AVALIAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA ATRAVÉS DA RESPOSTA EM FREQÜÊNCIA E IMPEDÂNCIA TERMINAL

Escola Politécnica
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Leonardo Martins de Almeida Coutinho

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JANEIRO DE 2008

AVALIAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA ATRAVÉS DA RESPOSTA EM FREQÜÊNCIA E IMPEDÂNCIA TERMINAL

Leonardo Martins de Almeida Coutinho

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

_____

Sandoval Carneiro Júnior, Ph.D.
(Orientador)

_____

Helvio Jailson Azevedo Martins, D.Sc.
(Co-orientador)

_____

Ivan Herszterg, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JANEIRO DE 2008

COUTINHO, LEONARDO MARTINS DE ALMEIDA

Avaliação e Diagnóstico de Transformadores de Potência Através da Resposta em Freqüência e Impedância Terminal [Rio de Janeiro] 2008

VIII, 56 p. 29,7 cm (Escola Politécnica / UFRJ, Engenharia Elétrica, 2008)

Projeto Final (graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Resposta em Freqüência
2. Impedância Terminal
3. Diagnóstico de Transformadores

Aos meus pais, que estiveram ao meu
lado em todos os momentos e nos
quais sempre pude me espelhar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a toda minha família, que esteve presente ao meu lado me apoiando ao longo dessa jornada, principalmente ao meu pai Clécio Coutinho e a minha mãe Teresa de Fátima Martins de Almeida Coutinho que com muita dedicação me mostraram que a educação e os estudos são muito importantes na vida e me orientaram sempre a seguir o caminho correto. Agradeço também ao meu avô Ari de Almeida que muito cedo já tentava me passar o seu grande conhecimento e me ensinar os fundamentos da engenharia.

Agradeço também a minha namorada Tereza Cristina, que esteve ao meu lado durante grande parte da minha vida universitária, pela sua grande paciência, apoio e incentivo durante esta jornada acadêmica.

A todos os meus amigos, que apesar da minha ausência e falta de tempo, estiveram sempre ao meu lado.

A todos os meus colegas do CEPEL que, de uma forma ou de outra, ajudaram na elaboração desse projeto.

Ao engenheiro Helvio J. A. Martins pela sua paciência, orientação e ensinamentos, tornando possível o desenvolvimento e a conclusão desse trabalho.

Ao professor Sandoval Carneiro Junior pelos seus conselhos e dedicação ao me orientar nesse projeto.

Ao professor Ivan Herszterg pela disponibilidade e esforço em participar da banca examinadora desse projeto final.

Aos meus amigos de faculdade, pela amizade desenvolvida ao longo de toda esta caminhada acadêmica, principalmente pelo apoio nos momentos difíceis e incentivos na superação de todos os obstáculos.

Enfim, agradeço a todos que direta ou indiretamente tornaram e ainda tornam possível o meu desenvolvimento e crescimento profissional.

Resumo do Projeto Final apresentado a Poli/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista (Eng.º)

AVALIAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA ATRAVÉS DA RESPOSTA EM FREQÜÊNCIA E IMPEDÂNCIA TERMINAL

Leonardo Martins de Almeida Coutinho

Janeiro/2008

Orientador: Sandoval Carneiro Jr.

Co-orientador: Helvio Jailson Azevedo Martins

Departamento: Engenharia Elétrica

Os diagnósticos e a manutenção preventiva transformadores de potência tem sido um assunto de grande interesse para as empresas de energia elétrica. É muito importante o desenvolvimento de técnicas para detecção de falhas antes que causem problemas ou até acidentes, de forma a aumentar a vida útil do equipamento.

Este trabalho explora técnicas de diagnóstico no domínio da freqüência aplicadas a transformadores de potência, como resposta em freqüência e impedância terminal. Estes métodos de avaliação são sensíveis a alterações nas características elétricas dos equipamentos, provocadas por esforços mecânicos e elétricos.

No desenvolvimento do trabalho foram utilizados casos reais de transformadores que foram examinados pelo CEPEL. A partir disso se propõe algumas técnicas analíticas para auxiliar o diagnóstico das falhas.

Abstract of Final Project presented to Poli/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Electrical Engineer (Engº)

POWER TRANSFORMER TESTING AND DIAGNOSIS USING FREQUENCY RESPONSE TECHNIQUES

Leonardo Martins de Almeida Coutinho

January/2008

Advisor: Sandoval Carneiro Jr.

Co-advisor: Helvio Jailson Azevedo Martins

Department: Electrical Engineering

Diagnosis and predictive maintenance of power system equipment has been a subject of great interest for electrical utility companies. The development of techniques to detect faults before they lead to major problems and even accidents is considered very important as a means to increase the lifetime of power system equipment.

This work explores diagnosis techniques in the frequency domain applied to power transformers. The evaluation methods are based on the frequency response and terminal impedance of transformers which are known to be sensitive to modifications in electrical properties of the equipment introduced by mechanical and electrical efforts.

The work discusses several cases of real transformers that were tested in CEPEL and proposes some analytical techniques to assist in the diagnosis of faults.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - Introdução 1

1.1 INTRODUÇÃO 1

1.2 DEFINIÇÕES 3

1.3 OBJETIVO 3

CAPÍTULO 2 - Caracterização no Domínio da Freqüência 4

2.1 RESPOSTA EM FREQÜÊNCIA 4

2.1.1. Formas de Realização do Ensaio 5

2.1.2. Curvas de Resposta em Freqüência 7

2.2 IMPEDÂNCIA TERMINAL 9

2.2.1. Formas de Realização do Ensaio 10

2.2.2. Curvas de Impedância Terminal 11

2.3 FORMAS DE APRESENTAÇÃO DOS GRÁFICOS 13

2.4 COMPARAÇÃO DE EQUIPAMENTOS 14

2.5 COMPARAÇÃO ENTRE AS TÉCNICAS 14

2.6 CONCLUSÕES 18

CAPÍTULO 3 - O Banco de Dados 20

3.1 INTRODUÇÃO 20

3.2 FUNCIONAMENTO 20

3.3 CONCLUSÕES 27

CAPÍTULO 4 - Diagnósticos 28

4.1 INTRODUÇÃO 28

4.2 FORMAS DE COMPARAÇÃO DE CURVAS 28

4.3 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES 29

4.4 MODELO FÍSICO DO ENROLAMENTO 31

4.5 O MATERIAL ISOLANTE 33

4.6 CURTO-CIRCUITO 35

4.7 NÚCLEO 36

4.8 MODELO MATEMÁTICO 38

4.9 CONCLUSÕES 39

CAPÍTULO 5 - Métodos de Comparação de Medições **40**
5.1 INTRODUÇÃO **40**
5.2 CORRELAÇÃO **40**
5.3 DESVIO DE ESPECTRO **41**
5.4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS **43**
5.4.1. 1º Exemplo **43**
5.4.2. 2º Exemplo **48**
5.5 CONCLUSÕES **52**
CAPÍTULO 6 - Conclusões e Trabalhos Futuros **53**
6.1 CONCLUSÕES **53**
6.2 TRABALHOS FUTUROS **54**
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **55**

Capítulo 1

1.1 Introdução

No sistema elétrico brasileiro e em outros países, o desempenho das concessionárias quanto ao fornecimento de energia é acompanhado por agências reguladoras, as quais têm o poder de impor multas às concessionárias devido à má qualidade do fornecimento de energia elétrica, caracterizando-se sua ação na importância de um sistema elétrico cada vez mais confiável. Para o aumento da confiabilidade, a fim de evitar desligamentos não programados, percebe-se um esforço cada vez maior em relação à manutenção preventiva e preditiva de equipamentos elétricos.

Neste contexto aumenta a importância do desenvolvimento de técnicas mais eficientes para o monitoramento e diagnóstico dos equipamentos ao longo de sua vida útil, em especial os transformadores, que são equipamentos caros e muito importantes para o fornecimento de energia elétrica. Conhecer as suas condições técnicas durante a operação permite explorar adequadamente toda sua vida útil, assim como definir o momento em que se deve realizar uma manutenção.

Dentre as várias técnicas disponíveis para o monitoramento de equipamentos, a caracterização no domínio da freqüência é uma ferramenta de diagnóstico que tem sido bastante importante e amplamente utilizada para examinar o comportamento dos equipamentos quando submetidos a uma ampla faixa de freqüências (normalmente 20Hz – 2MHz), identificando os pontos de ressonância, anti-ressonância e fatores de amplificação, prevenindo então sua interação com outros equipamentos, principalmente de manobra (disjuntores e chaves).

Os transformadores por estarem localizados em subestações, ficam submetidos a solicitações provenientes da manobra de outros equipamentos, como capacitores, alimentadores e reatores. Estes podem provocar excitações, que coincidam com freqüências naturais de ressonância do transformador, amplificando estas excitações podendo provocar uma falha em seus enrolamentos.

Ao estarem sujeitos a interações podem também não apresentar mudanças imediatas em seu comportamento, isto acontece, pois estas alterações podem ocorrer sem se caracterizar como uma falha.

Os transformadores estão preparados para funcionar por muitos anos, assim como suportar altos esforços dielétricos, térmicos e mecânicos gerados por sobretensões e curtos-circuitos. Mas estes esforços mecânicos severos podem causar movimentos e deformações internas aos equipamentos.

Com os anos de uso, o transformador pode diminuir sua capacidade de suportar esforços devido a um afrouxamento em seus enrolamentos e conseqüente perda da pressão em suas bobinas. Deslocamentos mecânicos ao longo da sua vida útil são alterações cumulativas e podem um dia ser causadores de uma falha, retirando-o de operação.

No transporte dos transformadores também ocorrem vibrações que podem danificar o núcleo e os enrolamentos, prejudicando o transformador mesmo antes de entrar em operação.

Por estes motivos, é importante que esta caracterização no domínio da freqüência seja realizada em equipamentos novos e reformados, para uma base de dados a ser utilizada em futuras comparações de equipamentos falhados, com o objetivo de diagnosticar o defeito. É realizada também em equipamentos após o reparo a fim de verificar as mudanças ocorridas, comparadas ao transformador original. Esta técnica também pode ser utilizada para identificar as alterações geométricas do núcleo, dos enrolamentos e das conexões do transformador.

Para isto é importante que o equipamento seja avaliado em fases distintas da sua vida útil, analisando as condições mecânicas, verificando sua capacidade de suportar esforços e descobrindo uma tendência de defeito proveniente de onde ele está localizado ou dos curtos-circuitos a ele submetidos.

A caracterização no domínio da freqüência nos transformadores é feita usualmente através de ensaios retirando-os de funcionamento e aplicando a técnica. Mas retirar transformadores importantes na continuidade do fornecimento de energia de um sistema elétrico causa grandes problemas. Então atualmente estudam-se métodos de se realizar a resposta em freqüência e impedância terminais sem retirá-los de uso, mantendo a continuidade e a confiabilidade do sistema elétrico.

1.2 Definições

Na literatura técnica a Resposta em Freqüência é normalmente usada para a característica obtida para $\frac{V_2(\omega)}{V_1(\omega)}$, onde $\boldsymbol{V_1}$ é a tensão de entrada e $\boldsymbol{V_2}$ é a tensão de saída. Recentemente diversos estudos têm mostrado também a importância da caracterização no domínio da freqüência obtida através das impedâncias de entrada (acesso). As duas técnicas são obviamente caracterizáveis como respostas em freqüência.

Neste trabalho, visando melhor entendimento, designaremos como Resposta em Freqüência (RF) a primeira técnica, enquanto que a segunda será chamada de Impedância Terminal, $Z(\omega)$.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é discutir a importância do método de resposta em freqüência utilizado em conjunto com o método de impedância terminal. Através dos transformadores que já foram submetidos a estes ensaios pelo CEPEL, catalogados em um banco de dados, pôde-se compará-los de diferentes formas, focando em várias características abordadas no decorrer deste trabalho.

São enumerados vários defeitos que podem ocorrer com transformadores de potência, relacionando as alterações da curva de resposta em freqüência e impedância terminal com os parâmetros elétricos do transformador.

É explorado também um método que visa correlacionar curvas de impedância terminal e resposta em freqüência em faixas de freqüências distintas, facilitando sua comparação para a avaliação e diagnósticos de defeitos. A partir daí são feitas comparações entre transformadores falhados e transformadores em estado normal, explicitando a importância do método.

Capítulo 2

Caracterização no Domínio da Freqüência

2.1 Resposta em Freqüência

Os enrolamentos de transformadores apresentam uma assinatura única expressa através de uma função de transferência que reflete essencialmente as variações de seus parâmetros internos em função da freqüência, como capacitâncias, indutâncias e resistências.

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 nos enrolamentos e contaminação do óleo isolante. Este ensaio pode ser utilizado sozinho para o diagnóstico do equipamento ou usado complementando outros ensaios [1].

A Resposta em Freqüência em transformadores, ou seja, medição da relação de transformação em freqüências distintas de 60 Hz, é realizada aplicando-se um sinal senoidal (entre $1V_{ef}$ e $10\ V_{ef}$), com freqüência variável na faixa de 20 Hz a 2 MHz, a um dos enrolamentos do transformador, podendo ser estendida a freqüências mais altas. Medi-se a transferência do sinal para os demais enrolamentos ou ao longo do próprio enrolamento. As configurações dos enrolamentos, assim como os tipos de transformadores, irão determinar alguns parâmetros tais como os tipos de ligações dos instrumentos e amplitude dos sinais a serem aplicados. O sinal medido pode ser em forma de tensão ou corrente. Quando for utilizado na forma de corrente, pode-se obter tanto a impedância quanto a admitância entre os pontos.

Os equipamentos 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. São equipamentos portáteis, e apesar de todos estes equipamentos, na medição da RF não é necessário um técnico experiente, pois o sistema é automatizado.

2.1.1. Formas de Realização do Ensaio

Existem duas formas de aplicação dos sinais para medição de resposta em freqüência:

➢ Aplicando um impulso de tensão de baixa amplitude.

- Aplicando-se um impulso temos a desvantagem de que a varredura de freqüências é limitada a 2,5 MHz;
- Para se obter a função de transferência é necessário transformar tanto o sinal aplicado quanto o medido para o domínio da freqüência utilizando a transformada de Fourier;
- Usa somente as medições de transferência de tensão nos enrolamentos;

➢ Aplicando sinais senoidais em uma ampla faixa de freqüências.

- Técnica mais nova, através dos geradores de sinais, que tornou possível injetar sinais senoidais na faixa de freqüência desejada;
- É possível a obtenção de espectros de freqüência até 10 MHz;
- Resultado direto no domínio da freqüência, não sendo necessário aplicar a transformada de Fourier;
- É possível medição de impedâncias terminais além da medição de tensão transferida entre os enrolamentos;
- A utilização de uma mesma amplitude de tensão para cada componente de freqüência, enquanto que na forma de impulso temos a amplitude sendo atenuada em função da freqüência;

Nestes ensaios, uma das principais medições está disposta na Figura 2.1, onde a aplicação do sinal é feita em um enrolamento, H1-H0, por exemplo, e a medida é feita no enrolamento correspondente, X1-X3. Este é um método muito comum na realização deste ensaio, utilizado também pelo Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (CEPEL).

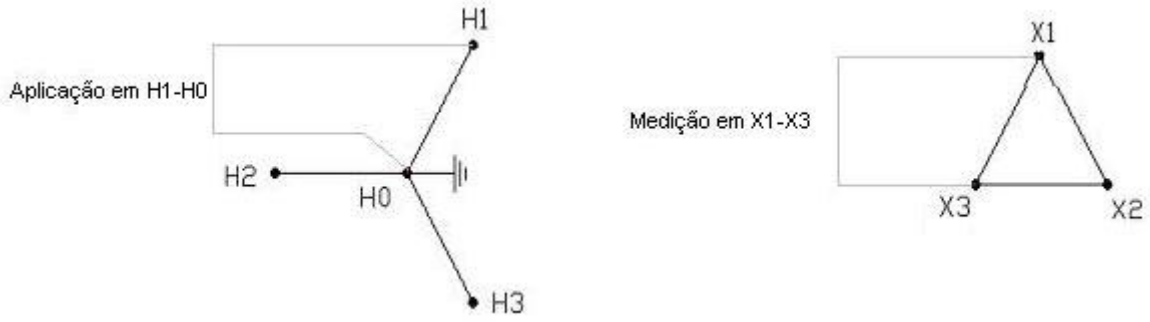


Figura 2.1: Medição em enrolamento Y-Δ

O gerador de sinais aplica uma tensão entre 1 V_{ef} e 10 V_{ef} ao enrolamento (H1-H0 por exemplo), um osciloscópio monitora esta tensão em um de seus canais através de uma ponta de prova. O sinal é medido no outro enrolamento (X1-X3) através de uma ponta de prova diferencial. Um microcomputador é utilizado para requisitar os sinais do osciloscópio e para tratar os dados traçando as curvas, de acordo com a Figura 2.2 e Figura 2.3.

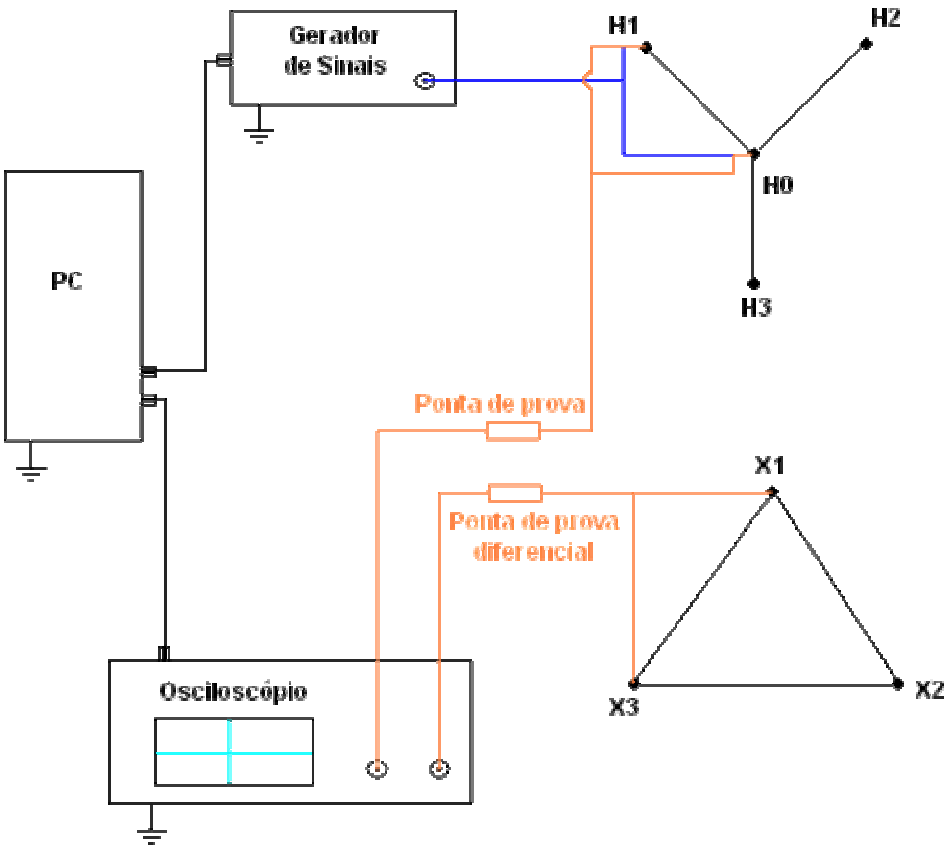


Figura 2.2: Diagrama do circuito de medição de Resposta em Freqüência

Um inversor pode ser utilizado no circuito, alimentando os equipamentos utilizados na medição. Ele facilita a medição em campo, pois elimina a necessidade da utilização de cabos que levariam energia aos equipamentos.

O inversor garante também que a tensão de alimentação não sofra interferências, causadas por outros equipamentos, em que a rede convencional está sujeita, assim como componentes harmônicos que poderiam atrapalhar a medição.

Figura 2.3: Equipamentos de medição de Resposta em Freqüência

2.1.2. Curvas de Resposta em Freqüência

Nos ensaios de resposta em freqüência de transformadores são feitos os gráficos que mostram visualmente os pontos de atenuação ou ressonância. O gráfico da resposta em freqüência apresenta a relação entre o valor do sinal de tensão de saída e o sinal de tensão de entrada ($V_{saída}/V_{entrada}$), em função da freqüência.

A curva de resposta em freqüência é traçada a partir da fórmula abaixo, onde temos o quociente entre medição e aplicação, normalizado com base na relação nominal do transformador na freqüência de 60 Hz.

$$\frac{Medição}{Aplicação} \Big/ \frac{Medição(60Hz)}{Aplicação(60Hz)}$$

As curvas das Figuras 2.4 e 2.5 têm sua amplitude em p.u. no eixo das ordenadas e a freqüência no eixo das abscissas. Os transformadores utilizados são de uma mesma família, ou seja, mesmo fabricante, ano de fabricação, potência e tensão. São transformadores elevadores de 405 MVA, de 13,8 - 550 kV.

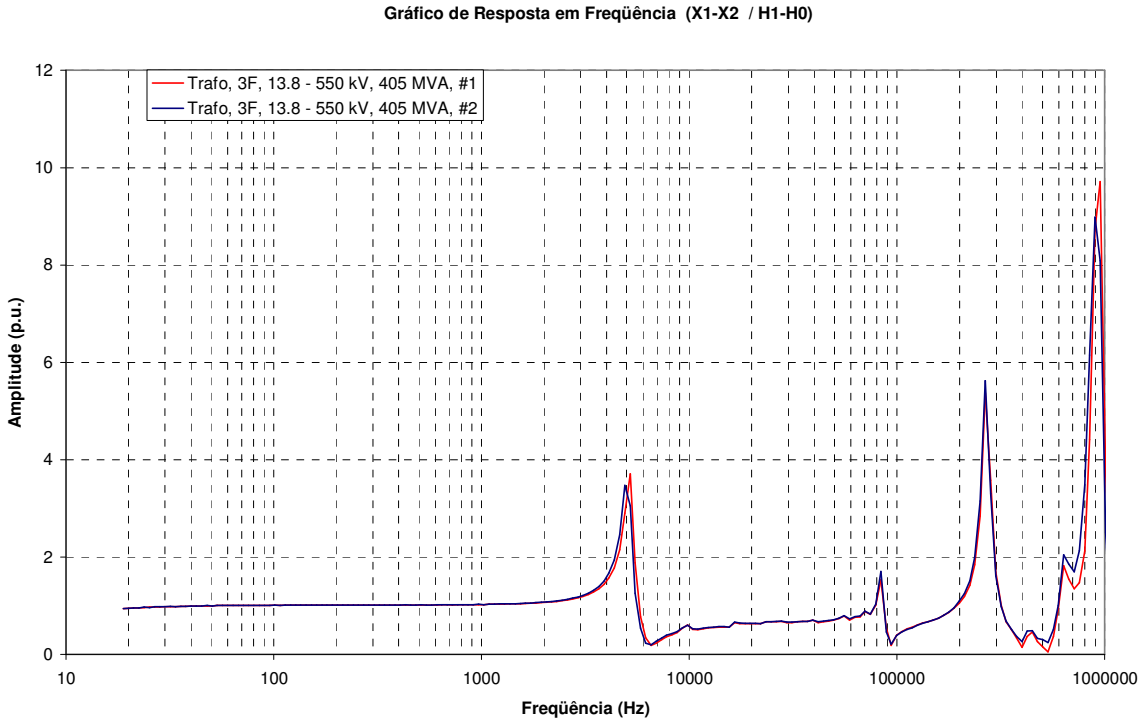


Figura 2.4: Curva típica de transformadores elevadores trifásicos (X1-X2 / H1-H0)

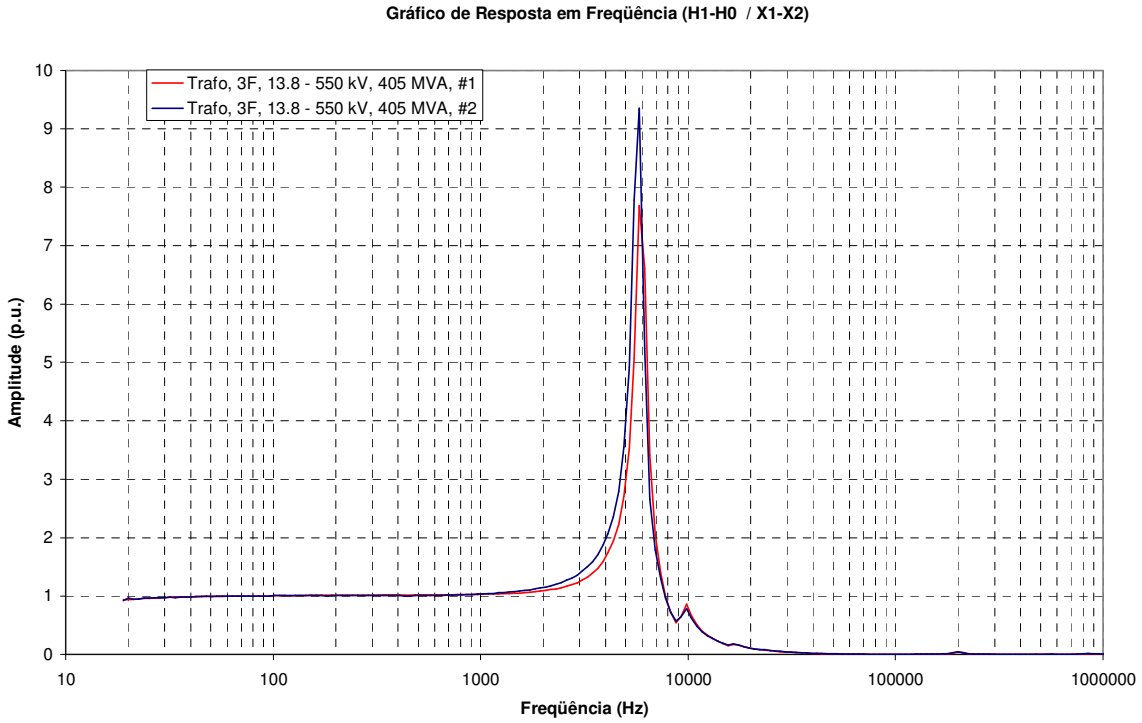


Figura 2.5: Curva típica de transformadores elevadores trifásicos (H1-H0 / X1-X2)

Percebemos que quando a tensão é aplicada no enrolamento de alta tensão e a medição no enrolamento de baixa tensão (Figura 2.4), a curva contém mais informações (ou seja, mais ressonâncias e detalhes), enquanto que na Figura 2.5, a curva traçada é mais simples, ou seja, contém poucos detalhes. Cada ressonância em determinada freqüência que aparece na curva mostra uma característica própria do transformador em questão. Para a medição no enrolamento de alta tensão da Figura 2.5, as freqüências acima de 10 kHz já aparecem bastante atenuadas neste transformador medido. Isto indica que a resposta em freqüência tem pouca sensibilidade na identificação de defeitos oriundos de enrolamentos de menor tensão.

2.2 Impedância Terminal

O método da impedância terminal consiste na medição da impedância vista através dos terminais do transformador de potência em diversas freqüências, com a utilização de uma ponte de medição de impedâncias de freqüência variável. Assim como na resposta em freqüência, as freqüências variam desde 20 Hz a até alguns MHz, sendo 2 MHz um valor típico, através de pelo menos uns 200 pontos de medição ao longo desta faixa de freqüência. Os intervalos de freqüência podem ser escolhidos manualmente ou automaticamente, dependendo da ponte utilizada.

O número de medições a ser realizada depende do número de enrolamentos do transformador a ser ensaiado [2]. Para um transformador trifásico com ligações delta e estrela por exemplo, realizam-se seis medições (Tabela 2.1), uma para cada terminal.

Tabela 2.1

H1-H0
H2-H0
H3-H0
X1-X2
X2-X3
X3-X1

2.2.1. Formas de Realização do Ensaio

Para realizar a medição, conecta-se a ponte de impedância aos terminais do enrolamento a ser analisado. Mede-se a impedância, variando-se a freqüência e coletando um conjunto de valores no intervalo de freqüência escolhido. O procedimento se repete para cada enrolamento do equipamento mantendo-se os outros enrolamentos em aberto.

Essa medição também pode ser feita deixando os outros enrolamentos em curto-circuito. Este tipo de prática evita interferências causadas por ambientes fabris ou de subestações. Quando a medição é feita com os terminais dos enrolamentos não envolvidos em aberto é medida praticamente a impedância de magnetização, enquanto que com os outros terminais em curto, mede-se a impedância de dispersão.

Comparando-se curvas medidas com os terminais não envolvidos em aberto e com os terminais aterrados, observa-se que na curva com os terminais aterrados ocorre um desvio para a direita na região de baixa freqüência, tendendo a manter o restante da curva semelhante à medição com os outros terminais em aberto.

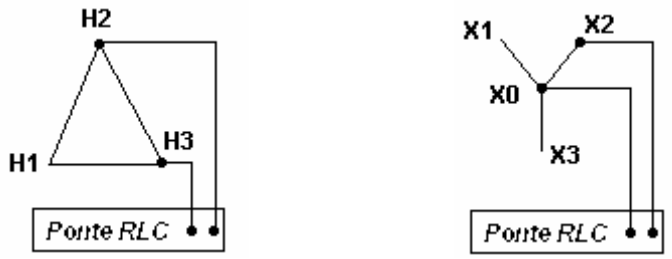


Figura 2.6: Medição da Impedância Terminal em cada tipo de enrolamento

A Figura 2.6 exibe a forma de ligação da ponte de impedância aos terminais de alta ou de baixa tensão, em Δ ou em Y.

Um sinal de tensão de amplitude constante é aplicado aos terminais de um enrolamento do transformador, variando-se sua freqüência. Como $|Z| = \frac{V}{I}$, efetuando a divisão da tensão aplicada pela corrente medida para cada ponto de medição obtemos a curva de impedância que varia, pois as reatâncias indutivas e capacitivas definidas pela geometria são dependentes da freqüência. Qualquer mudança física dentro do transformador faz com que os valores de R, L e C mudem, causando uma mudança na curva.

2.2.2. Curvas de Impedância Terminal

O resultado deste ensaio é uma curva de impedância com o seu módulo e seu respectivo ângulo variando em uma ampla faixa de freqüência, assim como na Figura 2.7, onde a medição foi feita em um transformador trifásico de tensão 16 - 525 kV e 305MVA**.** Portanto é muito importante a análise detalhada do módulo e ângulo da impedância nas curvas para identificar um possível problema com o equipamento.

Na curva pode-se perceber as ressonâncias ou anti-ressonâncias, ou seja, os picos e as atenuações da curva. Quando o ângulo muda de um valor positivo para negativo ocorre uma ressonância, mas quando o ângulo muda de um valor negativo para positivo ocorre uma atenuação.

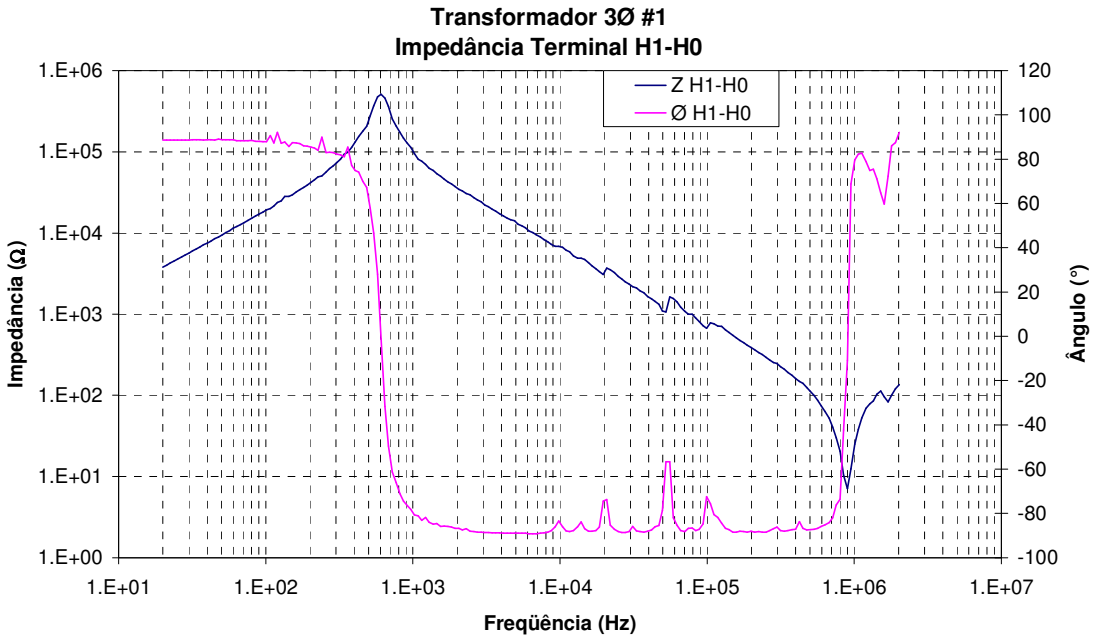


Figura 2.7: Curva de Impedância Terminal

A primeira parte da curva, onde a impedância está crescendo, é essencialmente indutiva, portanto o ângulo medido é aproximadamente 90 graus. A impedância tende a crescer, pois como a indutância é quase constante, a reatância indutiva cresce à medida que a freqüência aumenta, pois $X_L = j\omega L$. No ponto de ressonância temos o ângulo passando por zero, onde a impedância é puramente resistiva originando seu valor mais alto. Na segunda parte da curva, o ângulo passa a ser negativo caracterizando a curva como capacitiva. Nesta região, a reatância capacitiva que é inversamente proporcional à freqüência ($X_C = 1/j\omega C$) tende a diminuir até a anti-ressonância onde a impedância

volta a ser puramente resistiva e em seguida fica indutiva novamente voltando a aumentar com a freqüência.

Pode-se separar os pontos da curva de impedância e ângulo através da Equação 1.1, utilizando-se a forma retangular e trabalhando com resistência e reatância. Pode-se calcular então a resistência e a reatância para toda a curva de impedância.

$$|Z|\angle\theta = R + jX \qquad \textbf{(1.1)}$$

A Figura 2.8 exibe as curvas de impedância, resistência e módulo da reatância indutiva e reatância capacitiva em função da freqüência em uma escala logarítmica nos dois eixos. E também o ângulo em uma escala linear no eixo das ordenadas. Neste gráfico, o módulo da reatância capacitiva e indutiva acompanha a curva de impedância, pois a parte resistiva é pequena em relação à reatância. Pode-se perceber também que a resistência aumenta na ressonância, onde o ângulo passa por zero.

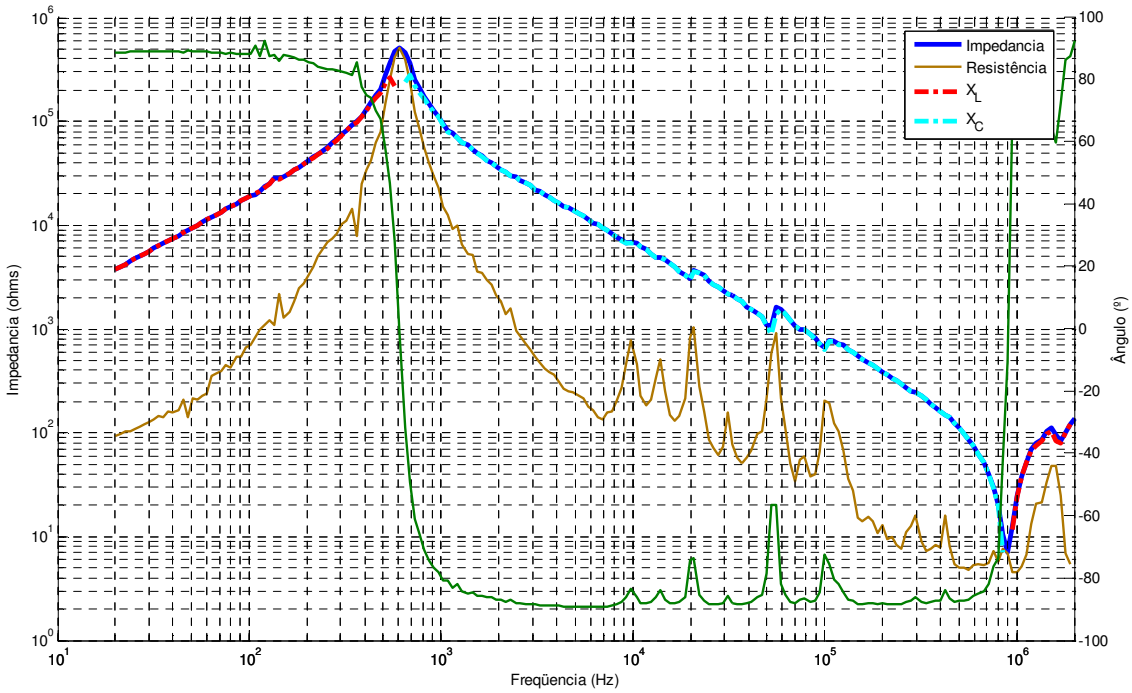


Figura 2.8: Curva da Resistência x Freqüência

O módulo da impedância pode ser analisado de acordo com a Equação 1.4. As ressonâncias ocorrem justamente quando $\omega L = \dfrac{1}{\omega C}$, portanto a impedância é apenas

resistiva nas ressonâncias (Equação 1.3). Logo, a freqüência de ressonância é $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ou $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

$$Z = R + j(X_L - X_c) \tag{1.2}$$

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \tag{1.3}$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \tag{1.4}$$

Para freqüências mais altas a capacitância do circuito equivalente do transformador torna-se muito pequena, portanto a reatância capacitiva na Equação 1.3 começa a aumentar de valor até se aproximar ao da reatância indutiva, gerando a primeira ressonância. Neste momento a curva é capacitiva e a partir disto, a freqüência continua a aumentar diminuindo X_C e aumentando X_L até os dois se igualarem novamente ocorrendo o mínimo global. Esta é uma análise simplificada da curva de impedância de um transformador. Mas este equipamento é muito complexo, portanto as interações entre enrolamentos, núcleo e tanque podem gerar infinitas combinações de capacitância e indutância, fazendo com que a curva de impedância tenha pequenas variações gerando alguns máximos e mínimos locais. De acordo com a Figura 2.8 a resistência também sofreu algumas variações, isto ocorre porque pela complexidade de um transformador o aparecimento do efeito pelicular no cobre, no núcleo ou no tanque faz com que altere a profundidade de penetração e assim altere a resistência vista dos terminais.

2.3 Formas de Apresentação dos Gráficos

A apresentação dos resultados em gráficos pode ser feita de diversas formas. O modo mais adequado é utilizar a freqüência no eixo das abscissas na escala logarítmica, amplificando os detalhes das freqüências mais baixas, mostrando toda a informação em um só gráfico. Nada impede que se utilize a escala linear, mas para isto é necessário utilizar gráficos separados para cada década examinada. No eixo das ordenadas pode-se utilizar tanto a escala linear quanto a escala logarítmica, sendo que esta última tende a realçar as diferenças, amplificando as pequenas variações. Alguns autores e laboratórios

utilizam também a escala em decibéis, definindo a amplitude como sendo $K_{dB} = -20\log_{10}\left(V_{saída} / V_{entrada} \right)$. Para uma curva de impedância, o ângulo é normalmente traçado de forma linear no eixo das ordenadas, mantendo-se o mesmo eixo do módulo da impedância.

2.4 Comparação de Equipamentos

Normalmente a avaliação dos equipamentos é feita utilizando as curvas de modo comparativo. Caso a amostra seja única, ou seja, na ausência de outra similar, se o transformador for trifásico utiliza-se a comparação por simetria à fase central, ou seja, a resposta em freqüência ou impedância terminal tende a ser semelhante nos dois enrolamentos laterais, e um pouco diferente no central, de acordo com a Figura 2.9 e 2.10. A partir disso, pode-se fazer uma primeira avaliação verificando-se alguma diferença significativa entre as fases laterais.

Caso seja possível identificar um equipamento pertencente à mesma família é possível compará-lo a outros, podendo-se fazer uma inspeção mais detalhada nas suas fases.

A melhor forma é o caso da existência de um histórico de medições do equipamento, onde comparar através da simetria à fase central ou com equipamentos de mesma família deixa de ser importante, pois se torna possível uma comparação ao longo do tempo.

2.5 Comparação entre as Técnicas

A resposta em freqüência é a transferência de um sinal de um enrolamento para outro ou ao longo do próprio enrolamento. Essa transferência de sinal será maior quando a impedância do enrolamento for menor. Portanto, temos os pólos da curva da resposta em freqüência (as ressonâncias) na mesma freqüência em que ocorrem os mínimos da curva de impedância. Para os máximos na curva de impedância temos mínimos correspondentes na curva de resposta em freqüência, o que pode ser observado nas Figuras 2.9 e 2.10.

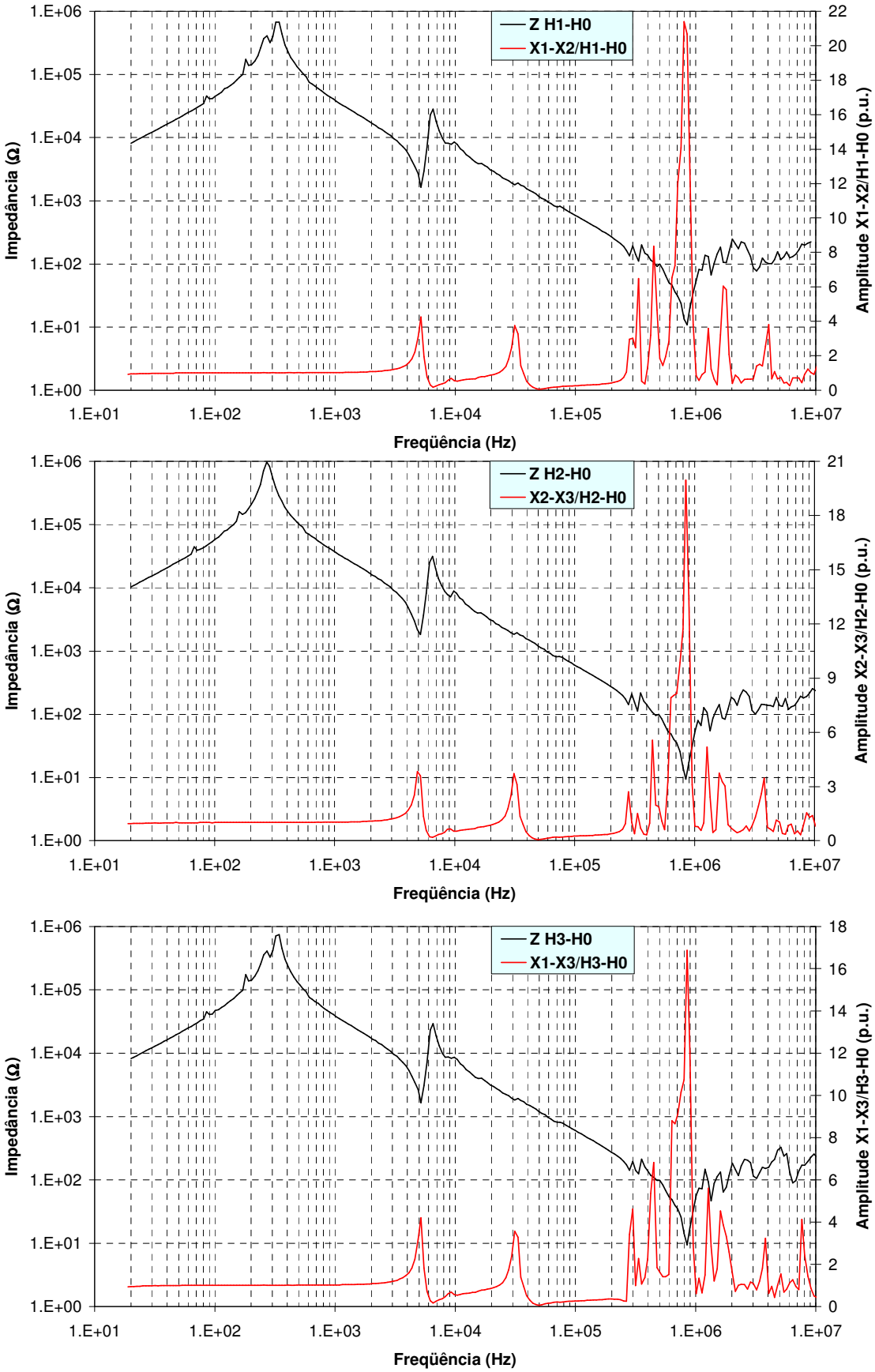


Figura 2.9: Comparação entre Impedância vista dos terminais de alta tensão e Resposta em Freqüência com aplicação em Hi-Hj

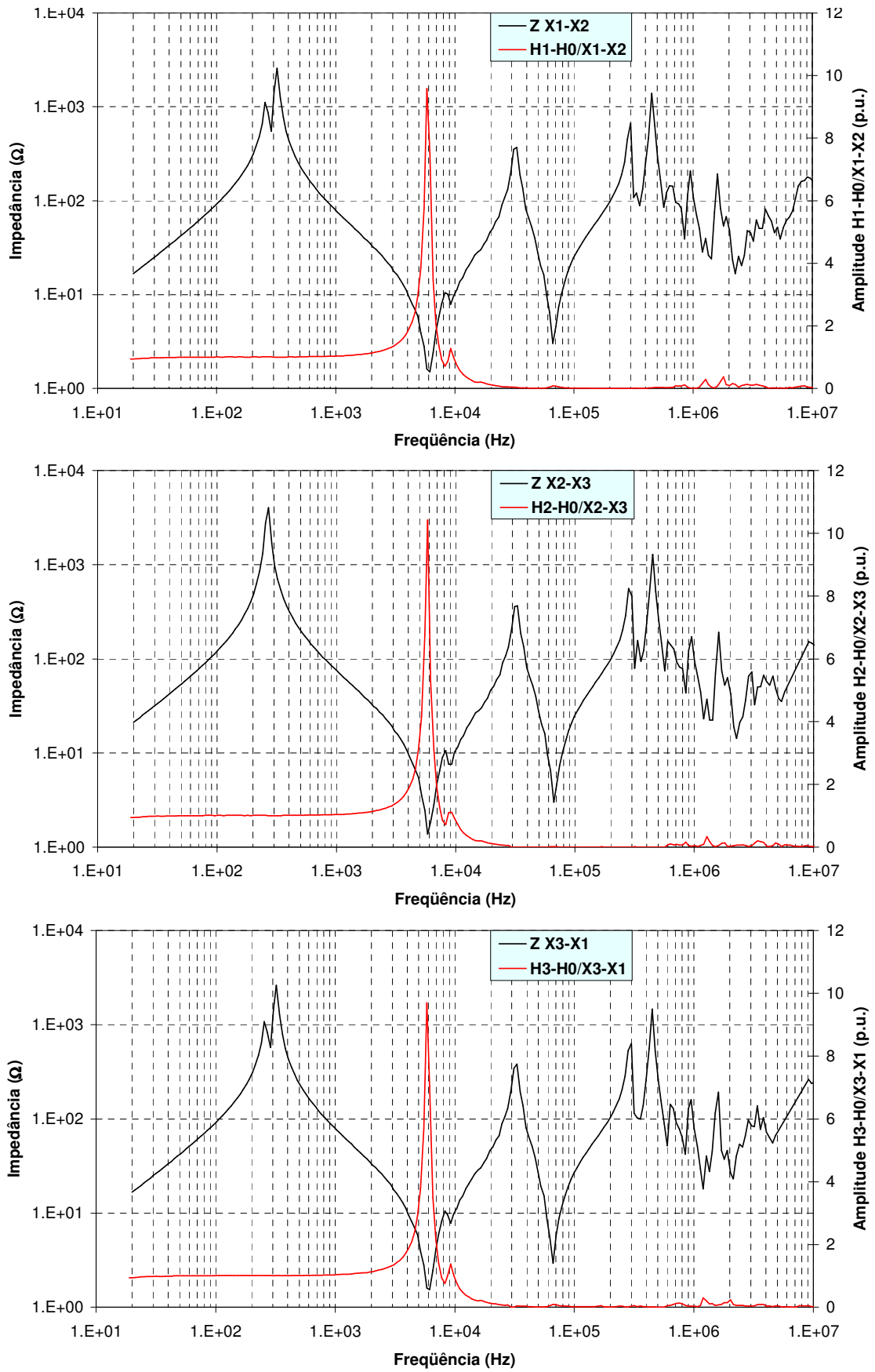


Figura 2.10: Comparação entre Impedância vista dos terminais de baixa tensão e Resposta em Freqüência com aplicação em Xi-Xj

O primeiro pólo da curva de impedância não aparece na curva de resposta em freqüência. O motivo é que a curva de resposta em freqüência é referenciada com seu valor nominal em 60 Hz, fazendo com que fique em torno de 1 p.u. até aproximadamente 1 kHz. Como a impedância terminal não é referenciada, ela mostra as variações nas freqüências iniciais, mas podemos perceber que justamente nestas freqüências iniciais, a curva de impedância dos terminais de alta e baixa tensão apresenta diferenças apenas em amplitude, como visto na Figura 2.11, no caso um autotransformador. Neste caso em particular devido a sua forma construtiva, os enrolamentos são geometricamente similares, fazendo com que tanto a impedância terminal para o enrolamento de alta tensão como para o enrolamento de baixa tensão tenha forma semelhante.

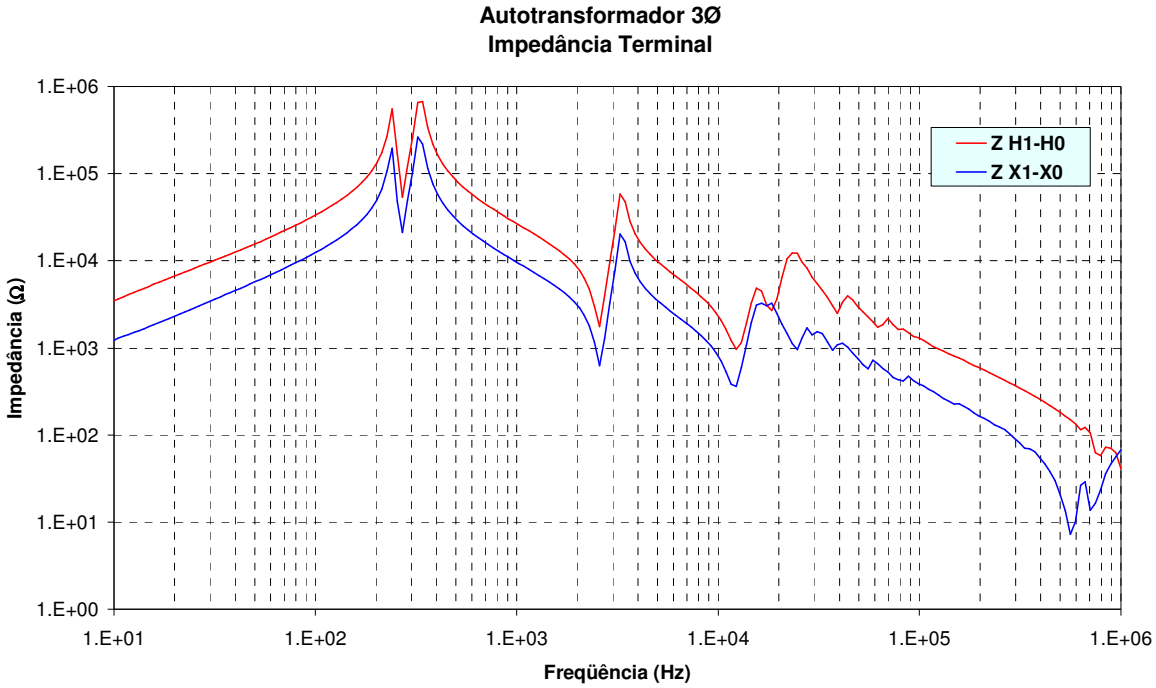


Figura 2.11: Curva de Impedância Terminal do enrolamento de alta e baixa tensão

A Figura 2.12 é um modelo simplificado de um transformador trifásico, onde se supõe que os enrolamentos primário e secundário estão localizados um sobre o outro em cada "perna" do núcleo.

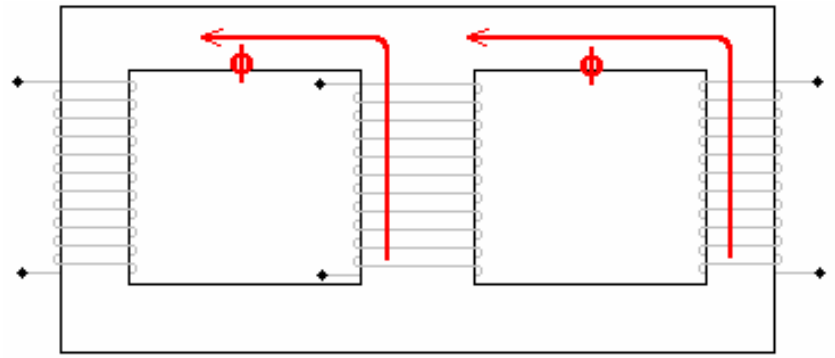


Figura 2.12: Fluxo no transformador trifásico

A medição da impedância terminal em uma das fases laterais do transformador, cria diferentes caminhos de fluxo magnético pelas outras fases, criando uma dupla ressonância. Isto acontece, pois em transformadores trifásicos ocorrem duas rotas de fluxo percorrendo caminhos de comprimentos diferentes de acordo com a Figura 2.12, o que faz com que a ressonância do primeiro máximo fique duplicada. Isto pode ser observado nas medições das fases laterais nas curvas de impedância das Figuras 2.9 e 2.10. Isto não é observado para medições de impedância de enrolamentos localizados na parte central do transformador e também não ocorre para os transformadores monofásicos.

2.6 Conclusões

A resposta em freqüência deve ser utilizada em conjunto com a impedância terminal porque enquanto a curva de impedância do terminal X (baixa tensão) é mais rica em informações, a de resposta em freqüência tem menor sensibilidade a alterações. E já no terminal H (alta tensão), a curva de resposta em freqüência carrega mais informações sobre o transformador enquanto que a curva de impedância é mais simplificada.

Embora estas medições necessitem do equipamento desligado, elas são rápidas e automatizadas, o que facilita seu uso em campo por um técnico sem experiência neste tipo de medição.

A caracterização no domínio da freqüência, ou seja, tanto o ensaio de resposta em freqüência quanto o de impedância terminal se mostram muito eficazes na detecção da mudança de alguns de seus parâmetros internos, como resistência, capacitância e indutância.

Pode-se comparar curvas de um equipamento com uma referência do mesmo transformador ou de um outro com características similares, tomadas anteriormente e consideradas como normais. Assim é possível diagnosticar alterações geométricas no núcleo ou enrolamentos do equipamento, deformações que dificilmente são detectadas por outros métodos. Isto obviamente facilita o diagnóstico preventivo de defeitos no equipamento, possibilitando seu reparo de forma programada, justificando a aplicação destas técnicas.

Capítulo 3

O Banco de Dados

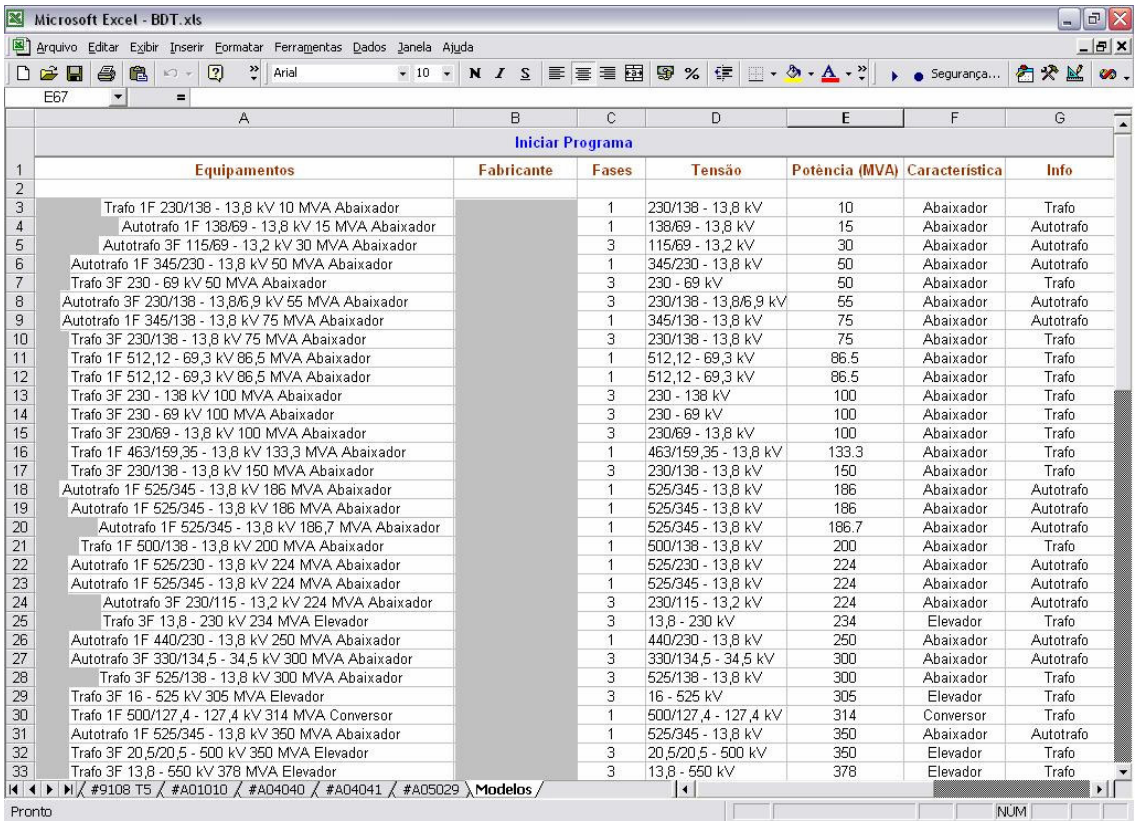
3.1 Introdução

Para a organização dos dados de medições de resposta em freqüência e impedância terminal, foi necessária a criação de um banco de dados que possibilitasse a organização desses dados obtidos nos ensaios. Este banco de dados foi criado de forma a possibilitar a organização dos transformadores por potência, tensão, fabricante, característica, número de fases, etc.

3.2 Funcionamento

O banco de dados foi criado utilizando o software Excel, especificamente em Visual Excel, que é o setor do programa que lida com os macros, onde se pode programar, e assim criar menus e funções dentro do próprio Excel. A partir da linguagem de programação, que é o Visual Basic, foi criado todo o programa do banco de dados, onde as planilhas são acessadas através de funções e rotinas. Sendo assim, é possível ter um ambiente com uma funcionalidade bem grande, facilitando a criação deste banco de dados.

O banco exibe em uma planilha principal os modelos dos transformadores separados pelas suas características e discriminando todos os detalhes que os especificam e os diferenciam dos outros transformadores. A Figura 3.1 mostra esta planilha principal em que estão as informações dos transformadores.



Iniciar Programa

	Equipamentos	Fabricante	Fases	Tensão	Potência (MVA)	Característica	Info
3	Trafo 1F 230/138 - 13,8 kV 10 MVA Abaixador		1	230/138 - 13,8 kV	10	Abaixador	Trafo
4	Autotrafo 1F 138/69 - 13,8 kV 15 MVA Abaixador		1	138/69 - 13,8 kV	15	Abaixador	Autotrafo
5	Autotrafo 3F 115/69 - 13,2 kV 30 MVA Abaixador		3	115/69 - 13,2 kV	30	Abaixador	Autotrafo
6	Autotrafo 1F 345/230 - 13,8 kV 50 MVA Abaixador		1	345/230 - 13,8 kV	50	Abaixador	Autotrafo
7	Trafo 3F 230 - 69 kV 50 MVA Abaixador		3	230 - 69 kV	50	Abaixador	Trafo
8	Autotrafo 3F 230/138 - 13,8/6,9 kV 55 MVA Abaixador		3	230/138 - 13,8/6,9 kV	55	Abaixador	Autotrafo
9	Autotrafo 1F 345/138 - 13,8 kV 75 MVA Abaixador		1	345/138 - 13,8 kV	75	Abaixador	Autotrafo
10	Trafo 3F 230/138 - 13,8 kV 75 MVA Abaixador		3	230/138 - 13,8 kV	75	Abaixador	Trafo
11	Trafo 1F 512,12 - 69,3 kV 86,5 MVA Abaixador		1	512,12 - 69,3 kV	86.5	Abaixador	Trafo
12	Trafo 1F 512,12 - 69,3 kV 86,5 MVA Abaixador		1	512,12 - 69,3 kV	86.5	Abaixador	Trafo
13	Trafo 3F 230 - 138 kV 100 MVA Abaixador		3	230 - 138 kV	100	Abaixador	Trafo
14	Trafo 3F 230 - 69 kV 100 MVA Abaixador		3	230 - 69 kV	100	Abaixador	Trafo
15	Trafo 3F 230/69 - 13,8 kV 100 MVA Abaixador		3	230/69 - 13,8 kV	100	Abaixador	Trafo
16	Trafo 1F 463/159,35 - 13,8 kV 133,3 MVA Abaixador		1	463/159,35 - 13,8 kV	133.3	Abaixador	Trafo
17	Trafo 3F 230/138 - 13,8 kV 150 MVA Abaixador		3	230/138 - 13,8 kV	150	Abaixador	Trafo
18	Autotrafo 1F 525/345 - 13,8 kV 186 MVA Abaixador		1	525/345 - 13,8 kV	186	Abaixador	Autotrafo
19	Autotrafo 1F 525/345 - 13,8 kV 186 MVA Abaixador		1	525/345 - 13,8 kV	186	Abaixador	Autotrafo
20	Autotrafo 1F 525/345 - 13,8 kV 186,7 MVA Abaixador		1	525/345 - 13,8 kV	186.7	Abaixador	Autotrafo
21	Trafo 1F 500/138 - 13,8 kV 200 MVA Abaixador		1	500/138 - 13,8 kV	200	Abaixador	Trafo
22	Autotrafo 1F 525/230 - 13,8 kV 224 MVA Abaixador		1	525/230 - 13,8 kV	224	Abaixador	Autotrafo
23	Autotrafo 1F 525/345 - 13,8 kV 224 MVA Abaixador		1	525/345 - 13,8 kV	224	Abaixador	Autotrafo
24	Autotrafo 3F 230/115 - 13,2 kV 224 MVA Abaixador		3	230/115 - 13,2 kV	224	Abaixador	Autotrafo
25	Trafo 3F 13,8 - 230 kV 234 MVA Elevador		3	13,8 - 230 kV	234	Elevador	Trafo
26	Autotrafo 1F 440/230 - 13,8 kV 250 MVA Abaixador		1	440/230 - 13,8 kV	250	Abaixador	Autotrafo
27	Autotrafo 3F 330/134,5 - 34,5 kV 300 MVA Abaixador		3	330/134,5 - 34,5 kV	300	Abaixador	Autotrafo
28	Trafo 3F 525/138 - 13,8 kV 300 MVA Abaixador		3	525/138 - 13,8 kV	300	Abaixador	Trafo
29	Trafo 3F 16 - 525 kV 305 MVA Elevador		3	16 - 525 kV	305	Elevador	Trafo
30	Trafo 1F 500/127,4 - 127,4 kV 314 MVA Conversor		1	500/127,4 - 127,4 kV	314	Conversor	Trafo
31	Autotrafo 1F 525/345 - 13,8 kV 350 MVA Abaixador		1	525/345 - 13,8 kV	350	Abaixador	Autotrafo
32	Trafo 3F 20,5/20,5 - 500 kV 350 MVA Elevador		3	20,5/20,5 - 500 kV	350	Elevador	Trafo
33	Trafo 3F 13,8 - 550 kV 378 MVA Elevador		3	13,8 - 550 kV	378	Elevador	Trafo

Figura 3.1: Planilha principal do banco de dados

Obs: A fim de evitar problemas quanto à exibição de informação confidencial, foram apagados os nomes dos fabricantes na Figura 3.1.

A partir desta planilha principal, o programa tem a informação de todos os modelos que estão cadastrados e assim procura outros transformadores (outros números de série) de uma mesma família.

Nas outras planilhas estão os dados das respostas em freqüência, obtidos nos ensaios, separadas pelo número de serie. Diferentes medições tiveram diferentes planilhas, o que possibilita que sejam adicionados os dados do ensaio de um determinado transformador ao sair da fábrica e os dados do mesmo transformador com defeito, reparado depois do defeito, ou simplesmente após um ensaio programado. Estas planilhas estão organizadas da seguinte forma: no inicio estão as descrições do transformador em questão; depois estão as medições organizadas em colunas onde na primeira coluna estão as freqüências em Hertz, na segunda estão as tensões de aplicação em volts e a partir da terceira estão as tensões de medição, de acordo com a Tabela 3.1.

Tabela 3.1

FREQ (Hz)	H1-H0 (V)	X1-X0 (V)	Y1-Y2 (V)
18,89	7,076	3,543	0,6782
20,01	7,062	3,541	0,6797
21,2	7,078	3,545	0,6866
22,47	7,072	3,542	0,691
23,81	7,121	3,559	0,6997
25,23	7,039	3,533	0,6951

No exemplo está a aplicação do sinal no primário (H1-H0), medição no secundário (X1-X0) e medição também no terciário (Y1-Y2). A curva de resposta em freqüência é traçada em valores p.u., normalizados para os valores calculados na freqüência de 60 Hz.

$$\frac{Medição}{Aplicação} \Big/ \frac{Medição(60Hz)}{Aplicação(60Hz)}$$

Todas as planilhas com os dados dos transformadores estão armazenadas no banco de dados. Para facilitar a inclusão dos dados neste programa, foram criadas rotinas que fizeram o uso de menus para uma maneira automatizada de manipular os dados. A tela principal do banco de dados é mostrada na Figura 3.2. Através desta tela é possível cadastrar os modelos de transformadores exibidos na planilha principal, cadastrar as medições (dados dos ensaios de resposta em freqüência exibidos nas outras planilhas) e traçar os gráficos de resposta em freqüência.

A grande utilidade deste banco, além de guardar todos os dados de ensaios de resposta em freqüência de transformadores de potência, é a função de traçar vários gráficos na mesma planilha, facilitando a comparação dos dados medidos em diferentes épocas, para diferentes transformadores.

A tela de *Cadastro de Medição* permite procurar o modelo do equipamento adequado para registrar a medição; em seguida, cadastra-se o número de série e outros dados do transformador. A partir daí, o programa tem uma busca automatizada que facilita o processo, pois apenas é preciso selecionar os arquivos onde estão as medições e adicionar. O programa procura no arquivo a medição e a adiciona nas planilhas internas de uma forma padronizada, para que os dados já estejam organizados de forma a facilitar na momento de traçar as curvas.

Figura 3.2: Tela principal do banco de dados

Através da tecla de *Comparação por Modelo* da Figura 3.2, aparece uma outra janela em que se pode selecionar o modelo a ser comparado, e a partir dele são exibidos todos os números de série cadastrados para o modelo selecionado. Uma vez selecionado o número de série, estão disponíveis todas as medições. A Tabela 3.2 exibe um exemplo das medições disponíveis em um dado transformador.

Tabela 3.2

X1-X0 / H1-H0
Y1-Y2 / H1-H0
X2-X0 / H2-H0
Y2-Y3 / H2-H0

A primeira linha da Tabela 3.2 significa que a aplicação foi feita em H1-H0 e medida em X1-X0. O mesmo pode ser entendido para as outras linhas, considerando a seqüência *Medição / Aplicação*.

Ao selecionar uma destas medições, o programa procura os dados internamente e traça o gráfico da resposta em freqüência da medição selecionada. É possível selecionar vários modelos ou várias medições diferentes e traçar tudo no mesmo gráfico, a fim de comparar curvas de transformadores de mesma família e possivelmente identificar uma correlação entre as curvas.

A tecla da janela principal chamada *Comparação por Número de Série* também faz a mesma coisa da tecla descrita anteriormente. A diferença é apenas que a partir desta, pode-se selecionar diretamente o número de série a ser comparado, facilitando ao traçar curvas em que se sabe o número de série, mas não se tem a característica do transformador. Para estas duas teclas, é exibida uma breve descrição do transformador selecionado, auxiliando na escolha do mesmo. Depois da curva traçada em Excel, existe uma opção para traçá-la em Matlab, o que facilita o trabalho, pois o Matlab tem mais recursos para trabalhar com gráficos.

Através do recurso adicionado também ao banco de dados é possível calcular o coeficiente de correlação e de desvio de espectro com o auxílio do Matlab. Desde que sejam comparadas duas curvas, pode-se calcular estes indicadores estatísticos, que serão explicados no Capítulo 5.

A Figura 3.3 mostra uma curva traçada em Matlab pelo banco de dados, para seis transformadores de mesmo fabricante, mas com dois grupos de tensões diferentes e potências diferentes, sendo que três são transformadores e três são autotransformadores. Nestes transformadores, a aplicação foi feita no terminal de baixa tensão e a medição foi realizada no terminal de alta tensão.

Observa-se que para cada grupo de transformadores, a curva de resposta em freqüência segue o mesmo padrão, sendo que nos transformadores de 550 MVA a ressonância ocorre em uma freqüência maior, aproximadamente 7 kHz com uma amplitude maior. Já no grupo dos autotransformadores, a ressonância ocorre em uma freqüência mais baixa, aproximadamente 5 kHz, com uma amplitude menor. Nestes transformadores ocorre uma outra ressonância de alta freqüência em torno de 600 kHz que não aparece nos demais.

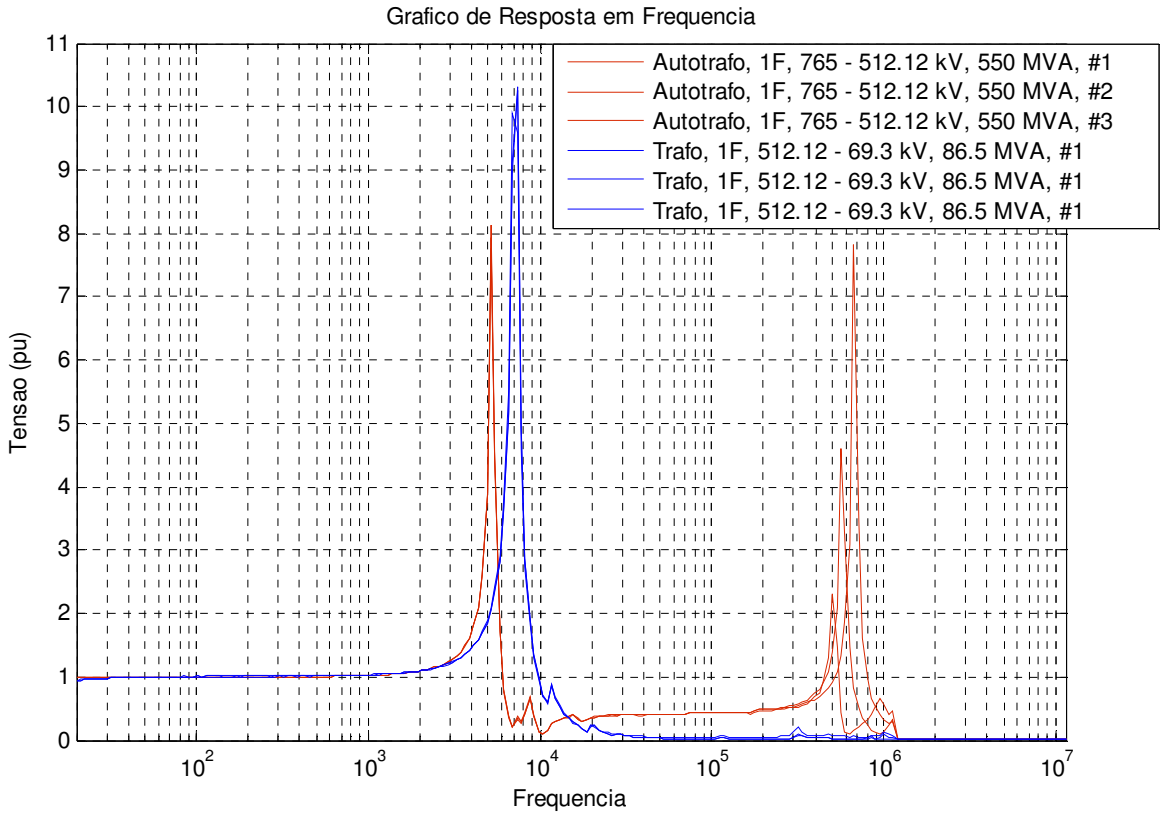


Figura 3.3: Resposta em freqüência de dois grupos de transformadores

Sabe-se também que se o ensaio de resposta em freqüência for feito novamente com um destes transformadores ou autotransformadores de mesma característica, a curva de resposta em freqüência deve ficar de acordo com a forma esperada. Uma atenção maior deve ser dada ao verificar-se uma defasagem na freqüência ou na sua amplitude. Modificações como estas podem ter sido introduzidas por alterações geométricas, modificações no seu dielétrico e outros defeitos que serão analisados posteriormente neste trabalho.

Na Figura 3.4 são comparadas curvas de resposta em freqüência de quatorze transformadores traçadas a partir do Excel pelo programa de banco de dados. Esta curva é uma comparação entre autotransformadores monofásicos de 3 enrolamentos, com tensão de 525/345 - 13,8 kV e com 186 MVA de potência, com aplicação no enrolamento de alta tensão (H1-H0) e medição em um enrolamento de baixa tensão (X1-X0). Estes transformadores são de três fabricantes diferentes, onde as curvas de cada fabricante seguem padrões diferentes.

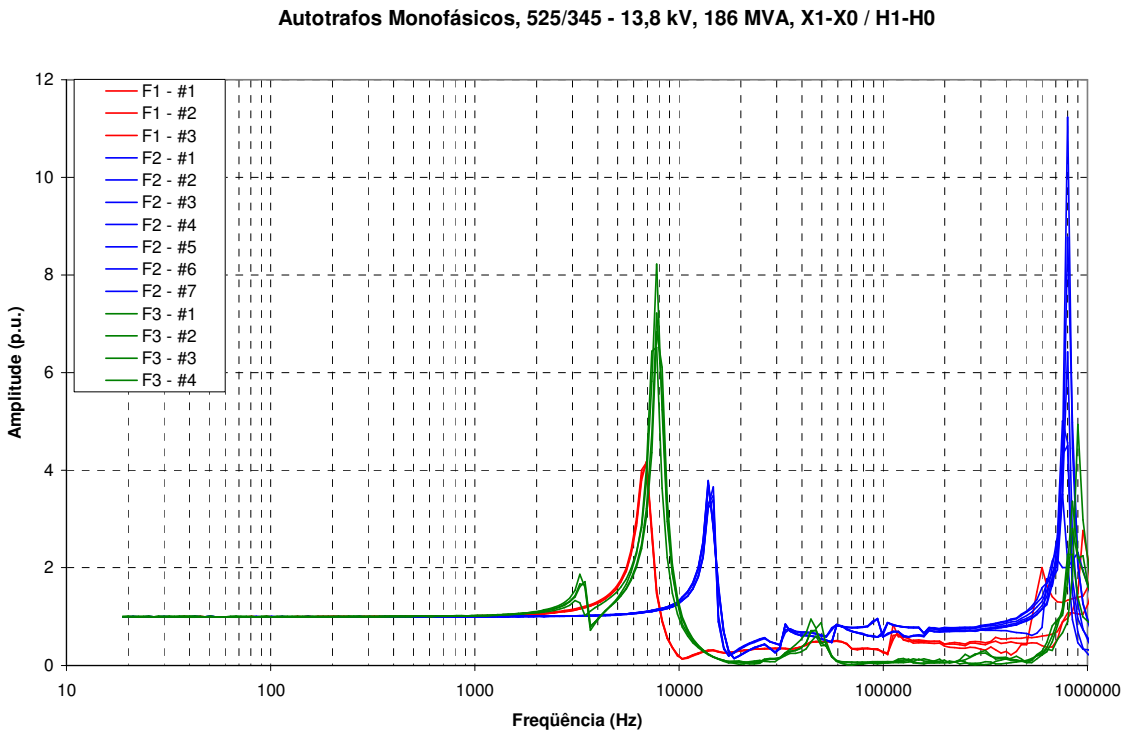


Figura 3.4: Curva de resposta em freqüência de transformadores de três fabricantes

Pode-se perceber que as curvas de mesmo fabricante têm a mesma forma, com suas ressonâncias e anti-ressonâncias em freqüências próximas, mas para fabricantes diferentes a ressonância ocorre em uma freqüência e uma amplitude diferente. Com isso, percebe-se que mesmo os transformadores tendo a mesma potência e classe de tensão, as suas respostas em freqüência seguem padrões diferentes para cada fabricante. Isto acontece porque cada fabricante tem a sua maneira de construir o transformador, enrolar as bobinas, o papel, etc, influenciando na sua curva de resposta em freqüência.

A partir destas curvas, percebe-se que um transformador de mesmo tipo e mesmo fabricante vai produzir uma resposta em freqüência semelhante à da Figura. Uma atenção maior deve ser dada para o aparecimento de um transformador da mesma família com uma resposta bem diferente. Para transformadores falhados ou reparados, a curva de resposta em freqüência e impedância costuma acusar variações ao longo das freqüências. Isto acontece pois ao se reparar um transformador, ao desmontar e remontá-lo, nem sempre o transformador fica exatamente como o original. Essas pequenas diferenças originadas por um processo de desmontagem são percebidas na curva de resposta em freqüência quando comparada à curva do transformador original.

3.3 Conclusões

O banco de dados possibilitou a comparação das curvas, facilitando o diagnóstico de defeitos, e possibilitou também pesquisas sobre o comportamento das curvas de resposta em freqüência. Através do banco de dados melhorou-se a forma de avaliar tendências, e perceber as influências do tipo de transformador em cada característica no padrão de resposta em freqüência.

Este banco de dados foi a melhor forma de organizar as curvas de resposta em freqüência. Isto facilitou ao relacionar transformadores semelhantes para que possam ser comparados entre si.

Capítulo 4

Diagnósticos

4.1 Introdução

O diagnóstico de transformadores através de curvas de resposta em freqüência e impedância terminal tem como objetivos descobrir o tipo do defeito e ainda a sua localização, a partir de alterações na curva.

A resposta em freqüência é sensível a alterações que ocorram nos parâmetros dos enrolamentos, do núcleo, de ligações internas as buchas e ao tanque e do isolamento elétrico. É possível relacionar a natureza dos parâmetros com a região do espectro de freqüência que sofreu alteração. Sabe-se que os defeitos de origem indutiva assim como os curtos-circuitos se manifestam na região de baixas freqüências, e os de origem capacitiva assim como defeitos mecânicos se manifestam nas altas freqüências.

4.2 Formas de Comparação de Curvas

Para se obter um diagnóstico bem feito, é importante que as medições sejam realizadas corretamente, em um meio sem interferências. As medições em campo estão sujeitas a interferências provenientes de outros equipamentos, e as medições sem certo nível de cuidado podem ser totalmente inutilizadas.

De forma ideal, as medições deveriam ser realizadas em laboratório em um local livre de interferências e preferencialmente com um mesmo equipamento de medição. Os cabos utilizados interferem na medição e podem ser responsáveis por um diagnóstico equivocado. Como na prática estas condições ideais dificilmente são atingidas, as comparações entre curvas devem ser realizadas com um pouco de bom-senso, considerando também as condições nas quais estes dados foram obtidos.

A comparação de curvas é normalmente realizada utilizando medições de um mesmo transformador. Para transformadores monofásicos sem medições anteriores, o diagnóstico também pode ser feito comparando-se transformadores de mesma família, percebendo que em baixas freqüências pode haver diferenças, mas para médias e altas freqüências a curva tende a ser bem semelhante.

Como já mencionado anteriormente, nos transformadores trifásicos, as fases laterais tendem a ter uma curva semelhante, devido à simetria à fase central. Essas comparações entre fases devem ser feitas para detectar alterações geométricas em seus enrolamentos. Caso se observem mudanças na curva de uma fase com relação a outra, pode ser indício de um defeito em uma destas fases ou alguma avaria que pode a vir se tornar um defeito, devendo-se tomar medidas preventivas neste equipamento. Diferenças entre as fases podem ocorrer em alguns transformadores, devido à falta de simetria nas configurações físicas dos terminais ou espaços dos enrolamentos [6].

A comparação também pode ser realizada em relação a fase central, visto que as maiores diferenças ocorrem a baixas freqüências. Já em médias e altas freqüências as curvas geralmente coincidem bastante. Isto acontece pois na faixa das freqüências baixas, pode-se perceber uma grande influência do núcleo, responsável pelas diferenças entre a fase central e as fases laterais, como a dupla ressonância, mencionada anteriormente.

4.3 Análise das Medições

Para uma análise detalhada das curvas de impedância terminal e resposta em freqüência a fim de diagnosticar um possível defeito, preferencialmente devem-se realizar comparações entre medições em um mesmo equipamento, realizadas em épocas distintas.

É importante que este equipamento nunca tenha sido reformado, ou seja, nunca tenha apresentado uma falha e depois reparado. Esta exigência existe devido a alterações na curva de impedância e resposta em freqüência que podem ser introduzidas devido ao reparo do transformador.

Na Figura 4.1, pode-se notar o quanto as curvas podem se alterar devido a uma reforma no equipamento, já que nas duas curvas exibidas o transformador estava funcionando corretamente (antes da falha e depois da reforma).

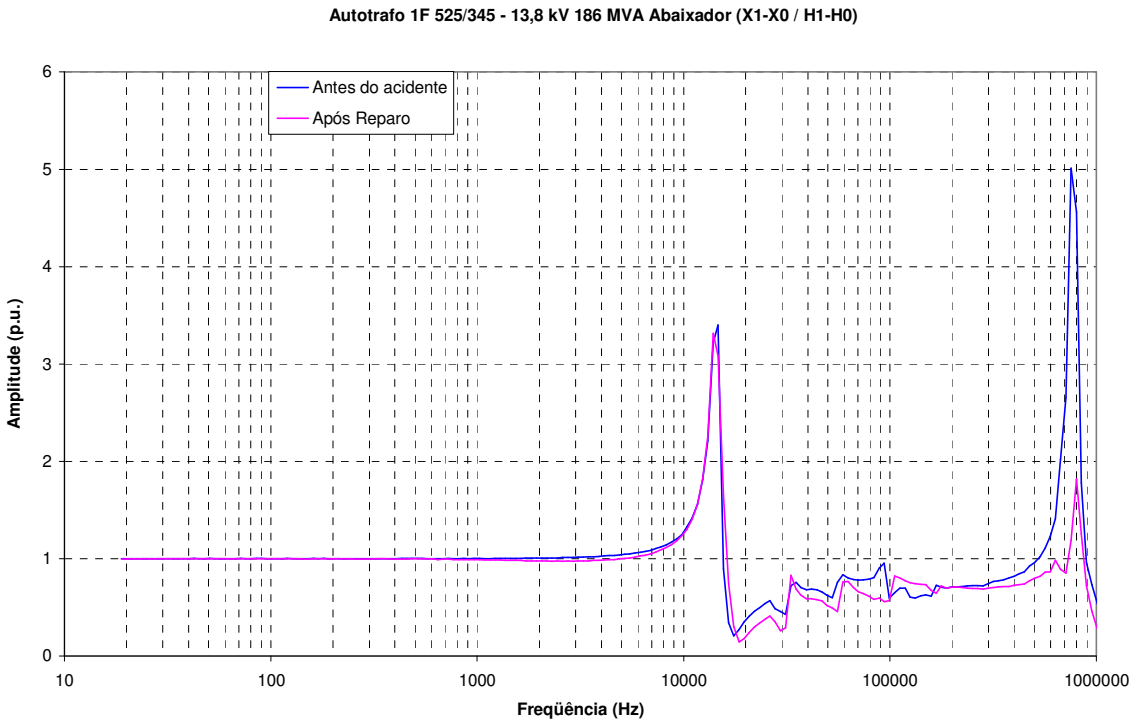


Figura 4.1: Comparação entre antes da falha e depois da reforma

Um engenheiro desavisado poderia diagnosticar um defeito no transformador observando a região de altas freqüências. O que aconteceu foi que na ocasião do reparo, o fabricante pode ter alterado o projeto, ou seja, seu modo de fabricação, causando algumas modificações internas ao transformador. Esta nova curva deverá servir de base para futuras comparações deste equipamento, não sendo mais possível a comparação com a curva anterior.

Para se realizar um diagnóstico com base na comparação de curvas de forma qualitativa, ou seja, analisando visualmente os gráficos, deve-se levar em conta:

- Mudanças na forma da curva;
- Criação de novas freqüências de ressonância;
- Eliminação de alguma ressonância existente;
- Deslocamentos das ressonâncias no eixo de freqüência.

4.4 Modelo Físico do Enrolamento

Os enrolamentos dos transformadores são compostos de várias camadas de espiras sobrepostas umas as outras formando conjunto de bobinas, que são enroladas no núcleo.

Os enrolamentos de transformadores de potência podem ser dos seguintes tipos [7]:

- Enrolamento de disco contínuo – altas tensões e baixas correntes – enrolamentos de alta tensão;
- Enrolamento de disco entrelaçado – aumento da capacitância série do enrolamento, melhorando a distribuição da tensão de surtos de frente íngreme – enrolamentos de alta tensão;
- Enrolamento helicoidal – baixas tensões e altas correntes – enrolamentos primários de transformadores elevadores de usinas e enrolamentos de regulação;

As espiras que compõem o enrolamento de alta tensão têm uma seção reta bem menor do que as espiras de baixa tensão, uma vez que as bobinas de baixa tensão conduzem uma corrente bem maior do que as bobinas de alta. A Figura 4.2 mostra uma representação de um enrolamento de disco contínuo de um transformador de potência.

Observando-se o modelo físico do transformador, nota-se que se formam capacitâncias entre a parte lateral de cada uma das espiras, assim como entre as espiras do enrolamento de alta e de baixa tensão, dos enrolamentos ao núcleo e do enrolamento a parte lateral do tanque. Estas são capacitâncias geométricas ou transversais. As capacitâncias formadas entre as bobinas assim como as formadas entre as bobinas e a parte superior e inferior do tanque são consideradas capacitâncias série ou longitudinais.

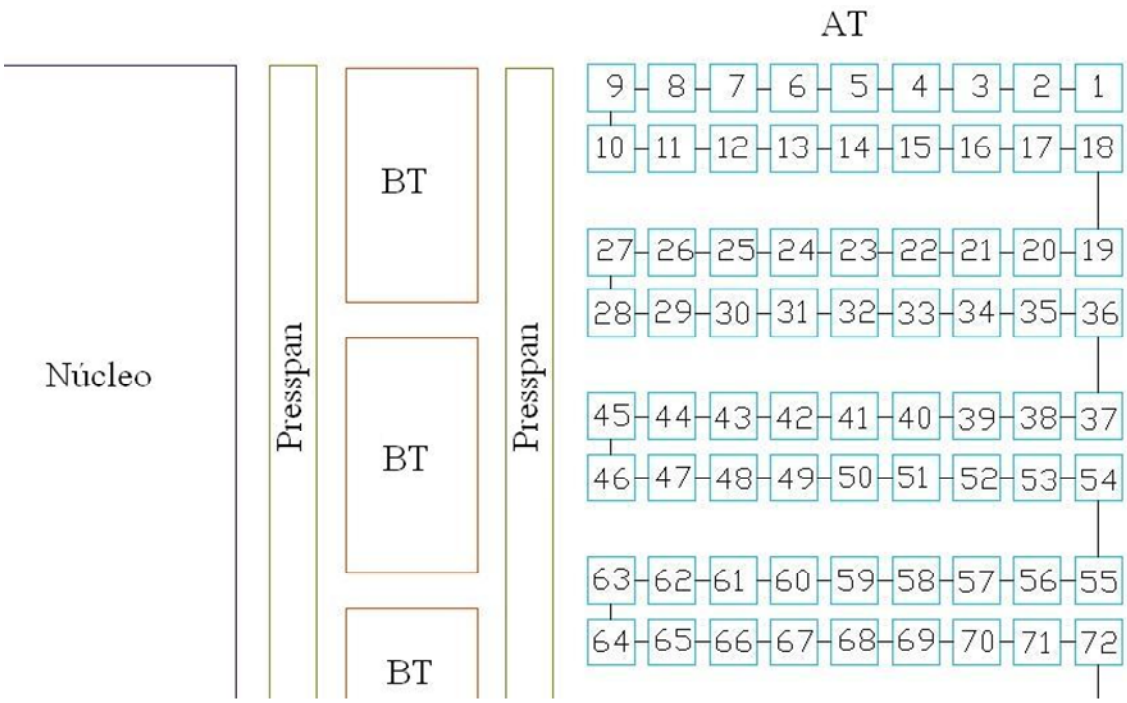


Figura 4.2: Enrolamento de disco contínuo de um transformador de potência

Pode-se notar que estas capacitâncias e indutâncias dependem das distâncias geométricas entre as espiras e os enrolamentos. Portanto pode-se associar cada defeito com uma mudança em um determinado parâmetro de acordo com a Tabela 4.1, onde são mostrados os parâmetros versus tipos de defeitos [1].

Tabela 4.1: Tipos de defeitos

Parâmetros	**Tipos de Defeitos ou Falhas**
Indutância	Deformação de disco Afundamento local Curto-circuito no enrolamento
Capacitância Geométrica	Movimento de disco Encurvamento devido a esforços mecânicos Ingresso de umidade
Capacitância Série	Envelhecimento da isolação Afrouxamento

4.5 O Material Isolante

Sabe-se que o material isolante do transformador está sujeito a contaminações ao longo do tempo. A vida útil do transformador está relacionada diretamente ao estado do isolamento elétrico e portanto este deve ser monitorado freqüentemente.

Os ensaios físico-químicos e de cromatografia de gases dissolvidos em óleo isolante analisam as propriedades do óleo e são realizados a partir de amostras retiradas do transformador. Outros ensaios como o Grau de Polimerização (GP) e o Teor de 2-Furfuraldeído podem também verificar a vida útil da isolação sólida.

As contaminações do material isolante, que podem ser devidas a umidade, alteram a permissividade relativa do óleo, do papel e do presspan. A permissividade elétrica varia com a freqüência e é calculada de acordo com a Equação 4.1:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \varepsilon_0 \varepsilon_r (1 - j \tan \delta) \qquad \textbf{(4.1)}$$

onde:

$\boldsymbol{\varepsilon_0}$ é a permissividade dielétrica no vácuo;

$\boldsymbol{\varepsilon_{rol}}$ é a permissividade dielétrica relativa do óleo;

$\boldsymbol{\varepsilon_{rpa}}$ é a permissividade dielétrica relativa do papel;

$\boldsymbol{\varepsilon_{rpp}}$ é a permissividade dielétrica relativa do presspan;

$\tan \delta$ é a tangente do ângulo de perdas.

O valor de ε_0 é $8.85434 * 10^{-12} F/m$, enquanto que $\varepsilon_{rol} \cong 2.2$, $\varepsilon_{rpa} \cong 3.4$ e $\varepsilon_{rpp} \cong 4.4$.

As variações da permissividade elétrica alteram diretamente as curvas de resposta em freqüência, variando os valores das capacitâncias de acordo com a Equação 4.2, que representa uma aproximação por um capacitor de placas paralelas.

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \qquad \textbf{(4.2)}$$

onde:

A é a área da região onde forma a capacitância;

d é a distância entre as "placas" da capacitância.

A Figura 4.3 ilustra a comparação da resposta em freqüência feita com e sem o óleo isolante em um transformador elevador de tensão 13,8/230 kV e 140 MVA de potência. No caso da ausência do óleo, é considerado que o meio esteja preenchido com ar, onde a permissividade relativa é igual à unidade. Pode-se notar um desvio para a direita em toda faixa de freqüência para a medição sem óleo isolante, aumentando a freqüência de todas as ressonâncias.

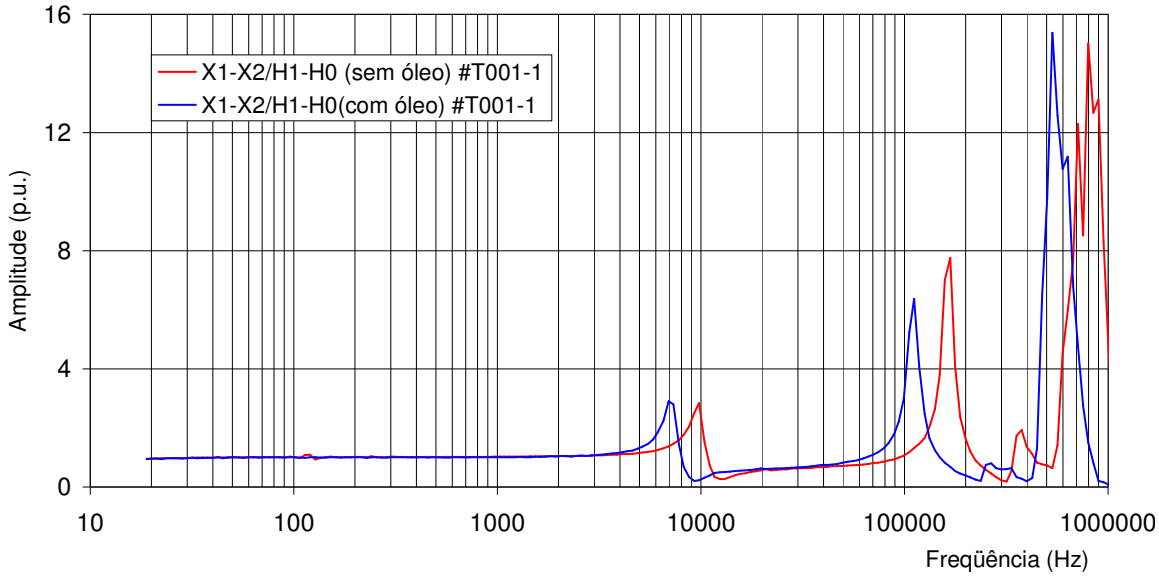


Figura 4.3: Comparação da resposta de um transformador com e sem óleo isolante

Pode-se observar também que a freqüência se desloca a partir da Equação 4.3:

$$f_r = f\sqrt{\frac{\varepsilon_{rol}}{\varepsilon_{rar}}} \qquad \textbf{(4.3)}$$

onde:

f_r é a freqüência resultante (sem óleo isolante);

f é a freqüência atual (com óleo isolante);

ε_{rol} é a permissividade relativa do óleo;

ε_{rar} é a permissividade relativa do ar;

Um transformador, ao longo de sua vida útil, tende a sofrer muitos esforços dielétricos e térmicos, alterando as propriedades do óleo isolante. Ao longo desses anos, este óleo também pode estar sujeito à umidade, alterando assim a sua permissividade relativa, o que faz alterar diretamente sua curva de resposta em freqüência, assim como mostrado.

No diagnóstico, ao se deparar com uma curva deslocada em todo o espectro de freqüência em relação à curva base, deve-se verificar também as condições do óleo. Ao longo dos anos e das possíveis contaminações do material isolante, é esperado que a curva se desloque para a direita.

4.6 Curto-Circuito

Uma das falhas mais freqüentes em transformadores de potência acontece quando, devido a solicitações (atmosféricas ou de manobra) do sistema, os enrolamentos ficam submetidos a uma sobretensão. Esta pode ser severa o suficiente fazendo com que se forme descargas parciais, que são pequenos arcos que podem aparecer entre espiras ou entre enrolamento e o tanque, ou enrolamento e o núcleo, perfurando a isolação.

Esta falha pode gerar um curto-circuito entre espiras de um mesmo enrolamento, fazendo com que a impedância vista dos terminais deste enrolamento diminua. Isto pode ser observado no gráfico de impedância terminal da Figura 4.5, de um transformador conversor de 314 MVA de potência e tensão de 500 / 127,4 kV, que sofreu uma falha devido a um curto-circuito entre as espiras.

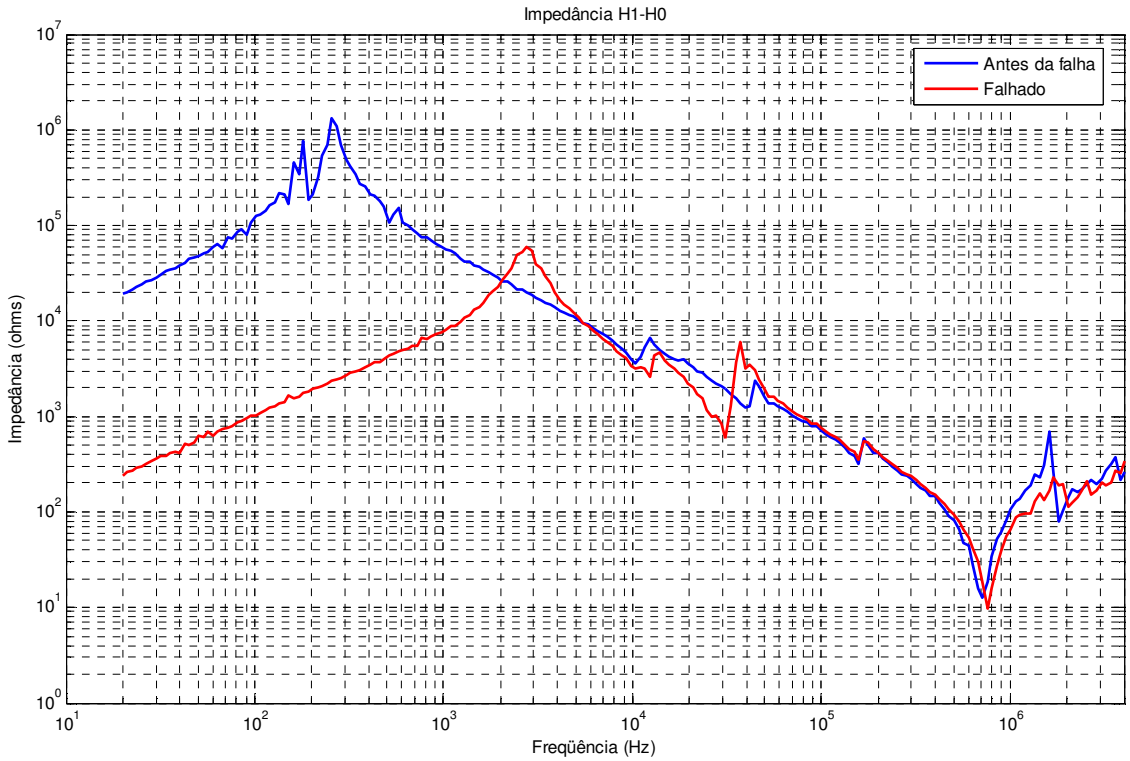


Figura 4.5: Curvas de impedância terminal antes e após o curto-circuito entre as espiras

Nota-se na Figura 4.5 que em baixas freqüências ocorre um deslocamento na curva. Através da comparação da curva de operação normal do transformador com a curva do mesmo equipamento logo após sua falha observa-se que houve uma alteração na primeira ressonância, onde a impedância diminuiu bastante com o curto que ocorreu entre as espiras do enrolamento de alta tensão.

Os curtos-circuitos são de origem indutiva e portanto alteram a região de baixas freqüências. Testes realizados em [1] mostram que a curva de impedância é bem sensível a um curto em uma única bobina, mas depois do aumento do número de bobinas curto-circuitadas a curva de impedância já não se altera tanto. Isto indica que um transformador pode sofrer uma falha e sair de operação com um pequeno curto em suas bobinas.

4.7 Núcleo

O transformador pode ser visto através do modelo clássico da Figura 4.4.

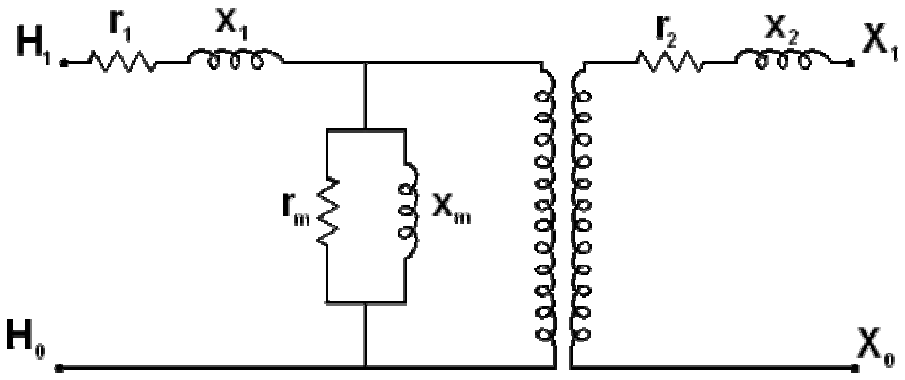


Figura 4.6: Modelo clássico de um transformador

onde:

r_1 e r_2 são as resistências de dispersão;

x_1 e x_2 são as reatâncias de dispersão;

r_m é a resistência de magnetização;

x_m é a reatância de magnetização;

No modelo da Figura 4.6 é bem sabido que a impedância vista dos terminais H1-H0 com os terminais X1-X0 do enrolamento de baixa em aberto depende principalmente dos parâmetros de magnetização do núcleo, ou seja, será pouco afetada pelos parâmetros de dispersão. Isto acontece pois a reatância de magnetização geralmente é bem maior que as reatâncias de dispersão, e por isso o núcleo influencia bem mais neste tipo de medição.

Quando a medição ocorre com os terminais de baixa tensão em curto, percebe-se que os parâmetros de magnetização podem ser desprezados, ou seja, o núcleo quase não influi na curva de impedância terminal com o secundário em curto.

Através das medições com o enrolamento de baixa em aberto e em curto-circuito, representando "enrolamento+núcleo" e somente enrolamento, respectivamente, subtraiu-se vetorialmente as curvas, traçando a influência do núcleo na curva de impedância terminal.

O gráfico da Figura 4.7 exibe em escala logarítmica estas curvas, em que pode-se perceber a influência do núcleo nas freqüências baixas. Com o aumento da freqüência percebe-se nitidamente que o núcleo deixa de ser importante. Então pode-se considerar que o núcleo influi na curva de impedância até aproximadamente 40 kHz.

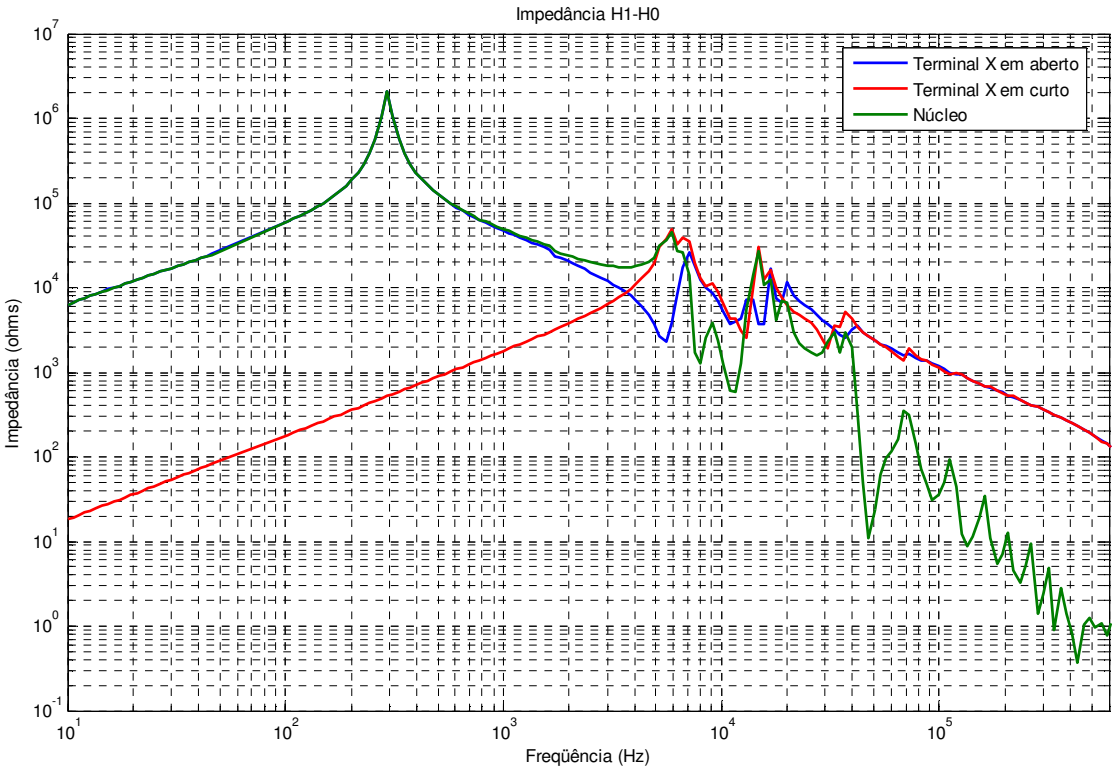


Figura 4.7: Influência do núcleo nas curvas de impedância terminal

No diagnóstico de um transformador falhado, em que a curva de impedância terminal não acusa variações na faixa de baixas freqüências, pode-se afirmar que o núcleo encontra-se em perfeito estado. Caso as diferenças sejam significativas, o defeito pode estar localizado no núcleo ou nos enrolamentos, cabendo o procedimento de analisar o restante da curva.

Em [8] é mostrado que o tipo de núcleo afeta consideravelmente a curva de impedância para freqüências abaixo de 100 kHz. Quando as espiras do secundário são curto-circuitadas, o fluxo principal no núcleo é parcialmente cancelado pelos amperes-espiras do secundário. Neste caso a impedância medida nos terminais do primário é basicamente devida ao fluxo concatenado.

As propriedades magnéticas do núcleo se alteram significativamente com a freqüência. Sob operação normal em freqüência industrial, o núcleo de ferro exibe características não lineares bem conhecidas. Entretanto o comportamento do núcleo é bastante diferente para rápidas variações no fluxo, produzidas por oscilações transitórias [8].

4.8 Modelo Matemático

Um modelo desenvolvido em [1], [2] e [4] pode ser utilizado para correlacionar o parâmetro alterado com a alteração na curva de resposta em freqüência. O modelo construído a partir de informações detalhadas sobre as características físicas dos transformadores mostra que a curva de resposta em freqüência é bem sensível a alterações na geometria dos transformadores. Assim pode-se relacionar a falha com o parâmetro alterado, ou seja, simular um defeito. Este modelo representa cada espira do enrolamento de alta tensão, incluindo os acoplamentos eletromagnéticos e eletrostáticos.

Com isso, podemos concluir de [1] que a variação da indutância do enrolamento altera a curva de resposta em freqüência aumentando a amplitude das ressonâncias, mas ainda permanecendo na mesma freqüência.

A variação da capacitância entre enrolamentos e entre enrolamento e núcleo causa uma variação na freqüência de ressonância, onde o aumento da capacitância faz com que a freqüência de ressonância diminua. O efeito contrário também é observado, ou seja, a redução da capacitância aumenta a freqüência das ressonâncias.

A variação da capacitância série faz com que a amplitude das ressonâncias da curva de resposta em freqüência se altere.

4.9 Conclusões

As condições do material isolante influenciam diretamente nas curvas no domínio da freqüência. A modificação da permissividade do papel e do óleo altera a resposta em freqüência, deslocando as curvas em todo o espectro de freqüências.

Os curtos-circuitos alteram a região de baixas freqüências da curva de impedância terminal, modificando a primeira ressonância e diminuindo o módulo da impedância.

O núcleo influencia nas baixas e médias freqüências, onde pode-se considerar que a partir de 40 kHz sua influência é mínima.

Uma mudança física nas curvas de resposta em freqüência e impedância de transformadores pode ser associada à variações nos parâmetros geométricos do equipamento, como deslocamentos do seu núcleo e enrolamentos.

A indutância e a capacitância série do enrolamento, por serem parâmetros longitudinais alteram somente a amplitude das curvas de resposta em freqüência, já os parâmetros transversais como a capacitância entre enrolamentos e a capacitância geométrica fazem com que a curva de resposta em freqüência altere suas ressonâncias e ressonâncias com deslocamentos na freqüência [1].

As variações na resposta em freqüência, ou seja, alterações nas ressonâncias e anti-ressonâncias podem ser causadas por um dos parâmetros descritos assim como uma combinação deles.

Com a variação da amplitude nas ressonâncias da curva de resposta em freqüência conclui-se que provavelmente ocorreu uma alteração na capacitância série do enrolamento, que pode ter sido causada por um envelhecimento da isolação ou afrouxamento no enrolamento. Esta variação também pode ter sido causada por uma mudança em sua indutância, que pela Tabela 4.1, pode ter sido devida a um afundamento ou deformação no disco ou até um curto-circuito.

Capítulo 5

Métodos de Comparação de Medições

5.1 Introdução

No diagnóstico de equipamentos, através dos gráficos das medições de resposta em freqüência e impedância, pode-se analisar um equipamento de maneira qualitativa. Mas surge a necessidade de encontrar uma maneira quantitativa para esta análise.

Ainda não existe uma metodologia ou critério estabelecido, desenvolvido e adotado a nível nacional ou mesmo mundial que oriente na comparação entre curvas de resposta em freqüência e impedância terminal [1].

Para um completo diagnóstico dos equipamentos, muitos autores recorrem a ferramentas computacionais como as redes neurais artificiais. Mas estas ferramentas não podem ser aplicadas diretamente nas curvas de medições dos equipamentos, como resposta em freqüência e impedância terminal. Uma maneira de se utilizar estas ferramentas é através de indicadores estatísticos que representam o quanto uma ou mais curvas estão correlacionadas ou deslocadas uma em relação à(s) outra(s), quantificando as diferenças de forma numérica e não subjetiva.

5.2 Correlação

Um método que se encontra na literatura expõe maneiras de comparar gráficos de equipamentos quando novos e dos mesmos após uma falha, comparando e tentando caracterizar o tipo de defeito a fim de facilitar no reparo do transformador.

O coeficiente de correlação foi proposto pela primeira vez como um indicador estatístico na comparação de curvas de resposta em freqüência por Xu, Fu e Li em [9] como parte de uma rede neural artificial.

Este método pode ser usado para medir a afinidade entre duas curvas de funções de transferência, representando o quanto as curvas estão correlacionadas podendo ser calculado para toda a curva ou por trechos, de acordo com a Equação 5.1.

$$\boldsymbol{r} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i - \overline{x}}{\sqrt{\mathrm{var}(x)}}\right)\left(\frac{y_i - \overline{y}}{\sqrt{\mathrm{var}(y)}}\right) \qquad \textbf{(5.1)}$$

onde:

$-1 \leq \boldsymbol{r} \leq 1$

$\overline{\boldsymbol{x}}$ e $\overline{\boldsymbol{y}}$ são valores relativos as médias das funções $\boldsymbol{x}$ e $\boldsymbol{y}$.

var(x) e ***var(y)*** são as variâncias das funções $\boldsymbol{x}$ e $\boldsymbol{y}$.

n é o numero de pontos medidos de cada função de transferência.

Este método é uma ferramenta que quantifica as diferenças entre duas curvas, de forma numérica e não subjetiva.

Através desse método pode ser diagnosticado um deslocamento nas funções de transferência, seja impedância terminal ou resposta em freqüência. Quanto mais o coeficiente de correlação estiver próximo de 1 significa que as curvas são iguais ou semelhantes, e quanto menor for este valor significa uma curva deslocada em relação à outra.

Um problema que aparece utilizando o coeficiente de correlação é que se as curvas forem múltiplas uma das outras, apenas deslocadas em amplitude podem gerar valores do coeficiente de correlação próximos a 1, resultando em falso diagnóstico de que as curvas são idênticas. Para se contornar este problema, pode-se utilizar em conjunto com o coeficiente de correlação o coeficiente de desvio de espectro.

5.3 Desvio de Espectro

O desvio de espectro foi proposto inicialmente como um indicador estatístico na comparação de curvas por Bak-Jensen, Bak-Jensen e Mikkelsen em [10].

Este método mede a afinidade entre uma dada curva e uma curva média obtida através de um conjunto de curvas de interesse. O desvio de espectro é calculado com a Equação 5.2.

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sqrt{\left(\frac{x_i - (x_i + y_i)/2}{(x_i + y_i)/2}\right)^m + \left(\frac{y_i - (x_i + y_i)/2}{(x_i + y_i)/2}\right)^m} \qquad \textbf{(5.2)}$$

onde:

$0 \leq \boldsymbol{\sigma} \leq 1$

x e ***y*** são as magnitudes de cada curva

n é o número de pontos medidos de cada função de transferência.

m é número do conjunto de curvas de interesse

Nesta equação o valor de ***m*** utilizado foi 2, pois as curvas foram comparadas com uma única curva base. Quanto maior for o valor de sigma, significa um desvio maior na curva analisada em relação à média de um conjunto de curvas, ou seja, quanto mais próximo de zero significa uma melhor relação entre as curvas.

Em [11] é demonstrado o quanto esses métodos podem resultar em diagnósticos equivocados, mostrando que o coeficiente de correlação pode gerar diagnósticos negativos falsos quando as curvas mesmo deslocadas em amplitude seguem a mesma tendência. É mostrado também que o desvio espectral sofre influência da amplitude das curvas na faixa de freqüências analisada, ou seja, quando a amplitude das curvas é pequena, o desvio espectral pode se tornar mais sensível, podendo gerar resultados ruins mesmo quando o equipamento testado não apresenta defeito.

Utilizando os métodos descritos em conjunto, se complementando, pode-se analisar quantitativamente as curvas, comparando a curva em questão com outra, ou um conjunto de outras curvas de mesma família de transformadores não defeituosos. Para isto, o problema agora é encontrar um valor limite de *r* ou σ que identifique um defeito. Um transformador poderia ser classificado como defeituoso se o coeficiente de correlação se encontrasse abaixo de um $\boldsymbol{r_{min}}$ e o desvio espectral acima de um $\boldsymbol{\sigma_{max}}$.

Para os dois métodos, pode-se dividir as regiões de interesse de acordo com suas freqüências. Essa divisão pode ser feita por décadas, calculando-se o $\boldsymbol{r}$ e $\boldsymbol{\sigma}$ para cada década de freqüência das curvas comparadas ou pode-se realizar a divisão de acordo com as três regiões de uma curva de impedância, ou seja, a região antes do primeiro máximo, entre o primeiro máximo e o primeiro mínimo, e após o mínimo.

5.4 Aplicação dos Métodos

5.4.1. 1º Exemplo

Na aplicação dos métodos citados, podemos utilizar tanto as curvas de resposta em freqüência quanto curvas impedância terminal, de forma que estes diagnósticos sejam complementares. Mas a sensibilidade da análise é aumentada principalmente para equipamentos trifásicos, quando se utilizam as técnicas de modo complementar, utilizando a resposta em freqüência para os enrolamentos de mais alta tensão e a impedância terminal para os demais enrolamentos [1].

Para o exemplo de aplicação destes métodos foi utilizado para diagnóstico um transformador monofásico de 138-23,3 kV e 11 MVA de potência. Este transformador monofásico faz parte de um banco trifásico em $\Delta - Y$ e sofreu uma falha onde a proteção teve que atuar para evitar maiores danos. Não existiam medições anteriores à falha neste equipamento. Para efeitos de comparação foram realizadas medições em dois transformadores semelhantes, que faziam parte do banco trifásico. Estes outros transformadores operavam nas proximidades do transformador falhado executando as mesmas funções, e, portanto são ideais para servirem de base de comparação para o transformador em diagnóstico. Um deles nunca tinha sofrido uma falha, portanto foi utilizado para base de comparação com o transformador falhado.

Como o transformador é monofásico, o diagnóstico só pode ser realizado utilizando-se as curvas no domínio da freqüência para um enrolamento de alta e um de baixa, totalizando quatro curvas de comparação. A correlação e o desvio de espectro foram calculados dividindo-se as regiões em décadas de freqüência, e calculando-se os indicadores estatísticos para cada região.

A Figura 5.1 exibe a curva de resposta em freqüência com aplicação do sinal no terminal de alta tensão, e medição em baixa tensão.

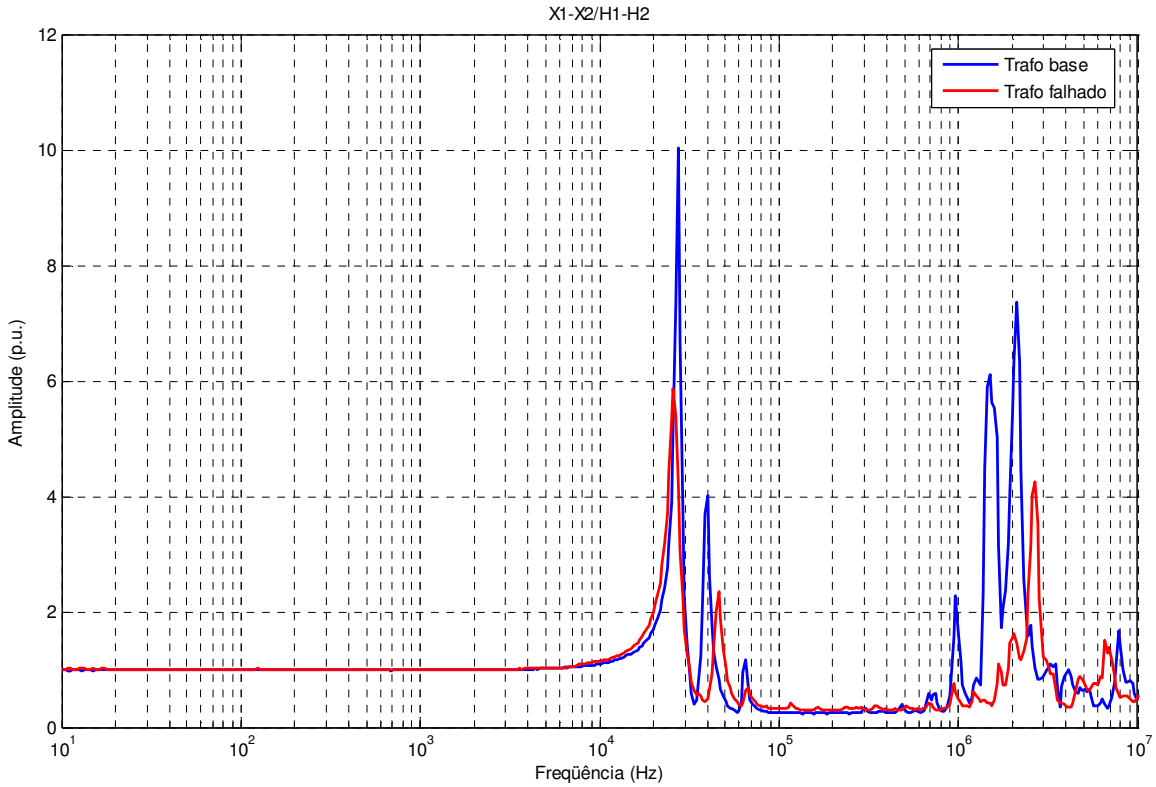


Figura 5.1: Curva de resposta em freqüência com aplicação em alta tensão

Pode-se perceber que na curva do transformador falhado houve uma atenuação das ressonâncias e um deslocamento para a direita na freqüência, em relação à curva base.

A Figura 5.2 exibe a curva de impedância do enrolamento de alta tensão. Pode-se perceber que para baixas freqüências praticamente não houve variação na curva, enquanto que para freqüências médias e altas houve diferenças significativas.

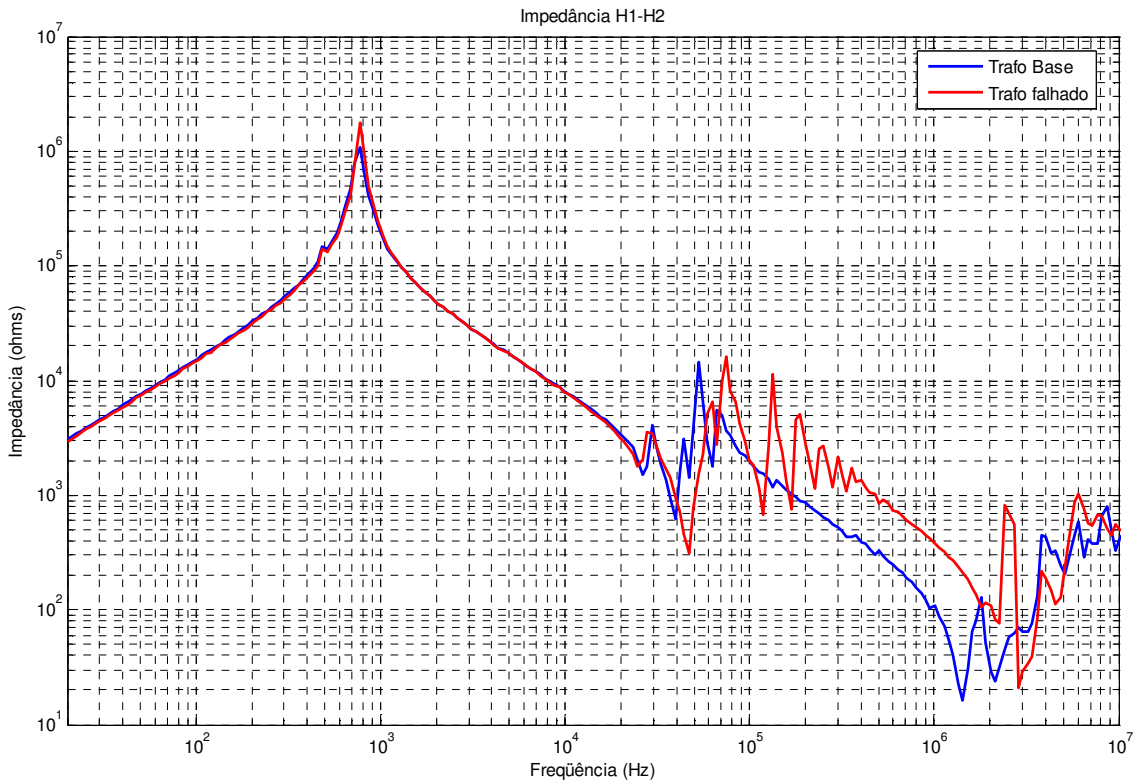


Figura 5.2: Curva de impedância terminal do enrolamento de alta tensão

A seguir é apresentada a Tabela 5.1, com as correlações e desvios espectrais para cada década de freqüência, relativos ao enrolamento de alta tensão.

Tabela 5.1

Medições	Freqüência	10Hz-100Hz	100Hz-1kHz	1kHz-10kHz	10kHz-100kHz	100kHz-1MHz	1MHz-10MHz
Resposta em Freqüência	***r***	0.99995	0.99998	0.99991	0.86868	0.83950	0.56051
	σ	0.00676	0.00517	0.00737	0.24661	0.19147	0.47738
Impedância Terminal	***r***	1.00000	0.97263	0.99977	0.73184	0.75882	0.80026
	σ	0.02509	0.05325	0.00698	0.31027	0.68521	0.58023

Pela Tabela 5.1, na análise da resposta em freqüência podemos perceber que este transformador não tem problemas na parte de baixa freqüência, pois o coeficiente de correlação fica muito próximo de 1 e o coeficiente de desvio de espectro é próximo a zero. Mas a partir de 10 kHz, o coeficiente de correlação cai bastante, principalmente para a região acima de 1 MHz. O desvio de espectro também sobe bastante, principalmente para freqüências bem altas.

Na análise da curva de impedância terminal, a correlação indica uma alteração mais grave entre 10 kHz e 100 kHz, enquanto que o desvio de espectro acusa uma maior diferença na região de 100 kHz a 1 MHz.

Mesmo que estes índices estejam apontando problemas mais graves em décadas diferentes, pode-se notar uma grande diferença nos seus valores antes e acima de 10kHz. Isto também pode ser observado diretamente na curva, pois tanto na resposta em freqüência quanto na impedância terminal, têm-se as duas curvas coincidindo bastante para baixas freqüências.

A Figura 5.3 mostra a curva de resposta em freqüência com a aplicação do sinal em baixa tensão e medição nos enrolamentos de alta tensão.

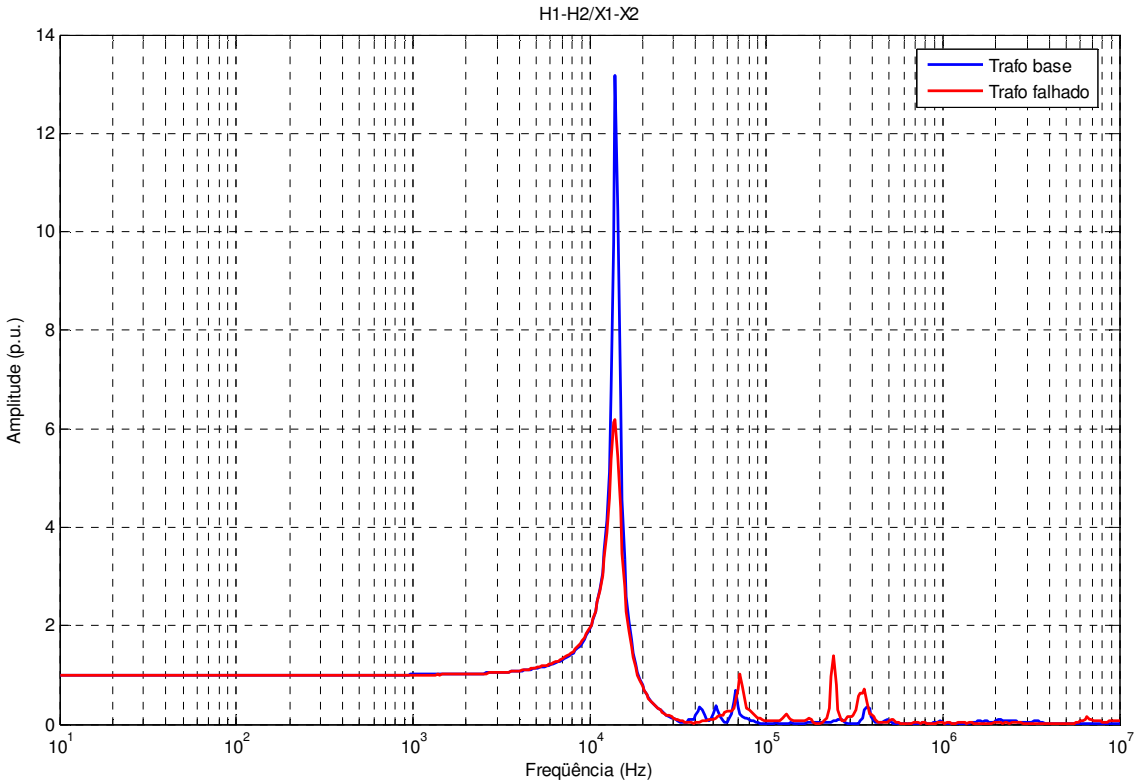


Figura 5.3: Curva de resposta em freqüência com aplicação em baixa tensão

Pode-se perceber que a ressonância se manteve aproximadamente na mesma freqüência, mas bem atenuada em relação à curva base. Para altas freqüências ocorreram alguns deslocamentos na freqüência e foram criadas algumas ressonâncias.

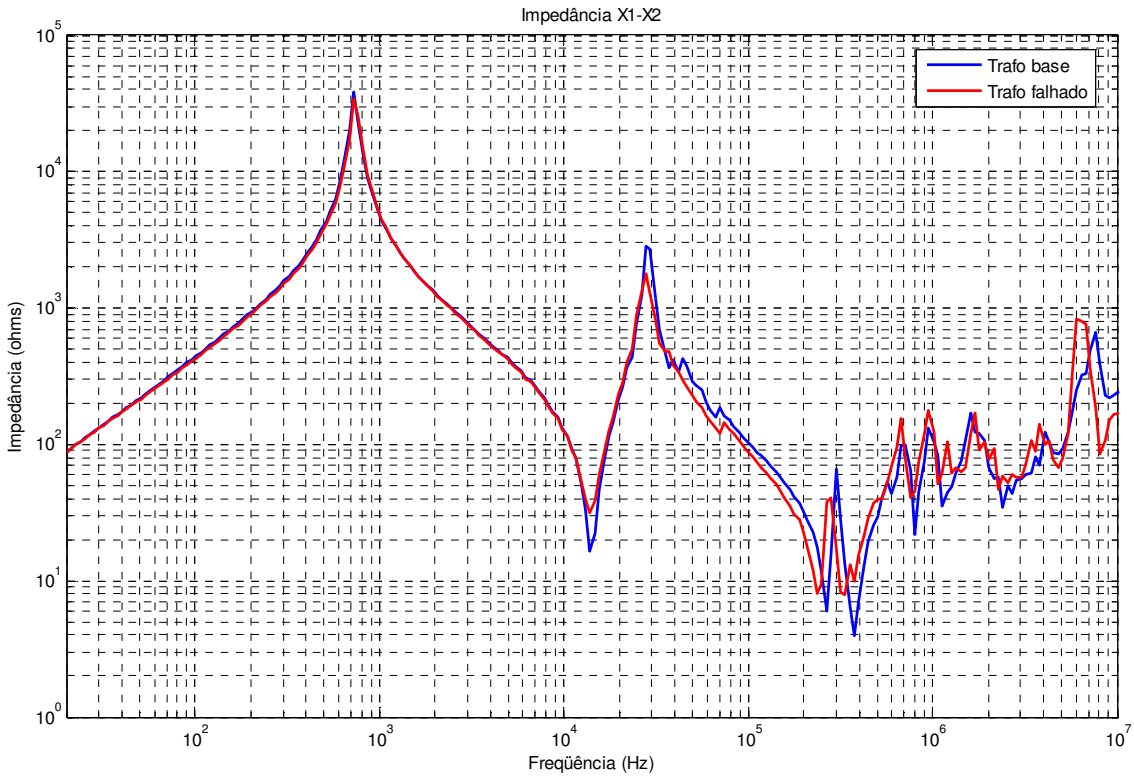


Figura 5.4: Curva de impedância terminal do enrolamento de baixa tensão

Na Figura 5.4 é apresentada a curva de impedância vista dos terminais do enrolamento de baixa tensão e pode-se notar que as curvas permanecem semelhantes em freqüências baixas. Ocorre um pequeno deslocamento para freqüências médias até uns 200 kHz, e a partir disto, apresenta um deslocamento mais significativo.

A Tabela 5.2 exibe as correlações e os desvios espectrais calculados para cada década em cada uma dessas curvas.

Tabela 5.2

Medições	Freqüência	10Hz-100Hz	100Hz-1kHz	1kHz-10kHz	10kHz-100kHz	100kHz-1MHz	1MHz-10MHz
Resposta em Freqüência	***r***	1.00000	1.00000	0.99994	0.96119	0.57293	0.60984
	σ	0.00055	0.00261	0.00542	0.35837	0.57898	0.50713
Impedância Terminal	***r***	0.99997	0.99437	0.99997	0.95483	0.93640	0.73493
	σ	0.01401	0.03778	0.00981	0.14590	0.32643	0.27559

Pelos indicadores da Tabela 5.2 pode-se perceber que na resposta em freqüência diferenças significativas só ocorrem após 1 MHz, onde a correlação diminui bastante. Para o desvio espectral, as diferenças já são perceptíveis a partir de 10 kHz. Isto pode ser explicado porque entre 10 kHz e 100 kHz a ressonância ocorre aproximadamente na

mesma freqüência, o que indicou uma boa correlação. Mas como nesta década uma curva é bastante atenuada em relação à outra, o desvio de espectro acusou uma variação perceptível. O mesmo pode ser reparado na curva de impedância terminal, onde a correlação está em um bom nível até 1 MHz, e o desvio de espectro indica uma maior variação entre 100 kHz e 1 MHz. Pode-se portanto concluir que os indicadores devem ser utilizados em conjunto, pois isoladamente um indicador pode não mostrar uma variação perceptível em uma curva.

Pode-se concluir que este transformador não teve problemas no núcleo, pois os indicadores não mostraram alterações na região de baixas freqüências da curva de impedâncias. A falha provavelmente também não ocorreu devido a um curto-circuito, pois o núcleo ainda influencia na primeira ressonância da curva de impedância. Este transformador provavelmente teve um problema com seu enrolamento, pois as modificações ocorreram principalmente na parte de médias freqüências, onde somente o enrolamento e o núcleo influenciam. Para um diagnóstico mais completo o transformador precisará ser aberto, para que o defeito seja identificado com exatidão.

5.4.2. 2º Exemplo

Um outro exemplo do diagnóstico usando os indicadores estatísticos pode ser observado no transformador de 405 MVA de potência e tensão de 13,8 / 550 kV. Este transformador elevador foi danificado no transporte à usina hidroelétrica, quando sofreu uma pequena queda na carreta, quando um de seus apoios transversais de madeira se rompeu. Utilizaram-se medições no próprio equipamento quando ainda estava na fabrica, e medições realizadas logo após o acidente.

A Figura 5.5 exibe a curva de resposta em freqüência com aplicação nos terminais de alta tensão e medição nos terminais do enrolamento de baixa tensão.

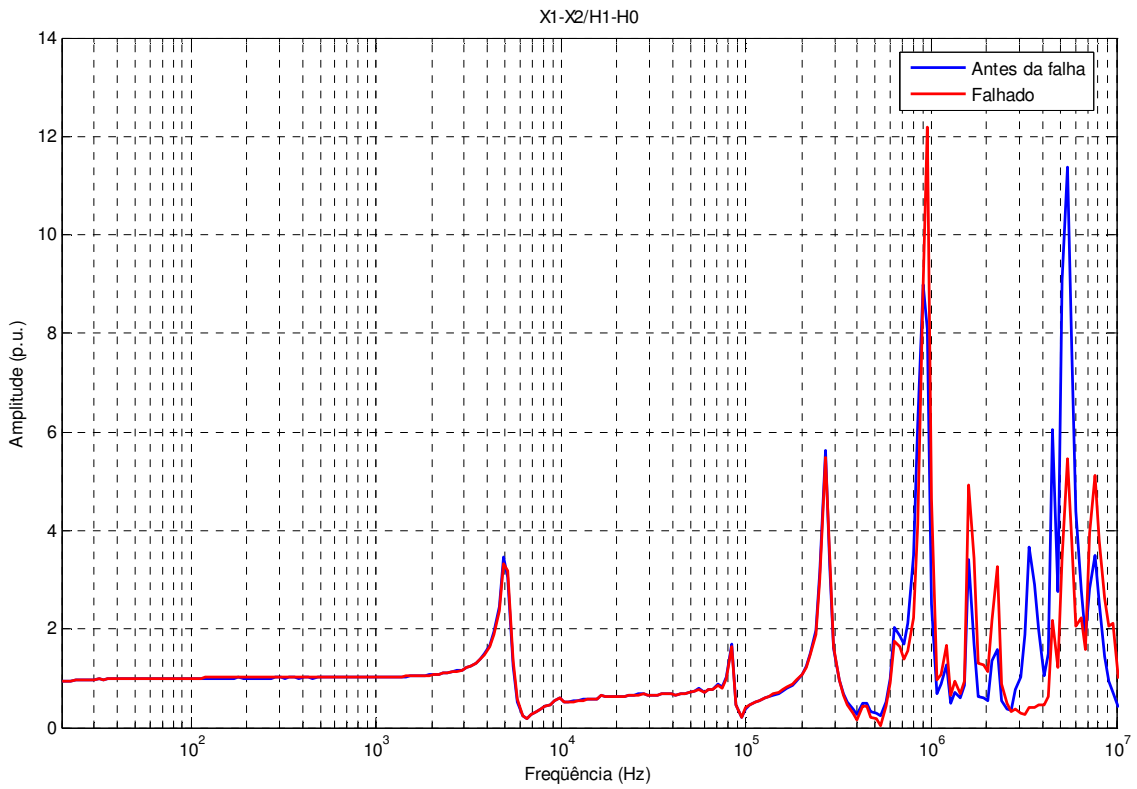


Figura 5.5: Curva de resposta em freqüência com aplicação em alta tensão

Percebe-se que a região de alta freqüência da curva se alterou com a amplificação de alguns máximos e a atenuação de outros.

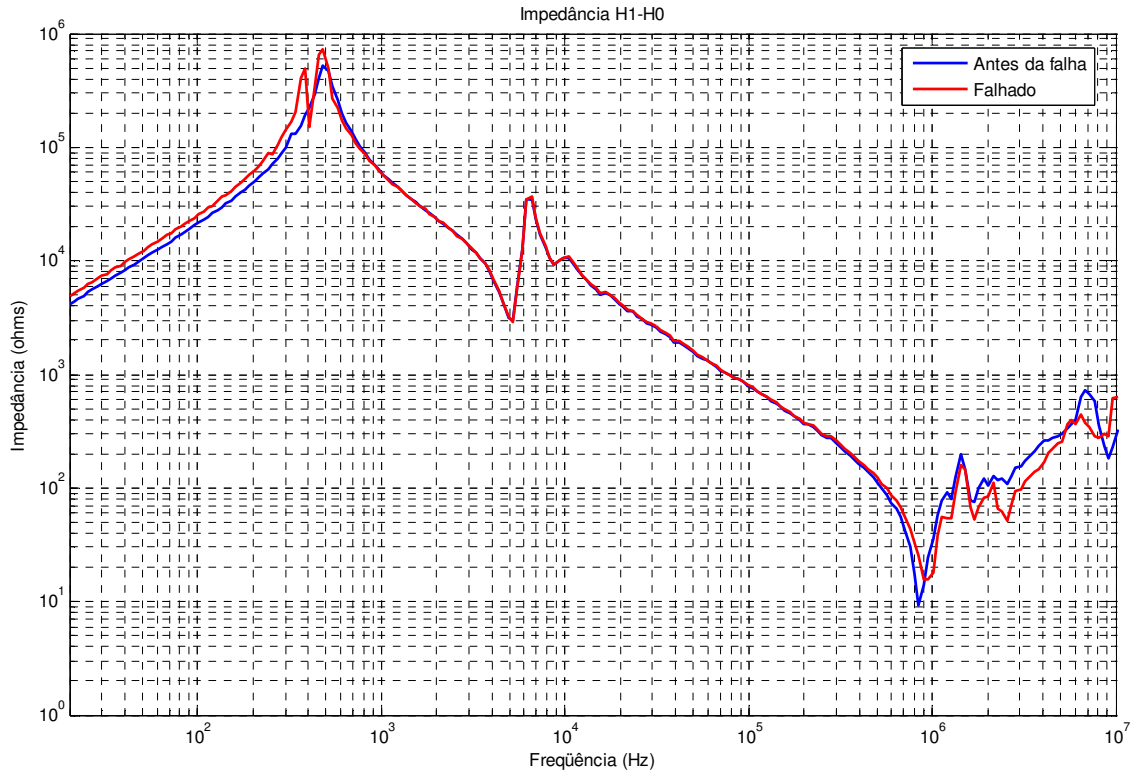


Figura 5.6: Curva de impedância terminal do enrolamento de alta tensão

A Figura 5.6 mostra a curva de impedância no enrolamento de alta tensão, onde podemos observar que ocorreu um deslocamento na curva para baixas freqüências e para médias freqüências não existe nenhum problema aparente. Na região de freqüências altas, podem-se observar algumas diferenças significativas.

A Tabela 5.3 exibe o coeficiente de correlação e desvio de espectro calculados também para cada década de freqüência, relativo às Figuras 5.5 e 5.6.

Tabela 5.3

Medições	Freqüência	10Hz-100Hz	100Hz-1kHz	1kHz-10kHz	10kHz-100kHz	100kHz-1MHz	1MHz-10MHz
Resposta em Freqüência	r	1.00000	1.00000	0.99949	0.99990	0.96136	0.81588
	σ	0.00096	0.00247	0.01068	0.00678	0.12700	0.46434
Impedância Terminal	r	0.99997	0.94803	0.99969	0.99998	0.99973	0.89249
	σ	0.11360	0.15951	0.01045	0.01217	0.09123	0.26542

Nesta tabela observa-se que a correlação não acusa defeitos graves na resposta em freqüência nem na impedância terminal. O coeficiente desvio de espectro por sua vez, indica uma variação notável para freqüências acima de 100 kHz na resposta em freqüência, abaixo de 1 kHz e acima de 1 MHz para a impedância terminal.

Para o enrolamento de baixa tensão pode-se observar na Figura 5.7 que as duas curvas se mantém muito semelhantes, e portanto este defeito não é percebido.

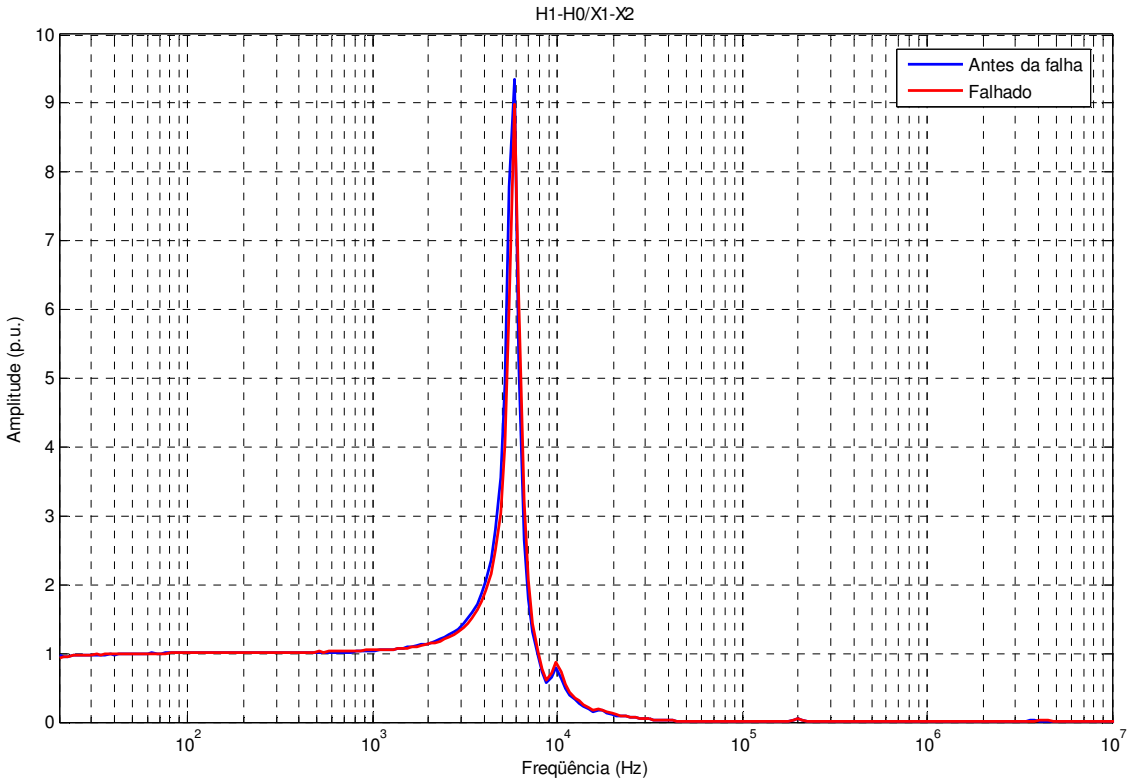


Figura 5.7: Curva de resposta em freqüência com aplicação em baixa tensão

Na Figura 5.8, observa-se um fenômeno semelhante à Figura 5.6 onde ocorrem variações nas faixas de alta e baixa freqüência. Para médias freqüências a curva com o transformador falhado continua semelhante à curva antes da falha.

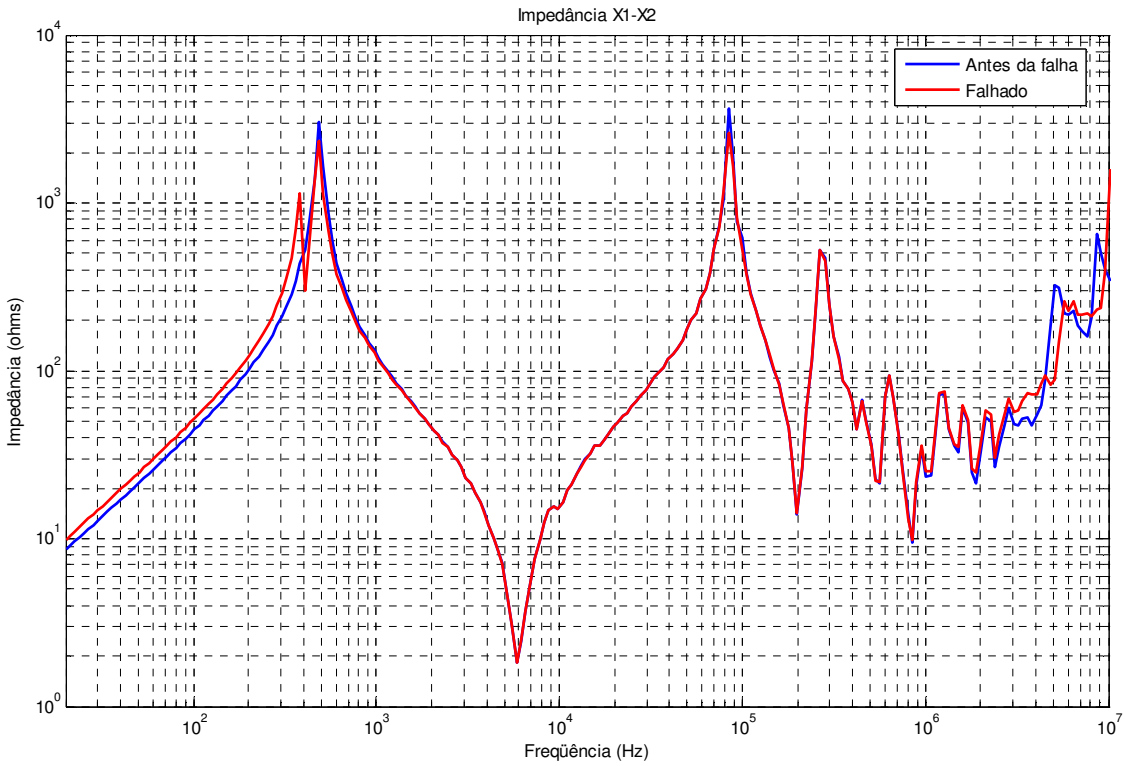


Figura 5.8: Curva de impedância terminal do enrolamento de baixa tensão

Na Tabela 5.4 estão os indicadores estatísticos relativos as Figuras 5.7 e 5.8, mostrando que a correlação da resposta em freqüência, mesmo não visualizando diferenças significativas na faixa de alta freqüência, indica uma alteração. A correlação da impedância terminal indica que uma variação grave ocorre apenas para freqüências acima de 1 MHz.

O desvio de espectro acusa uma alteração somente para freqüências altas na resposta em freqüência e indica alterações abaixo de 1 kHz e acima de 1 MHz na impedância terminal.

Tabela 5.4

Medições	Freqüência	10Hz-100Hz	100Hz-1kHz	1kHz-10kHz	10kHz-100kHz	100kHz-1MHz	1MHz-10MHz
Resposta em Freqüência	***r***	0.99998	0.99999	0.99096	0.99972	0.99863	0.76125
	σ	0.00243	0.00619	0.04460	0.04562	0.06728	0.46411
Impedância Terminal	***r***	0.99999	0.95674	0.99997	0.98837	0.99987	0.61691
	σ	0.10142	0.15582	0.00541	0.01536	0.01295	0.17947

Estas variações na curva de impedância para baixas freqüências indicam danos no núcleo. Provavelmente, o choque do fundo do transformador com a carreta fez com que o núcleo se deslocasse, o que pode ser comprovado por alterações nesta faixa de freqüência. A faixa de altas freqüências na curva de impedância onde a correlação também identificou alterações significativas indica um outro problema, provavelmente a ligação do enrolamento à bucha, pois esta é uma região onde aparecem os problemas de conexões.

5.5 Conclusões

Para comparação entre as curvas, é fundamental que as mesmas tenham sido previamente tratadas e qualificadas eliminando-se possíveis interferências, principalmente durante a fase de medição. Uma curva mal medida fazer com que os indicadores mostrem um deslocamento equivocado na curva.

O coeficiente de correlação pode gerar um falso diagnóstico se as curvas estiverem deslocadas somente na freqüência. Isto pode ser facilmente resolvido ao utilizar o coeficiente de desvio de espectro de forma complementar. Os dois indicadores devem ser calculados e observados juntos para que as alterações nas curvas sejam corretamente identificadas.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

As técnicas no domínio da freqüência apresentadas, ou seja, a resposta em freqüência e a impedância terminal são sensíveis a alterações nos parâmetros geométricos dos transformadores. Deslocamentos no núcleo ou nos enrolamentos alteram as indutâncias e capacitâncias internas do transformador, alterando também sua curva no domínio da freqüência.

Como a resposta em freqüência é menos sensível a defeitos oriundos dos enrolamentos de menor tensão, as técnicas devem ser utilizadas em conjunto, de forma complementar, com finalidade de aumentar a exatidão do diagnóstico.

Para traçar os gráficos correspondentes às técnicas, pode-se utilizar um programa de banco de dados. Este banco de dados armazena as informações de todas as medições, auxiliando no momento da comparação de curvas.

Atualmente muitos trabalhos discutem a importância dos diagnósticos de transformadores utilizando medições no domínio da freqüência. Mas este tema ainda está em evolução, pois ainda não se tem conhecimento com profundidade sobre todos os deslocamentos das curvas em função das alterações na geometria dos transformadores.

Os métodos do coeficiente de correlação e de desvio de espectro são bastante eficientes para identificar alterações nas curvas de resposta em freqüência e impedância terminal. Mas esta eficiência só é garantida se estes indicadores forem utilizados em conjunto, se complementando. O cálculo destes indicadores para cada década de freqüência ajuda a selecionar com mais exatidão a faixa de freqüências deslocada.

6.2 Trabalhos Futuros

Pode-se modelar um transformador de potência pelo método dos elementos finitos, traçando sua curva de impedância terminal e resposta em freqüência. A partir disso, pode-se realizar alterações na geometria do transformador, analisando qual a região da curva que irá se alterar. Assim, seria possível simular defeitos, relacionando-os com as respectivas mudanças nas curvas. A principal dificuldade deste método seria modelar o transformador de forma fiel, com as suas respectivas características geométricas.

De acordo com a classificação de um defeito, um sistema automatizado que monitorasse constantemente um transformador, poderia enviar um alerta ao operador da subestação de forma a evitar maiores danos ao equipamento.

O coeficiente de correlação e de desvio de espectro poderia ser aplicado a um número maior de transformadores com suas falhas corretamente identificadas. Só assim seria possível identificar quais os valores que indicariam um defeito leve, moderado ou grave.

Referências Bibliográficas

[1] MARTINS, H. J. A., *Diagnóstico de Transformadores de Potência Através de Metodologias no Domínio da Freqüência*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

[2] HERSZTERG, K. S., *Desenvolvimento de um Modelo Matemático para Enrolamentos de Transformadores – Uma Abordagem Analítica da Resposta em Freqüência*. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

[3] 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.

[4] 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.

[5] VEGA, S., APONTE, G., URREGO, C. A., "La respuesta en frecuencia y su uso para el diagnostico de transformadores en Costa Rica", *ALTAE*, Cuernavaca Morelos, México, 2007.

[6] HERNÁNDEZ, O. N., CÁPRIO, A., REMÉDIOS, D. R., FERNÁNDEZ, A., "Introducción de las técnicas de diagnóstico en transformadores a partir de su respuesta en el dominio de la frecuencia en Cuba", *ALTAE*, Cuernavaca Morelos, México, 2007.

[7] D'AJUZ ARY... [ET AL.], *Equipamentos Elétricos, Especificações e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*, Furnas, RJ, Brasil, 1985.

[8] SOYSAL, A. O., SEMLYEN, A., "Practical Transfer Function Estimation and Its Application to Wide Frequency Range Representation of Transformer". *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 3, pp. 1627-1637, July 1993.

[9] XU, D. K., C. Z. FU, Y. M. LI. "Application of Artificial Neural Network to the Transformer Winding Deformation", paper presented at *International Symposium on High Voltage Engineering*, London, 1999.

[10] BAK-JENSEN, J., B. BAK-JENSEN, S. D. MIKKELSEN. "Detection of Ageing Phenomena in Transformers by Transfer Functions", *IEEE Transactions on Power Delivery,* v. 10, n. 1, pp 308-314, January 1995.

[11] RYDER, S. "Methods for comparing frequency response analysis measurements", *Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Boston, MA USA, 7-10 April, 2002.