transformadores, a vibração inerente ao equipamento energizado causa efeitos cumulativos na isolação do enrolamento, acarretando em redução significativa da pressão de compressão e uma perda da suportabilidade a curtos-circuitos. Estes afrouxamentos entre as bobinas e enrolamentos podem ser traduzidos em uma mudança de seus parâmetros geométricos. Ao longo de sua vida útil estes equipamentos também estão susceptíveis a vários esforços elétricos como altas tensões de curta duração induzidas em seus enrolamentos, provocando curtos-circuitos em suas isolações, deteriorando-as. Estas falhas de natureza mecânica ou elétrica se traduzem em mudanças em sua impedância e relações de tensão ao longo da frequência. Com isso, a integridade do equipamento pode ser analisada de acordo com as mudanças evidentes em sua assinatura no domínio da frequência.

O transformador pode ser modelado como um conjunto de indutâncias e capacitâncias devido ao seu aspecto construtivo. Os enrolamentos estão energizados com tensões diferenciadas devido à relação nominal do transformador, enquanto que o núcleo e o tanque estão aterrados, causando o efeito capacitivo entre os enrolamentos, tanque e núcleo. Esta formação capacitiva está mostrada na Figura 3.1.



**Figura 3.1: Exemplo da malha de parâmetros geométricos do transformador**

A Figura 3.1 mostra um desenho equivalente a um transformador, exibindo apenas um dos enrolamentos de alta e baixa tensão. Ao lado, através da amplificação da figura, pode-se ver uma malha complexa de capacitâncias entre as partes do equipamento. A capacitância para o tanque, núcleo e entre enrolamentos é definida como Capacitância Geométrica ( $C_g$ ), e a capacitância entre as espiras de um mesmo enrolamento foi definida como Capacitância Série ( $C_s$ ).

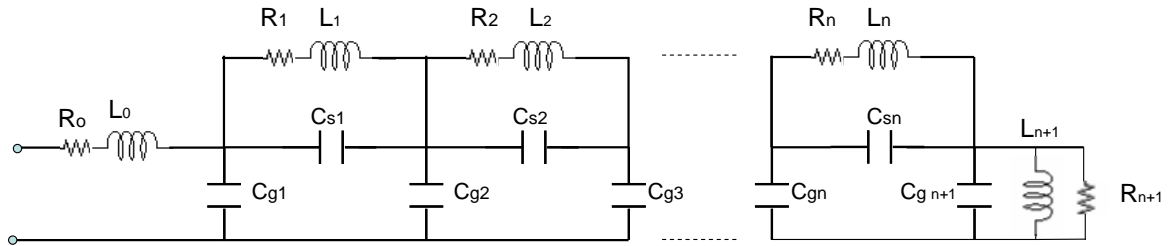
Devido ao efeito indutivo de seus enrolamentos e os acoplamentos entre eles também pode ser definida uma indutância ( $L$ ) ao longo de suas espiras.

Esta malha de capacitâncias e as indutâncias inerentes aos enrolamentos variam ao longo da geometria do transformador, o que ocasiona as várias frequências de ressonância características das curvas no domínio da frequência. Esta malha de elementos mostrada pode ser estudada matematicamente ao simplificar este circuito geometricamente complexo em um circuito equivalente de parâmetros concentrados.

Este circuito equivalente é fundamentado no modelo de parâmetros distribuídos utilizado para modelar as linhas de transmissão longas. Desta forma é possível analisar o comportamento do transformador ao longo das frequências. Esta técnica de representação do transformador de potência através de parâmetros elétricos distribuídos já foi bem estudada e aperfeiçoada na literatura em [1], [2], [3] e [6] e não será desenvolvida novamente neste trabalho.

Esta forma de modelagem equivale ao transformador, com suas bobinas distribuídas em vários PIs ( $\Pi$ ), ou seja, definida como Capacitância Série ( $C_s$ ) a capacitância entre duas espiras ou bobinas, a indutância ( $L$ ) e resistência ( $r$ ) ao longo destas e a capacitância entre enrolamento e tanque ou entre enrolamentos, definida

como Capacitância Geométrica ( $C_g$ ), de forma a representar os acoplamentos magnéticos entre estruturas adjacentes. O modelo de  $\Pi$  utilizado está mostrado na Figura 3.2.



**Figura 3.2: Circuito equivalente de parâmetros distribuídos do transformador**

Através deste circuito todas as capacitâncias paralelas, ou seja, capacitância para o tanque, enrolamento adjacente e núcleo, estão representadas por  $C_g$  de forma a simplificar o circuito ao se calcular uma capacitância equivalente. As perdas no cobre neste modelo estão representadas por resistores em série com as indutâncias. O núcleo é modelado como uma indutância em paralelo com uma resistência, e é modelado pelas resistências e indutâncias de magnetização.

## 3.2 Regiões das Curvas no Domínio da Frequência

A seguir serão estudados os tipos de falhas ou alterações em transformadores de potência e sua correlação com a região afetada das curvas. Na literatura [1], [2], [3] e [6] são encontradas várias conclusões com relação a estas regiões das curvas. Algumas destas conclusões estarão relacionadas neste tópico.

A região de baixas frequências compreende os defeitos de origem indutiva e caracteriza os curtos-circuitos (defeitos de origem elétrica) enquanto a região das altas frequências corresponde aos de origem capacitiva que são os defeitos de origem mecânica.

Os defeitos frequentes que ocorrem com os transformadores de potência podem ser correlacionados com alterações nos parâmetros do circuito equivalente. Estes estão correlacionados através da Tabela 3.1 [2].



**Tabela 3.1: Correlação entre os principais tipos de falha e o parâmetro alterado**

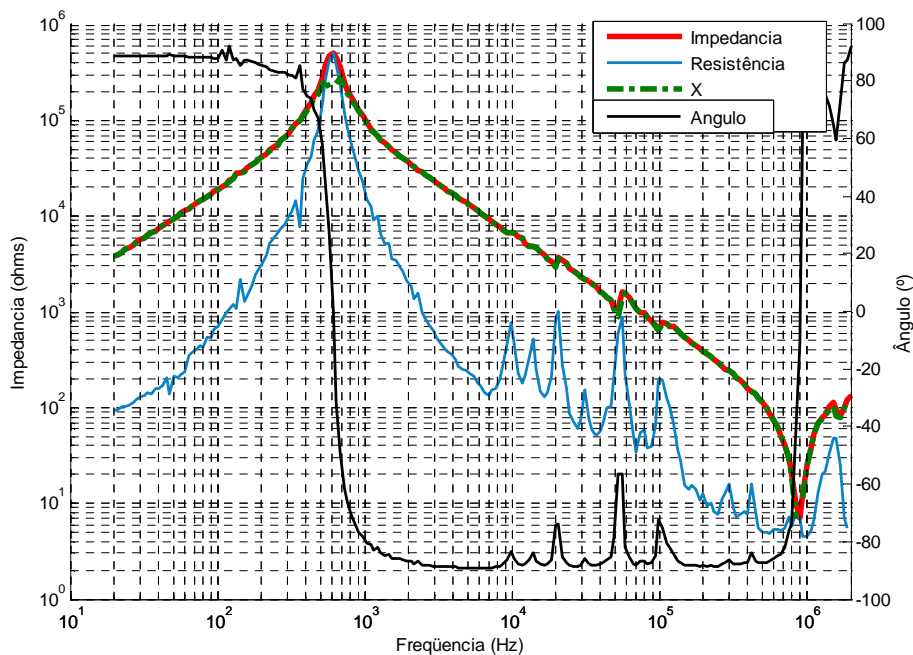
Tipos de falha	Parâmetro alterado
Deformação nos enrolamentos; Afundamento local; Curtos-circuitos entre enrolamentos ou entre espiras;	Indutância
Movimento nos enrolamentos; Encurvamento devido a esforços mecânicos; Alterações no óleo isolante ou no papel;	Capacitância Geométrica
Envelhecimento da isolamento; Perda de pressão entre enrolamentos;	Capacitância Série

De forma a verificar a contribuição da resistência, da reatância indutiva e capacitiva presentes na curva de Impedância Terminal foram feitas algumas simulações.

A curva de Impedância Terminal é composta de módulo e ângulo ( $|Z| \angle \theta$ ). Transformando para a forma retangular temos a Equação 3.1:

$$|Z| \angle \theta = R + jX \quad (3.1)$$

onde X é a composição das reatâncias capacitivas e indutivas.



**Figura 3.3: Curva de Impedância Terminal, resistência e reatância**

A partir destes pontos compostos de resistência e impedância podem-se traçar os gráficos relativos a resistência e reatância calculadas, conforme a Figura 3.3. Nesta figura é utilizado o gráfico de Impedância Terminal e são traçados em conjunto os valores de resistência e reatância.

Pode-se verificar que a resistência varia bastante ao longo da frequência, chegando a um máximo por volta de 1 kHz. Isto acontece porque na ressonância a reatância indutiva é igual à reatância capacitiva, o ângulo passa por zero e a curva fica somente resistiva, deixando a resistência igual ao módulo da impedância.

Quando o ensaio é realizado em determinado enrolamento com o correspondente em curto-circuito verifica-se a influência da impedância de dispersão. Ou seja, a impedância de magnetização, que é a representação do núcleo, tem seus efeitos minimizados. A Figura 3.4 exhibe a diferença entre as curvas de impedância nos dois casos mencionados, terminal correspondente em aberto e em curto-circuito.

Verifica-se neste caso que a região bastante afetada pelo curto-circuito é a região das baixas frequências, portanto ao se notar alterações nessa faixa de frequências pode-se suspeitar de alterações ou deslocamentos físicos do núcleo em relação ao tanque e enrolamentos.

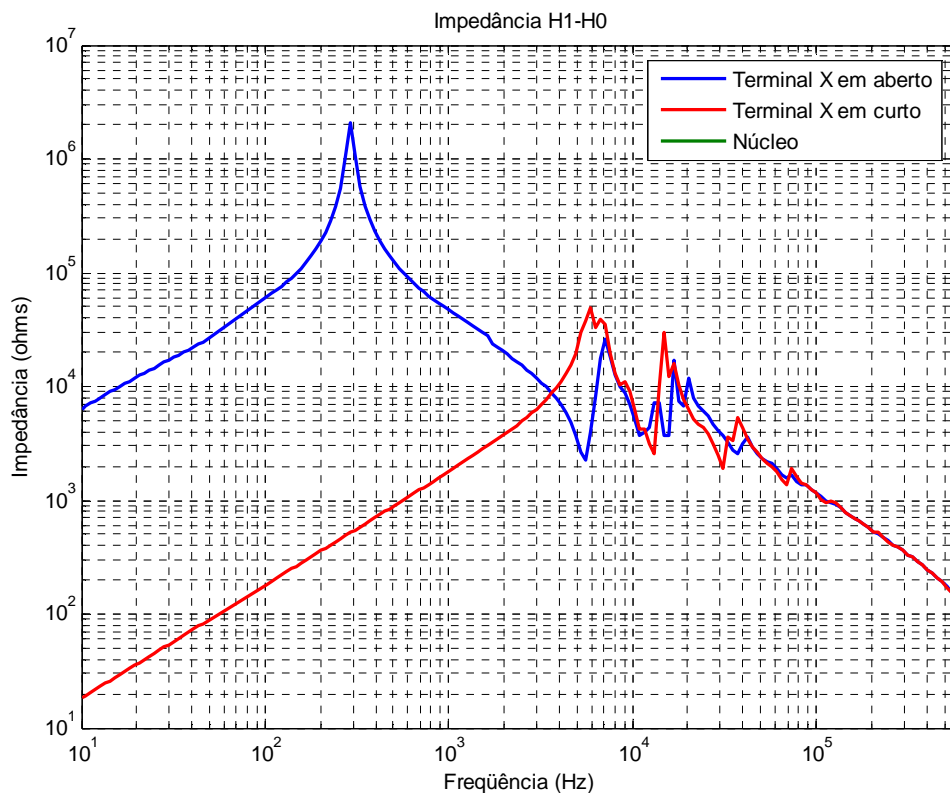
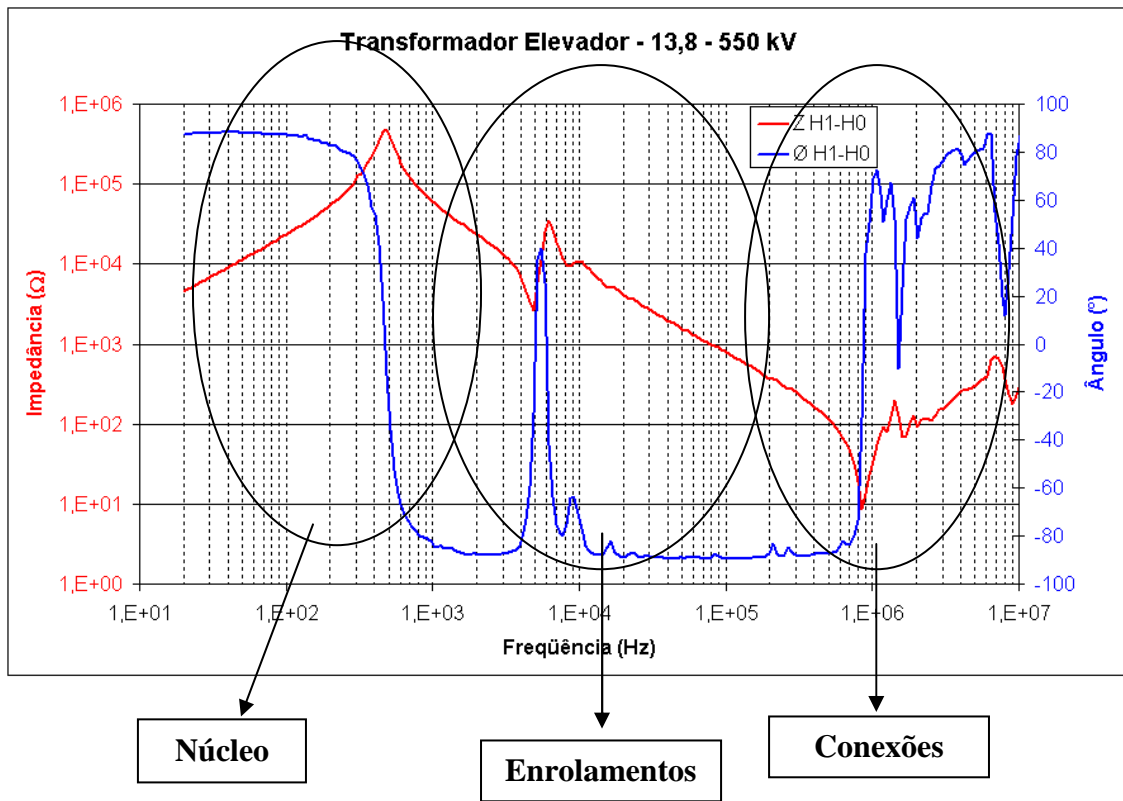


Figura 3.4: Curvas de Impedância Terminal do enrolamento de alta tensão

Como visto em [7], as conexões dos transformadores como as buchas, cabos de conexão, etc. influenciam as regiões das altas frequências. Por sua vez, os enrolamentos influenciam bastante a região de médias frequências. Portanto, podem-se subdividir as curvas em três faixas principais de frequência de acordo com a Figura 3.5.



**Figura 3.5: Principais faixas de frequência da curva de Impedância Terminal**

### 3.3 Conclusões

Na ocorrência de uma falha no sistema elétrico, ou uma descarga atmosférica, podem ser geradas altas correntes circulantes nas bobinas e conseqüentemente uma alta tensão entre elas podendo resultar em um curto-circuito entre as bobinas, danificando a sua isolação e modificando os parâmetros elétricos equivalentes. O movimento do núcleo também pode causar variações na malha dos parâmetros elétricos, causando variações nas suas curvas nas baixas frequências.

Qualquer deformação mecânica pode ser associada com a mudança das impedâncias do circuito equivalente, sendo detectadas através de mudanças em sua

função de transferência. As pequenas variações ao longo da sua Resposta em Frequência ou Impedância Terminal podem claramente evidenciar uma falha.

Verifica-se então que as falhas do equipamento assim como as alterações na sua geometria interna se correlacionam qualitativamente com a malha de impedâncias e capacitâncias inerente ao equipamento. Para explorar mais estas características buscou-se estudar uma modelagem matemática que possibilitasse estimar o circuito equivalente do transformador e assim pudesse traçar as suas curvas no domínio da frequência, possibilitando a correlação dos seus parâmetros alterados com as variações no gráfico. No próximo capítulo será explicada com detalhes esta modelagem estudada.

# Capítulo 4

## Modelo Utilizado

### 4.1 Introdução

O principal objetivo deste trabalho é correlacionar as curvas de Impedância Terminal e suas características ao longo da frequência com os parâmetros elétricos concentrados do circuito equivalente de um transformador de potência, buscando uma correlação com a distribuição física de seus componentes.

Através de um circuito equivalente que modele de forma aproximada o comportamento elétrico do transformador é possível simular falhas e comparar com os defeitos verificados nos equipamentos reais.

Para atingir este objetivo foi preciso escolher um método que pudesse ser utilizado para calcular estes parâmetros equivalentes do equipamento. Um método que se mostrou promissor ao calcular estes parâmetros concentrados foi desenvolvido em [1], onde foi utilizada a otimização de uma ou mais funções objetivo através do método do Gradiente Descendente.

Em [1] foram estimados os parâmetros equivalentes e suas curvas correspondentes através de uma função objetivo, otimizando-a através do módulo da impedância do enrolamento de alta ou baixa tensão. Também foi desenvolvido a partir de duas funções objetivo, onde foram utilizados o módulo e o ângulo da impedância de um dos enrolamentos. Para a otimização com quatro funções objetivo foram feitas as simulações utilizando os módulos das impedâncias dos enrolamentos de alta e baixa tensão e as Respostas em Frequência (relação de tensão) medidas do enrolamento de alta para o de baixa tensão e vice versa.

Este presente trabalho busca utilizar a metodologia do Gradiente Descendente otimizando quatro funções objetivo, mas utilizando os módulos e ângulos medidos do enrolamento de alta e baixa tensão. Embora este método não tenha sido desenvolvido neste presente trabalho, ele se diferencia do trabalho citado por utilizar os ângulos do

ensaio de Impedância Terminal ao invés do ensaio de Resposta em Frequência nesta otimização.

Esta metodologia estudada busca primeiramente estimar os parâmetros elétricos equivalentes do transformador de potência (síntese de circuitos) e, através destes parâmetros, estimar sua curva de Impedância Terminal equivalente através do Gradiente Descendente, tendo como base de comparação os dados provenientes de ensaios reais de Impedância Terminal de enrolamentos de alta e baixa tensão do transformador a ser modelado.

A seguir serão detalhados o método de otimização chamado Gradiente Descendente e a utilização deste de forma a utilizar as quatro funções objetivo: módulo da impedância do enrolamento do transformador e suas respectivas fases.

## 4.2 Método do Gradiente Descendente

Neste método a função objetivo a ser otimizada corresponde ao erro relativo quadrático médio proveniente da comparação entre os valores da função de transferência que descreve a impedância do transformador, determinado a partir do circuito equivalente estimado e as medições de Impedância Terminal.

Este é um método simples que consiste em determinar um mínimo local, buscando o ponto ótimo através de pequenos deslocamentos seguindo a direção do gradiente da função objetivo, baseando-se na propriedade do gradiente de indicar a direção de máximo crescimento da função.

Utiliza-se um processo iterativo de forma a minimizar o valor do gradiente, pois no ponto de mínimo o gradiente da função é nulo ou possui um valor numérico muito pequeno.

Os novos parâmetros dados pelo gradiente seguem a Equação 4.1.

$$\vec{x}^{k+1} = \vec{x}^k - \alpha \cdot \nabla F^k(\vec{x}) \quad (4.1)$$

onde  $\vec{x}^{k+1}$  é o valor da função procurada tendo o  $\vec{x}$  variado através de  $-\alpha \cdot \nabla F^k(\vec{x})$ , que segue o gradiente, ou seja, segue a derivada primeira da função objetivo a ser minimizada, tendo a forma da Equação 4.2.

$$\nabla F(\vec{x}) = \frac{\partial F}{\partial x_1}, \frac{\partial F}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial F}{\partial x_n} \quad (4.2)$$

onde  $F$  é a função objetivo a ser otimizada e  $x_i$  é o vetor de parâmetros variáveis.

O objetivo consiste em utilizar uma redução iterativa do valor do gradiente, de forma que  $\nabla F(\vec{x})$  fique próximo a zero, ou seja, igual a uma tolerância pré-estabelecida. Onde  $x$  é o cálculo na iteração seguinte, e se modificando proporcionalmente com a variação do gradiente da função objetivo.

A função do Gradiente Descendente é simples de ser implementada, apresenta uma alta velocidade de convergência e não requer muito esforço computacional durante o processo de otimização, mas este método requer uma aproximação inicial satisfatória para assegurar a convergência, pois em geral esse método converge sempre em um ótimo local.

### 4.3 Otimização dos Parâmetros

Para a utilização do método do gradiente descendente para calcular os parâmetros elétricos de um transformador foi utilizado quatro funções objetivo que devem ser minimizadas. Será utilizada a função de transferência da curva de Impedância Terminal, tanto para o enrolamento de alta como para o de baixa tensão em conjunto com as medições de fase para ambos os enrolamentos, considerando uma faixa de frequências pré-definida.

Para esta otimização é utilizado o erro relativo quadrático médio que resulta da comparação entre os valores analíticos da função de transferência, determinada a partir do circuito equivalente estimado e as quatro medições provenientes dos ensaios reais. As quatro funções objetivo estão relacionadas nas Equações 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6.

$$F_{|z_h|} = \frac{1}{N_{|z_h|}} \sum_1^{n\omega} \varepsilon_{|z_h|}^2 \quad (4.3)$$

$$F_{|z_x|} = \frac{1}{N_{|z_x|}} \sum_1^{n\omega} \varepsilon_{|z_x|}^2 \quad (4.4)$$

$$F_{|\theta_h|} = \frac{1}{N_{|\theta_h|}} \sum_1^{n\omega} \varepsilon_{|\theta_h|}^2 \quad (4.5)$$

$$F_{|\theta_x|} = \frac{1}{N_{|\theta_x|}} \sum_1^{n\omega} \varepsilon_{|\theta_x|}^2 \quad (4.6)$$

Onde  $z_h$  e  $z_x$  são os módulos da Impedância Terminal do enrolamento de alta e baixa tensão respectivamente.  $\theta_h$  e  $\theta_x$  são as fases medidas no enrolamento de alta e baixa tensão deste mesmo ensaio de Impedância Terminal.  $N$  corresponde ao número de frequências consideradas e  $\varepsilon$  é o erro, que pode ser definido através das equações 4.7 e 4.8.:

$$\varepsilon_{|z|}(j\omega) = |Z(j\omega)| - |\tilde{Z}(j\omega)| \quad (4.7)$$

$$\varepsilon_{|\theta|}(j\omega) = |\theta(j\omega)| - |\tilde{\theta}(j\omega)| \quad (4.8)$$

Onde  $|Z(j\omega)|$  é o módulo do ensaio real de Impedância Terminal e  $|\theta(j\omega)|$  é a sua respectiva fase.  $|\tilde{Z}(j\omega)|$  é o módulo da curva de Impedância Terminal estimada através dos parâmetros equivalentes do transformador enquanto que  $|\tilde{\theta}(j\omega)|$  é a sua fase estimada. Para cada valor de frequência existe um módulo e fase medidos e estimados a fim de se calcular o erro correspondente.

Para o cálculo do método do Gradiente Descendente é necessário transformar estas quatro funções objetivo em uma função única, que seja a soma ponderada das quatro descritas anteriormente. Esta função multi-objetivo está definida na Equação 4.9.



$$F = \gamma_1 \cdot F_{|z_h|} + \gamma_2 \cdot F_{|z_x|} + \gamma_3 \cdot F_{|\theta_h|} + \gamma_4 \cdot F_{|\theta_x|} \quad (4.9)$$

Onde  $\gamma_i$  são coeficientes que deixam as funções objetivo nas mesmas ordens de grandeza, com a finalidade de dar o mesmo nível de importância no processo de otimização.

#### 4.4 Valores Iniciais

Essa formulação foi implementada em ambiente MATLAB® através de um algoritmo utilizando as propriedades do método do Gradiente Descendente. Este método converge sempre para um mínimo local, mas para isso é necessário que sejam utilizados valores iniciais coerentes, de forma a assegurar a convergência para o ponto esperado.

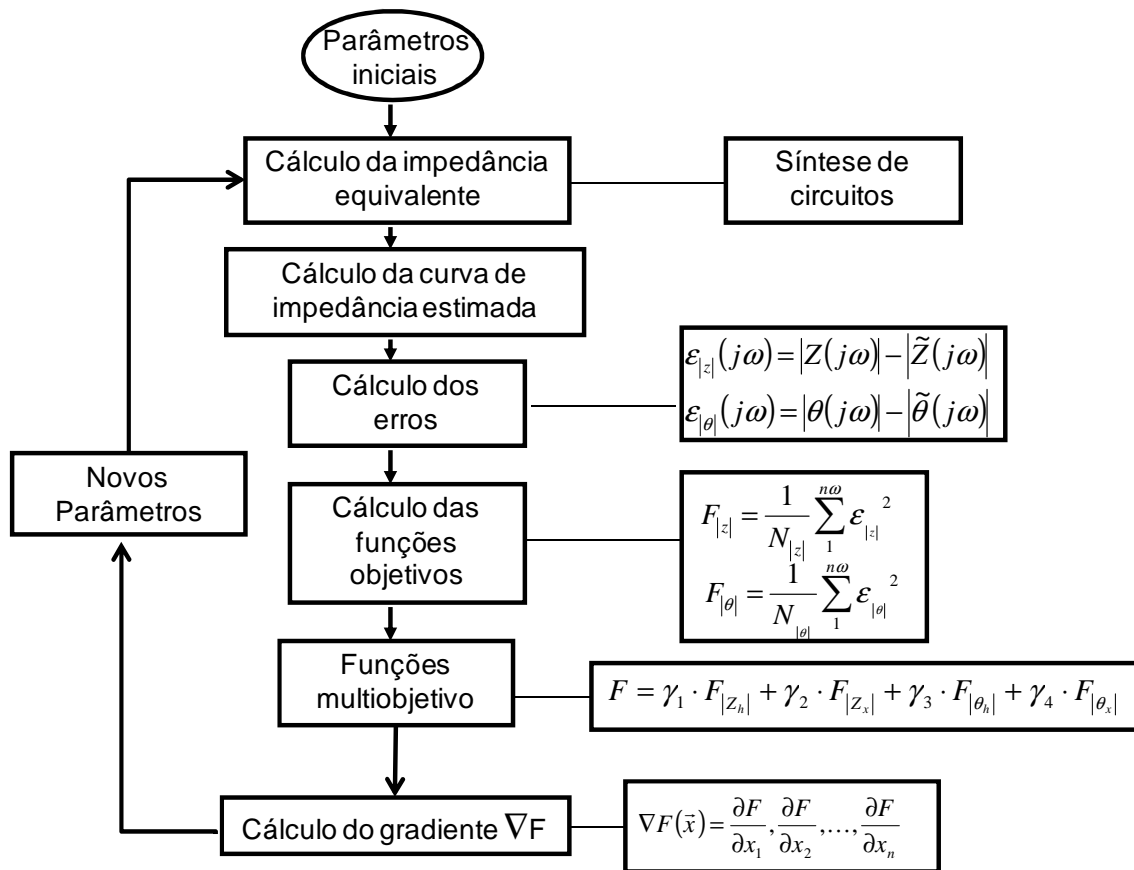
Na prática isto significa que os parâmetros iniciais devem ser escolhidos de tal forma a se manter as mesmas frequências de ressonância da curva a ser aproximada, não importando muito o valor da amplitude inicial. Assim o método estudado busca sempre manter as frequências escolhidas inicialmente, estimando o valor dos parâmetros para que a curva estimada seja o mais próximo possível da curva esperada.

#### 4.5 Conclusão

A representação de enrolamentos de transformadores de potência por parâmetros concentrados ou distribuídos é conhecida na literatura [2], [3] e [6], onde os parâmetros são estimados a partir de dados da geometria interna do equipamento, como distância entre seus componentes, a característica de seus materiais e a sua variação com a frequência.

Na metodologia estudada neste trabalho é possível estimar os parâmetros a partir do próprio ensaio no domínio da frequência, estimando seus valores em função da curva estimada e comparação com a resposta esperada.

A metodologia mostrada segue uma seqüência desde os valores iniciais, com o cálculo dos erros e das funções objetivo, produzindo resultados que realimentam os novos cálculos, de acordo com o fluxograma da Figura 4.1.



**Figura 4.1: Fluxograma do método utilizado**

A grande vantagem deste método é que é possível a modelagem dos demais enrolamentos simultaneamente, notando os efeitos em um enrolamento relativos ao outro, de modo a possibilitar resultados mais precisos verificando-se a interação entre os enrolamentos.

Esta modelagem ajudará na validação nas relações entre os parâmetros dos transformadores de potência e os principais tipos de falhas, assim como a implementação de defeitos de características mecânicas ou elétricas. Ajudará a realizar análises das falhas a partir de modificações no circuito equivalente, ou aplicação de defeitos em locais distintos do transformador, possibilitando uma análise de sensibilidade de acordo com a alteração dos seus parâmetros elétricos.

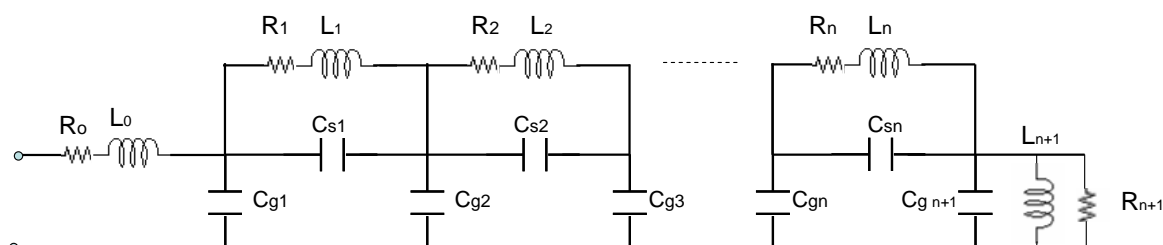
# Capítulo 5

## O Uso do Modelo para Prospecção de Defeitos Futuros

### 5.1 Introdução

Neste presente capítulo será apresentada a análise de sensibilidade estudada a partir de resultados consequentes da metodologia explicada no Capítulo 4, onde foi desenvolvido o método do Gradiente Descendente, na busca de simulações de defeitos.

O transformador utilizado nesta simulação foi modelado com 5 PIs no lado de alta tensão e 3 PIs no lado de baixa tensão, tendo seu núcleo referido no lado de alta, como na Figura 5.1:



**Figura 5.1: Circuito equivalente de parâmetros distribuídos do transformador**

Este número de PIs foi proposto devido à maior quantidade de ressonâncias da curva de Impedância Terminal do enrolamento de alta tensão em relação à curva do enrolamento de baixa tensão. Foi verificado também que um maior número de PIs aumentava bastante a quantidade de iterações necessárias e, portanto, o tempo computacional gasto para convergir a função. Este aumento não é justificável visto que não aumenta significativamente o nível de aproximação da curva desejada.

## 5.2 Parâmetros Equivalentes

Estes parâmetros equivalentes traduzem o comportamento de um transformador real estimado através do método do Gradiente Descendente, que estima os valores de resistência, indutância, capacitância série e capacitância geométrica dos enrolamentos, núcleo e conexões a partir das curvas de Impedância Terminal de alta e baixa tensão.

A seguir é mostrado de forma tabelada os valores dos parâmetros elétricos encontrados para cada PI, ou seja, para cada grupo de resistências, indutâncias e capacitâncias relativas a cada região do transformador.

Estes parâmetros concentrados estimados possuem a ordem de grandeza esperada para um transformador de grande porte e estão dispostos na Tabela 5.1.

Alguns trabalhos encontrados na literatura calculam valores com ordem de grandeza bem diferente da esperada, inclusive com valores negativos. Isto dificultaria na utilização de modelos elétricos fazendo o uso do circuito equivalente com estes parâmetros elétricos estimados.

**Tabela 5.1: Parâmetros elétricos estimados**

	Resistência		Indutância		Capacitância Série		Capacitância Geométrica	
<b>Enrolamento de alta tensão</b>	R <sub>1</sub>	0,89831 m Ω	L <sub>1</sub>	79,4 uH	C <sub>s1</sub>	989,42 mF	C <sub>g1</sub>	24,2464 mF
	R <sub>2</sub>	2,9536 m Ω	L <sub>2</sub>	0,94345 mH	C <sub>s2</sub>	499,703 mF	C <sub>g2</sub>	8,3309 mF
	R <sub>3</sub>	27,049 m Ω	L <sub>3</sub>	76,872 mH	C <sub>s3</sub>	253,7009 mF	C <sub>g3</sub>	0,68066 mF
	R <sub>4</sub>	91,15589 m Ω	L <sub>4</sub>	260,839 mH	C <sub>s4</sub>	104,4611 mF	C <sub>g4</sub>	2,92863 mF
	R <sub>5</sub>	69,1251 m Ω	L <sub>5</sub>	203,208 mH	C <sub>s5</sub>	203,9507 mF	C <sub>g5</sub>	0,60853 mF
<b>Núcleo</b>	R <sub>núcleo</sub>	2647,703 Ω	L <sub>núcleo</sub>	712,4561 H			C <sub>g núcleo</sub>	19,6037 mF
<b>Enrolamento de baixa tensão</b>	R <sub>1</sub>	37,0415 m Ω	L <sub>1</sub>	204,791 mH	C <sub>s1</sub>	257,606 mF	C <sub>g1</sub>	0,67003 mF
	R <sub>2</sub>	6,08779 m Ω	L <sub>2</sub>	22,2421 mH	C <sub>s2</sub>	1259,675 mF	C <sub>g2</sub>	3,44920 mF
	R <sub>3</sub>	11,0481 m Ω	L <sub>3</sub>	11,1623 mH	C <sub>s3</sub>	800,208 mF	C <sub>g3</sub>	1,71062 mF
<b>Conexões</b>	R <sub>conexões</sub>	1,762735 m Ω	L <sub>conexões</sub>	86,3 uH				

### 5.3 Curva Estimada

Os gráficos a seguir mostram o ensaio de Impedância Terminal de um transformador real (módulo e fase) em comparação com a curva de Impedância Terminal estimada, traçada a partir dos parâmetros mostrados na Tabela 5.1.

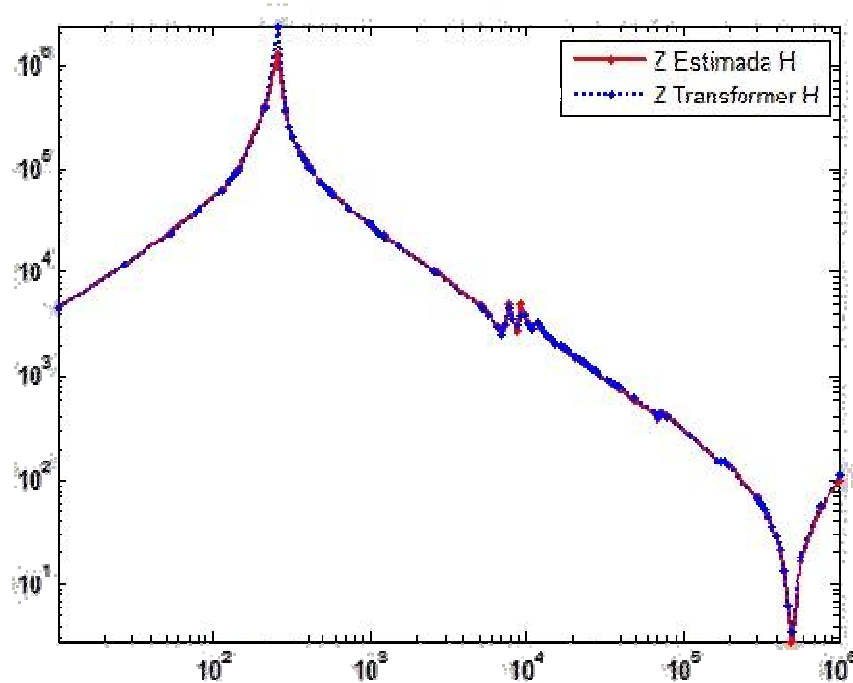


Figura 5.2: Módulo da Impedância Terminal do enrolamento de alta tensão

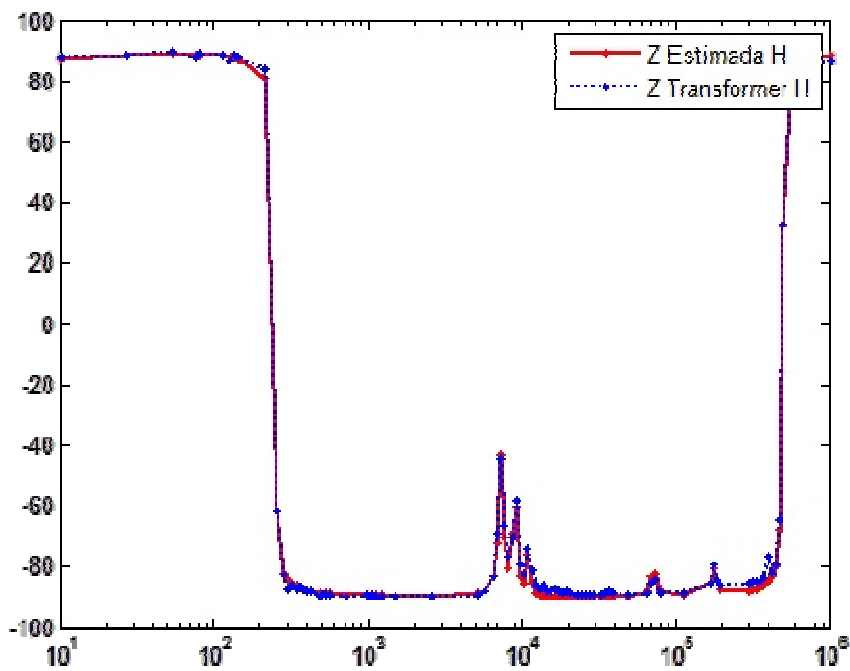


Figura 5.3: Fase da Impedância Terminal do enrolamento de alta tensão

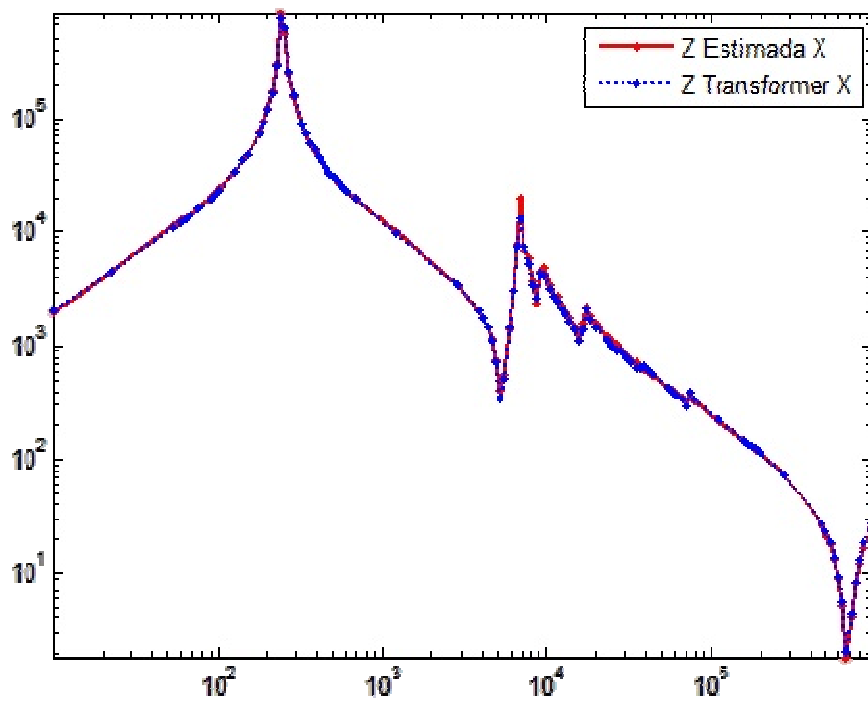


Figura 5.4: Módulo da Impedância Terminal do enrolamento de baixa tensão

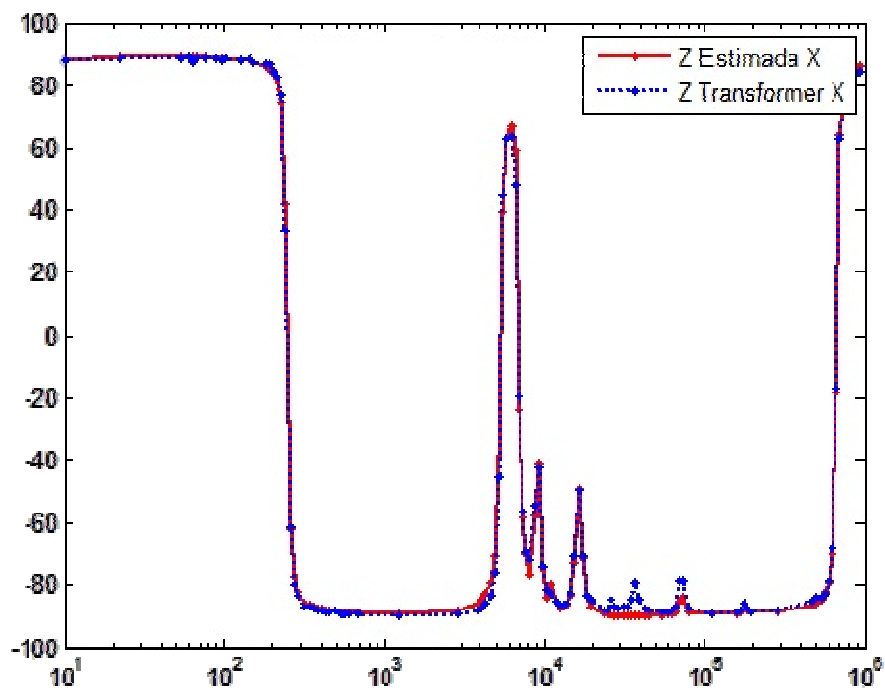


Figura 5.5: Fase da Impedância Terminal do enrolamento de baixa tensão

## 5.4 Regiões da Curva de Impedância

Através de uma curva de Impedância Terminal, podemos traçar regiões de influência de cada parte de um transformador, como visto no Capítulo 3. As baixas frequências são mais influenciadas pelo núcleo do transformador, enquanto que as médias frequências predominam os enrolamentos, assim como os efeitos de seus deslocamentos físicos. Nas altas frequências aparecem os efeitos principalmente das conexões (buchas ou circuito de medição).

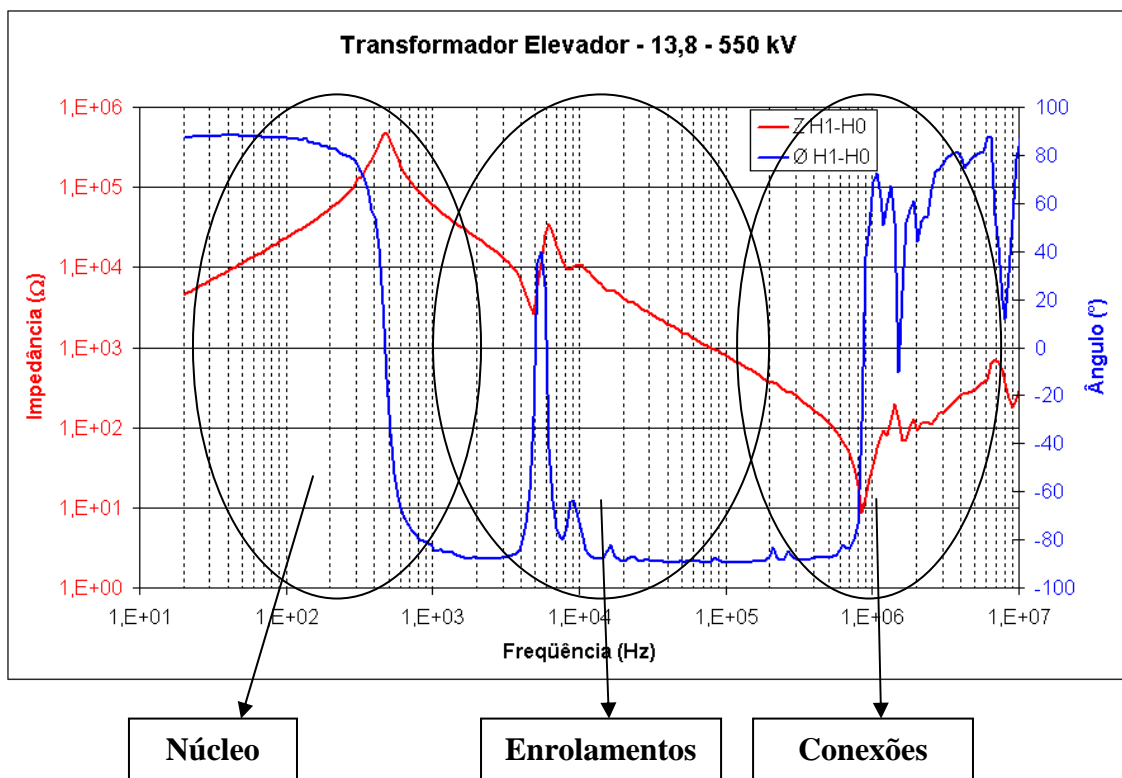


Figura 5.6: Principais faixas de frequência de um transformador

## 5.5 Análise de Sensibilidade

Para a análise de sensibilidade foram feitas variações em cada parâmetro elétrico do circuito equivalente do transformador e assim verificadas as diferenças causadas no gráfico estimado em relação ao ensaio real.

Podem-se associar os efeitos nas curvas com as variações das permissividades do material isolante (óleo, papel e presspan). Em geral a permissividade do óleo pode ser representada pela Capacitância Geométrica (capacitância para as laterais e fundo do tanque).

A permissividade do papel que isola as espiras pode ser representada pela alteração da Capacitância Série. O presspan que separa e isola os enrolamentos influencia nas Capacitâncias Série e Geométrica do circuito equivalente. Devido a isto pode ser variado  $C_s$  simulando efeitos de envelhecimento do papel.

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \quad \text{e} \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (5.1)$$

Na prática quando o transformador é transportado, ele encontra-se sem óleo isolante, preenchido apenas com ar sintético ou nitrogênio. Considerando essas condições e necessitando-se realizar um ensaio no domínio da frequência, é dada que a permissividade relativa é menor visto que  $\varepsilon_{rol} \cong 2.2$  e  $\varepsilon_{rar} = 1$ . Neste caso, a capacitância geométrica tende a diminuir.

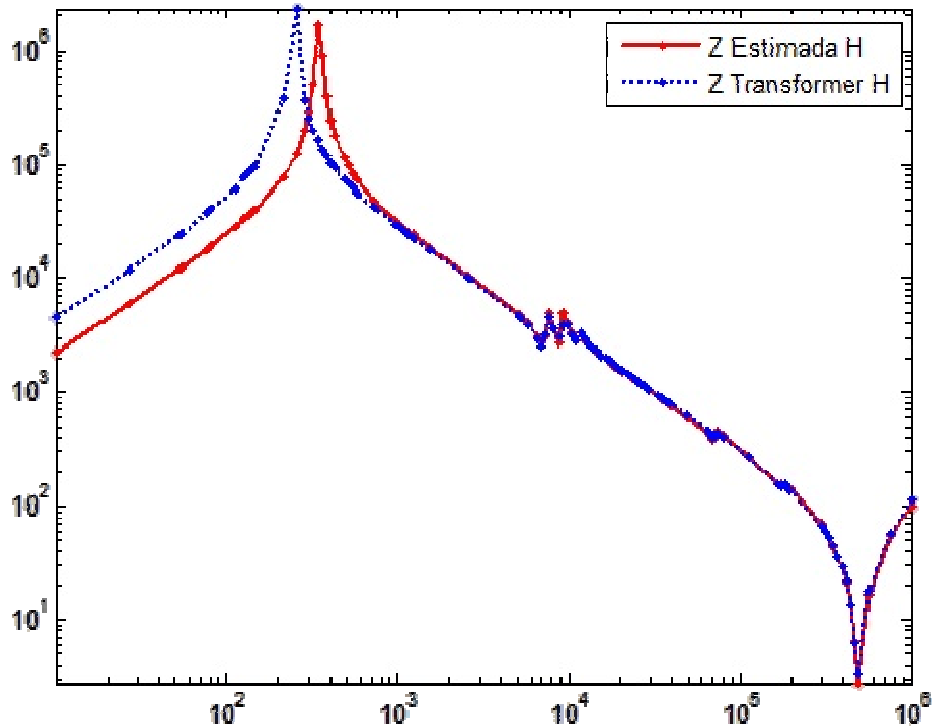
A curva estimada se deslocaria para a direita, aumentando suas frequências de ressonância. Isto é explicado pela Equação 5.2.

$$f_r = f \sqrt{\frac{\varepsilon_{rol}}{\varepsilon_{rar}}} \quad (5.2)$$

### 5.5.1 Núcleo

A indutância do núcleo estimada foi 712,46 H. O gráfico da Figura 5.7 foi obtido através da simulação feita reduzindo esta indutância do núcleo em 50%.



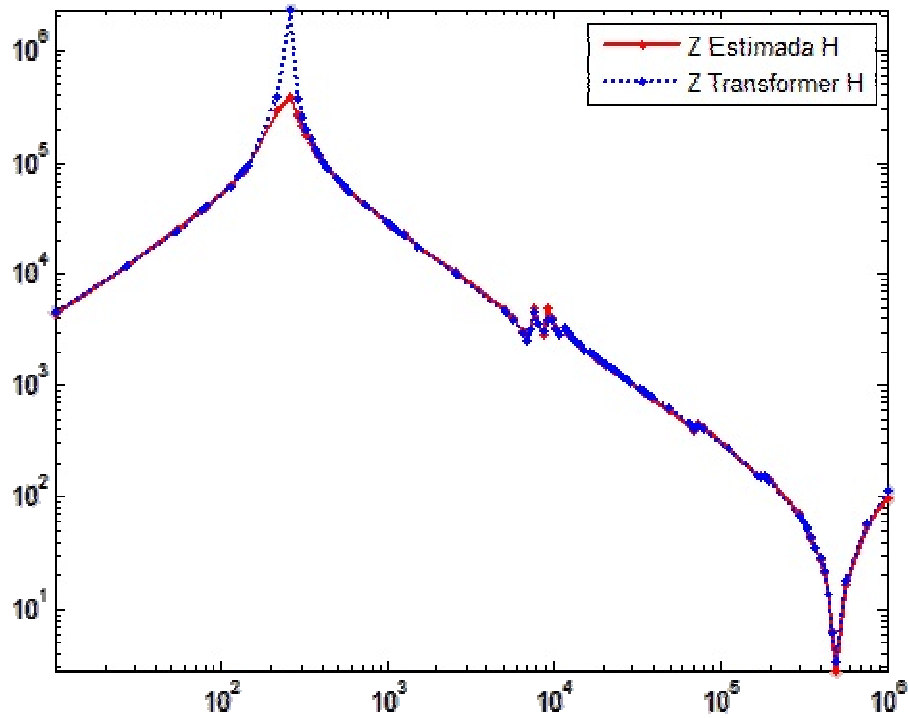


**Figura 5.7: Módulo da Impedância Terminal com a indutância  $L_{\text{núcleo}}$  em 50%**

Através deste gráfico pode-se demonstrar que a variação na indutância do núcleo afeta realmente a região de baixas frequências em torno da primeira ressonância do gráfico. Neste caso como foi reduzida a indutância, ocorreu um aumento da frequência de ressonância, pois esta frequência é inversamente proporcional ao valor da indutância.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5.3)$$

A resistência do núcleo foi alterada com o objetivo de se verificar os efeitos causados no gráfico e assim identificar a região da curva que é sensibilizada a partir desta alteração. A resistência foi alterada para 15 % de seu valor para que as alterações se tornassem perceptíveis.



**Figura 5.8: Módulo da Impedância Terminal com a resistência  $R_{\text{núcleo}}$  em 15%**

Percebe-se com esta curva que a resistência do núcleo provocou alterações apenas na amplitude da primeira ressonância da curva, região esta responsável pelos efeitos causados em alterações no núcleo.

### 5.5.2 *Conexões*

Variando-se a indutância equivalente das conexões de alta tensão, pode-se estimar a curva que responde a estas variações.

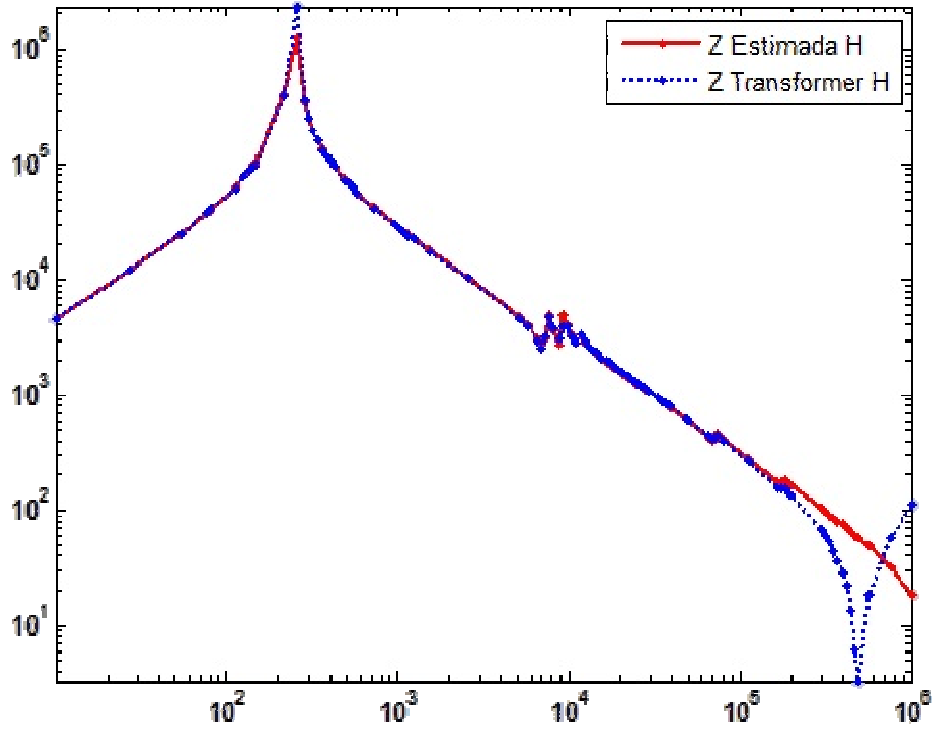


Figura 5.9: Módulo da Impedância Terminal com a indutância  $L_{\text{conexões}}$  em 10%

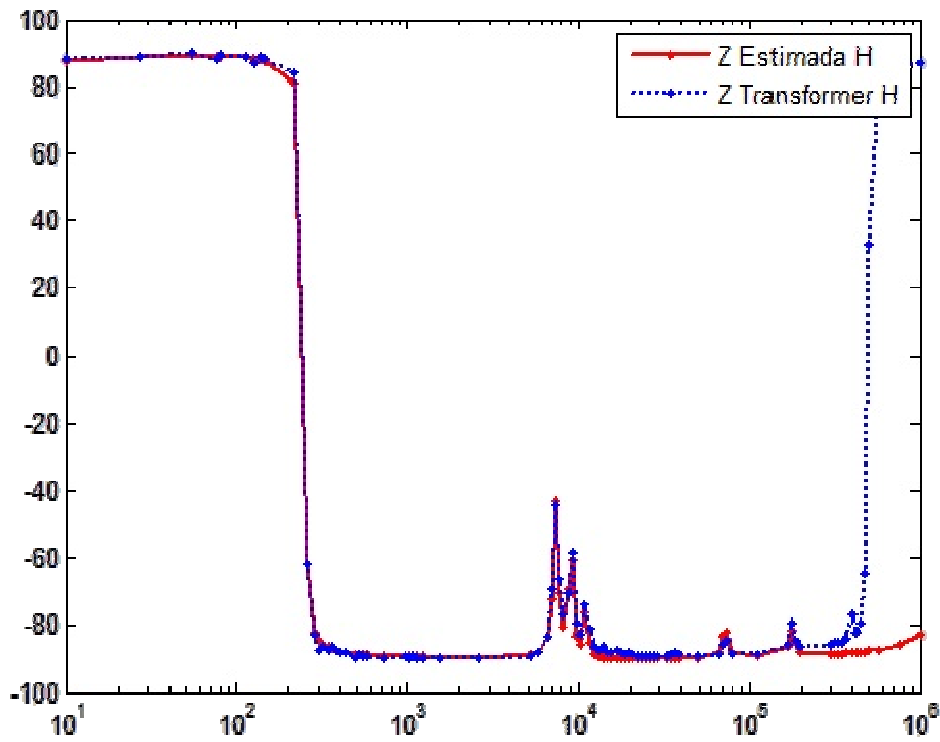


Figura 5.10: Fase da Impedância Terminal com a indutância  $L_{\text{conexões}}$  em 10%)

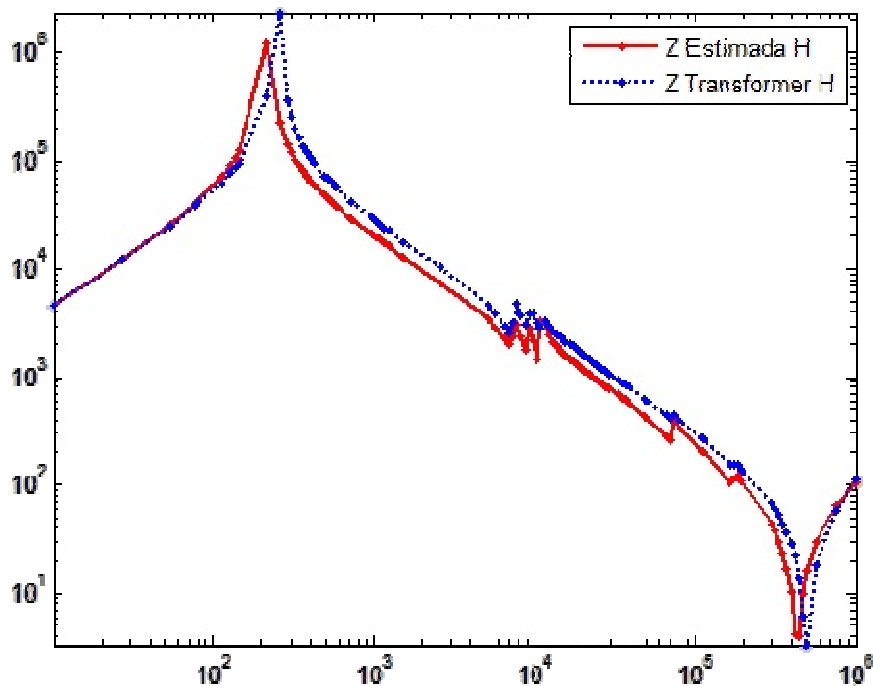
Com esta variação na indutância relativa às conexões do enrolamento de alta tensão pode-se perceber uma variação na região de alta frequência, tanto no módulo quanto na fase das curvas estimadas.

Como visto anteriormente, a região de alta frequência, em torno da última anti-ressonância, é responsável por modificações nas conexões dos enrolamentos, tais como buchas ou conexões com o equipamento utilizado no ensaio. Esta redução na indutância provocou um aumento na frequência da anti-ressonância, pois esta frequência é inversamente proporcional a indutância.

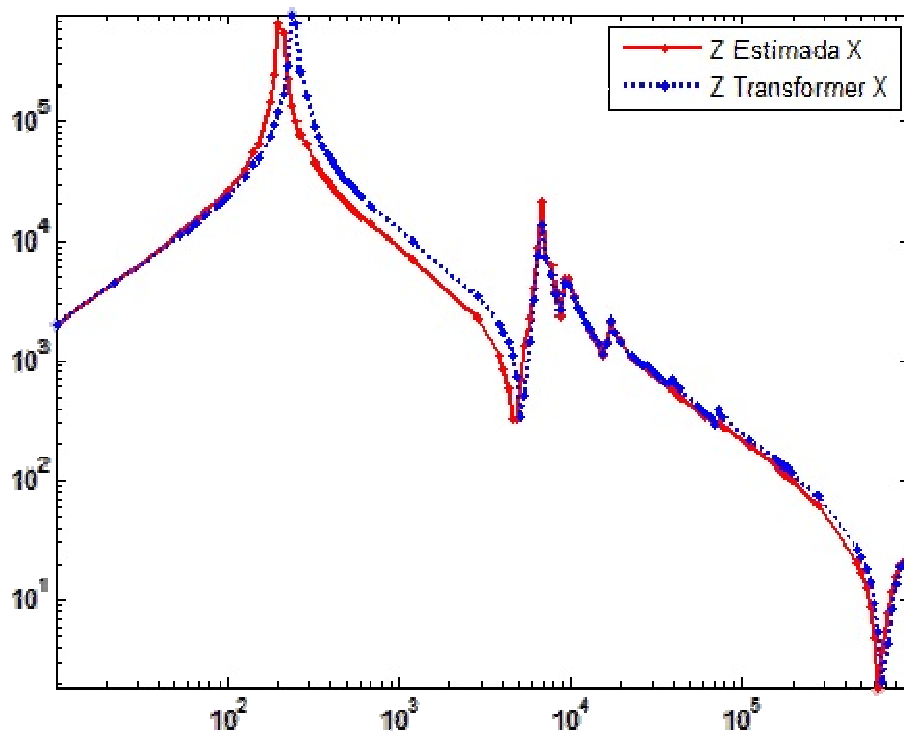
$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L(C_s + C_g)}} \quad (5.4)$$

### 5.5.3 Enrolamentos

Para a análise de sensibilidade do enrolamento do transformador, foi feita uma variação no valor de capacitância geométrica relativa ao PI de alta tensão próximo ao núcleo ( $C_{g4}$ ). Para este efeito foi aumentada esta capacitância de 9 vezes, o que fez causar alterações perceptíveis no gráfico das Figuras 5.11 e 5.12.



**Figura 5.11: Módulo da Impedância Terminal do enrolamento de alta tensão com a capacitância  $C_{g4}$  modificada**



**Figura 5.12: Módulo da Impedância Terminal do enrolamento de baixa tensão com a capacitância  $C_{g4}$  modificada**

Pode-se notar um deslocamento na frequência da curva de Impedância Terminal do enrolamento de alta e de baixa tensão. Mesmo que a variação desta capacitância tenha sido feita no enrolamento de alta tensão, verifica-se um deslocamento na curva de Impedância Terminal do enrolamento de baixa tensão devido a este efeito ser refletido para o lado de baixa.

É notado também que na curva de Impedância Terminal de alta tensão, onde foi feita a alteração da capacitância geométrica, ocorreu também uma variação da amplitude de toda a curva.

As perdas no cobre, ou seja, a resistência inerente aos enrolamentos é traduzida como o resistor em série com o indutor nos parâmetros concentrados relativos ao enrolamento. A variação destas resistências não provoca nenhum deslocamento da curva de Impedância Terminal, apenas uma atenuação na amplitude dos picos ressonantes.

## 5.6 Conclusões

A partir do modelo estudado foram realizadas simulações alterando os parâmetros elétricos do circuito equivalente de modo a entender o efeito que estes parâmetros causavam nas suas Respostas em Frequência. Estas simulações buscaram recriar defeitos práticos, buscando simulações que significassem situações reais de defeitos normalmente encontrados em um transformador de potência.

De acordo com as simulações de defeitos constata-se que parâmetros longitudinais (indutância e capacitância) afetam a curva de Impedância Terminal verticalmente, através da amplificação ou atenuação dos valores correspondentes aos pólos. Os parâmetros transversais como a capacitância geométrica modificam diretamente as frequências de ressonância, não influenciando tanto a amplitude dos pólos da curva de Impedância Terminal.

Estas medidas podem ser usadas como um método análise para detecção de defeitos elétricos e mecânicos do transformador através de uma larga escala de frequências.

# Capítulo 6

## Conclusões e Trabalhos Futuros

### 6.1 Conclusões

Os ensaios de Resposta em Frequência e Impedância Terminal são muito úteis para se avaliar a integridade dos transformadores de potência. Estes ensaios são bastante sensíveis a efeitos causados por deslocamentos internos e curto-circuito.

Os instrumentos baseados na medição de Resposta em Frequência (relação de tensão) e de Impedância Terminal ficam sujeitos a interferências eletromagnéticas principalmente em casos de medição no campo, onde estão presentes equipamentos energizados ligados ao sistema elétrico. Estas interferências podem causar erros e variações nas medições ou impossibilitar o ensaio ou a medição principalmente do ângulo. Estas questões dificultaram a realização deste trabalho, pois foram encontradas dificuldades em se conseguir curvas bem medidas e que não apresentassem nenhum ruído ou interferência e pudessem ser utilizadas com o modelo estudado.

Embora cada iteração seja realizada em um tempo relativamente pequeno (40 segundos em um Core2duo de 2,13 GHz), o número de iterações necessárias para se ter uma aproximação aceitável é muito grande. Isto faz com que esta rotina leve muitas horas para convergir até o resultado final, dificultando a análise de diferentes equipamentos. Para melhorar este tempo seria necessário diminuir o número de PIs utilizados, mas isto acarretaria uma diminuição na precisão dos dados calculados.

Os parâmetros estimados possuem uma ordem de grandeza esperada para um transformador de grande porte. De acordo com o circuito equivalente de parâmetros elétricos concentrados do transformador de potência é possível verificar o comportamento da curva de Impedância Terminal de um mesmo defeito simulado em diversas regiões do equipamento.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Buscando desenvolver ainda mais esta metodologia baseada em curvas no domínio da frequência e parâmetros elétricos equivalentes de um transformador de potência, alguns estudos poderiam complementar este presente trabalho.

Verificou-se a importância de se fazer uma aproximação de um transformador utilizando vários PIs para modelar tanto o enrolamento de baixa tensão quanto o de alta tensão, verificando a variação dos parâmetros elétricos para o enrolamento entre as conexões e o núcleo.

Validar também estes parâmetros elétricos calculados utilizando uma ferramenta de transitórios eletromagnéticos.

Utilizar o Gradiente Descendente de forma a otimizar mais funções objetivo correspondente às curvas de módulo da Impedância Terminal, ângulo e Resposta em Frequência para os dois enrolamentos do transformador.



# Referências Bibliográficas

- [1] ZAMBRANO, G. M. V., *Identificação de Parâmetros de um Circuito Equivalente de Transformadores de Potência*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- [2] MARTINS, H. J. A., *Diagnóstico de Transformadores de Potência através de Metodologias no Domínio da Frequência*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- [3] HERSZTERG, K. S., *Desenvolvimento de um Modelo Matemático para Enrolamentos de Transformadores – Uma Abordagem Analítica da Resposta em Frequência*. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- [4] COUTINHO, L. M. DE A., *Avaliação e Diagnóstico de Transformadores de Potência através da Resposta em Frequência e Impedância Terminal*. Projeto de Graduação, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [5] HERSZTERG, K. S., MARTINS, H. J. A. , CARNEIRO JR, S. “Analytical Approach of Frequency Response through a Mathematical Model of Transformer Windings“. *International Symposium on High Voltage Engineering ISH 2005*, Beijing, China, 25 a 29 de Agosto de 2005.
- [6] MENDES, J. C., *Redução de Falhas em Grandes Transformadores de Alta Tensão*. Tese de D.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 1995.
- [7] IEEE Draft Guide PC.57.149, 2008, “Use Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil Immersed Transformers”, March.

- [8] MARTINS, H. J. A., “Diagnóstico Integrado de Transformadores de Potência – Aplicação”. *XV SNPTEE*, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, Outubro de 1999.
- [9] BLUME L. F., BOYAJIAN A., CAMILLI G., LENNOX T. C., MINNECI S., MONTSINGER V. M., “*Transformer Engineering*”, 2<sup>a</sup> Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1951.
- [10] PAULINO, M., “Aplicações de Análise de Resposta em Frequência e Impedância Terminal para Diagnóstico de Transformadores”. *XIII ERIAC*, Puerto Iguazú, Argentina, 2009.
- [11] DE AGUIAR, R., TEIXEIRA JUNIOR, J. A., “Análise de Varredura de Resposta em Frequência em Transformadores: Aplicação no Campo”, *XX SNPTEE*, Recife, Brasil, 2009.