

**Armando Luis Ortiz Torres**

**Diagnóstico de Transformadores de Potência Através  
da Análise da Resposta em Freqüência**

**FLORIANÓPOLIS  
2006**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Diagnóstico de Transformadores de Potência Através  
da Análise da Resposta em Freqüência**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Armando Luis Ortiz Torres**

Florianópolis, Maio de 2006.

# **Diagnóstico de Transformadores de Potência Através da Análise da Resposta em Freqüência**

Armando Luis Ortiz Torres

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Sistemas de Energia Elétrica*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

---

Prof. Jacqueline Gisèle Rolim, Dr.Eng.  
Orientadora

---

Prof. Alexandre Trofino Neto, Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

---

Prof. Jacqueline Gisèle Rolim, Dr.Eng.  
Presidente

---

Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.

---

Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.

---

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.Eng.

*"A mente que se abre a uma nova idéia jamais volta ao seu tamanho original."*

*Albert Einstein*

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, meus pais Luis e Aura, meus irmãos Jesus, Enma e Neil pelo constante apoio e incentivo.

A Camila Stumm, pelo carinho e pelos bons momentos compartilhados.

À Professora Jacqueline Gisèle Rolim, pela orientação, dedicação, incentivo e colaboração na realização deste trabalho.

Ao Professor Hans Helmut Zürn, pelas inúmeras dúvidas esclarecidas e pelo exemplo como profissional e como pessoa.

Ao Prof. Dr. Stefan Tenbohlen do Instituto de Transferência de Energia e Tecnologias de Alta Tensão da Universidade de Stuttgart – Alemanha, aos Engenheiros Marco Marin e Roberto de Aguiar da Companhia Paranaense de Energia – COPEL, pelas informações fornecidas, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos e colegas, Diego R. Moraes, Juliano R. da Silva, Carlos Monteiro Fernandes, Mariana Carneiro dos Santos, Tales Marques de Britto, Assis R. da Silva Paulo, Rodrigo Rodrigues, David Hoyos, Ricardo Hinnig, Robson Marini e muitos outros não citados, pelos bons momentos compartilhados, e a certeza que boas amizades se formaram.

A todos os membros do LABSPOT - Laboratório de Sistemas de Potência, da Universidade Federal de Santa Catarina, pelas contribuições que foram determinantes para o meu crescimento profissional e pessoal.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **Diagnóstico de Transformadores de Potência Através da Análise da Resposta em Freqüência**

**Armando Luis Ortiz Torres**

Maio/2006

Orientadora: Prof. Jacqueline Gisèle Rolim, Dr. Eng.

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Palavras-chave: Transformadores de Potência, Análise da Resposta em Freqüência, Ferramentas de Diagnóstico.

Os transformadores de potência são equipamentos muitos importantes nos sistemas elétricos de potência, por tal motivo o estudo de ferramentas de monitoramento e diagnóstico que impeçam a retirada não planejada destes equipamentos é interessante para as empresas do setor elétrico. Neste contexto, é apresentada a Análise da Resposta em Freqüência (FRA) como uma metodologia de diagnóstico de faltas em enrolamentos de transformadores de potência, que vem sendo cada vez mais utilizada no setor elétrico devido aos bons resultados obtidos com as pesquisas realizadas. Entretanto, ainda não existe uma normatização específica nem quanto à metodologia para realizar o ensaio de resposta em freqüência nem quanto à interpretação dos resultados do ensaio, que geralmente é realizada de forma visual e requer especialistas treinados para isso.

Neste trabalho de dissertação são estudadas as duas principais metodologias para a realização do ensaio de resposta em freqüência, apresentando as principais vantagens e desvantagens de cada método. Também são apresentadas as principais características da FRA no sentido de indicar correlação entre faltas e parâmetros modificados nos transformadores, fatores que influenciam as medições de FRA e considerações sobre a modelagem de enrolamentos de transformadores de potência. No tocante ao diagnóstico do estado de enrolamentos com a FRA, são analisados diagramas reais de ensaios de FRA realizados em transformadores de potência. Os dados foram separados em casos de estudo, onde, além da comparação e análise visual dos diagramas de FRA, são propostos e avaliados três indicadores numéricos estatísticos e uma rede neural artificial como ferramentas para quantificar diferenças entre as curvas, e desta forma auxiliar no diagnóstico do estado de dos enrolamentos de transformadores de potência.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **Diagnosis of Power Transformer By Frequency Response Analysis**

**Armando Luis Ortiz Torres**

May/2006

Advisor: Prof. Jacqueline Gisèle Rolim, Dr.Eng.

Area of Concentration: Electric Energy Systems

Key words: Power Transformers, Frequency Response Analysis, Diagnostic Tools.

Power transformers are very important devices in power electric systems. Thus, the monitoring and diagnosing tools which impede the unplanned removal of these devices are interesting for companies of the electric sector. For that reason, the Frequency Response Analysis (FRA) is presented as a methodology for faults diagnosis in power transformer windings. FRA has provided good results in research studies, thus its application has been increasing in the electric sector. However, there is no standardization regarding how to execute the frequency response test or how to analyze its results - which are usually evaluated in a visual way and requires trained specialists.

In this study, two main methodologies for performing FRA are analyzed, and the advantages and disadvantages of each are pointed out. There are also discussions on the abilities of FRA on indicating correlations between faults and modified parameters of the transformers; factors that influence FRA measurements and considerations about power transformer winding modeling. Regarding the diagnosis of the state of windings with FRA, some real diagrams of FRA test performed on power transformers are analyzed. Data were separated into study cases where, besides FRA diagram comparison and visual analysis, three statistical numeric indicators and one artificial neural network were proposed and evaluated as tools to quantify differences between curves and, in this way, to facilitate the diagnosis of the state of power transformer windings.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Considerações Gerais . . . . .	1
1.2	Monitoramento e Diagnóstico de Transformadores de Potência . . . . .	6
1.3	Justificativa, Proposta e Organização do Trabalho . . . . .	8
1.4	Conclusões . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Análise da Resposta em Freqüência Aplicada a Transformadores de Potência</b>	<b>10</b>
2.1	Considerações Gerais . . . . .	10
2.2	Características da Resposta em Freqüência em Enrolamentos de Transformadores de Potência . . . . .	13
2.3	Consideração sobre a Modelagem de Enrolamentos de Transformadores de Potência para a RF . . . . .	15
2.3.1	Influência das Faltas em Enrolamentos de Transformadores em Medidas de RF . . . . .	18
2.3.2	Correlação entre Faltas e Parâmetros de Transformadores de Potência	20
2.4	Metodologias para obter a Resposta em Freqüência . . . . .	22
2.4.1	Medição no Domínio do Tempo . . . . .	23
2.4.2	Medição no Domínio da Freqüência . . . . .	25
2.5	Procedimentos para a Realização do Ensaio de Resposta em Freqüência . .	28
2.6	Fatores Importantes que Afetam as Medições da RF . . . . .	29

2.6.1	Influência da Freqüência de Amostragem . . . . .	31
2.6.2	Efeito do Valor da Impedância <i>shunt</i> . . . . .	32
2.6.3	Efeito da Bucha de Alta Tensão . . . . .	33
2.6.4	Efeito da Conexão do Neutro do Enrolamento de Alta Tensão . . . . .	35
2.6.5	Efeito do Comprimento dos Condutores de Medição . . . . .	35
2.7	Histórico da Técnica de FRA e Revisão Bibliográfica . . . . .	36
2.8	Conclusões . . . . .	40
<b>3</b>	<b>Ferramentas de Diagnóstico Através da Análise da Resposta em Freqüência</b>	<b>42</b>
3.1	Considerações Gerais . . . . .	42
3.2	Indicadores Numéricos Estatísticos . . . . .	44
3.2.1	Soma do Erro Quadrático (SEQ) . . . . .	44
3.2.2	Coeficiente de Correlação (CC) . . . . .	44
3.2.3	Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL) . . . . .	45
3.3	Redes Neurais Artificiais (RNA) . . . . .	45
3.3.1	Modelo de um Neurônio . . . . .	47
3.3.2	Rede Neural Artificial tipo GRNN . . . . .	47
3.4	Conclusões . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Implementação das Ferramentas de Diagnóstico e Resultados Obtidos</b>	<b>52</b>
4.1	Considerações Gerais . . . . .	52
4.2	Análise de Dados de Ensaios de RF . . . . .	53
4.2.1	Grupo 1 - Análise de Deformações Radiais . . . . .	53
4.2.2	Grupo 2 - Análise de Ensaios de RF em Empresa do Setor Elétrico .	57
4.3	Implementação dos Algoritmos . . . . .	62
4.4	Resultados Obtidos – Análise de Deformações Radiais . . . . .	63

4.4.1	Caso de estudo 1 - Diagramas de RF da Transferência de Tensão entre Enrolamentos AT – BT . . . . .	63
4.4.2	Caso de estudo 2 - Diagramas de RF da Admitância do Enrolamento Alta Tensão . . . . .	68
4.5	Resultados Obtidos – Ensaios de RF em Empresa do Setor Elétrico . . . . .	73
4.5.1	Caso de estudo 3 - Diagnóstico de Transformador Móvel de 30 MVA	73
4.5.2	Caso de estudo 4 - Diagnóstico de Transformador de Potência de 41.67 MVA . . . . .	76
4.6	Avaliação do Desempenho dos Indicadores Numéricos e da Rede GRNN . . . . .	79
4.6.1	Grupo 1 – Análise de Deformações Radiais . . . . .	80
4.6.2	Grupo 2 – Ensaios de RF em Empresa do Setor Elétrico . . . . .	80
4.7	Conclusões . . . . .	80
<b>5</b>	<b>Conclusões Gerais e Sugestões Para Trabalhos Futuros</b>	<b>83</b>
5.1	Conclusões . . . . .	83
5.1.1	Dificuldades Encontradas . . . . .	85
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	86
<b>A</b>	<b>Aspectos Construtivos de Transformadores de Potência</b>	<b>87</b>
A.0.1	Núcleo do Transformador de Potência . . . . .	87
A.0.2	Enrolamentos de Alta e Baixa tensão . . . . .	91
A.0.3	Buchas de Alta e Baixa Tensão . . . . .	96
<b>Referências Bibliográficas</b>		<b>99</b>

# **Lista de Figuras**

1.1	Modelo de falha de transformadores de potência . . . . .	3
1.2	Distribuição de falhas em transformadores com OLTC . . . . .	5
1.3	Distribuição de falhas em transformadores sem OLTC . . . . .	5
2.1	Diagramas de RF de referência para um transformador trifásico de 41 MVA	12
2.2	Descrição esquemática de um transformador trifásico tipo núcleo envolvido	14
2.3	Resposta em baixas freqüências para um transformador trifásico . . . . .	14
2.4	Faixas de avaliação com a FRA para diferentes tamanhos de transformadores	15
2.5	Modelo de enrolamentos com parâmetros distribuídos . . . . .	17
2.6	Encurvamento de um enrolamento devido a esforços mecânicos . . . . .	20
2.7	Curto-Círcuito entre espiras de um enrolamento . . . . .	20
2.8	Deslocamento de bobinas em um enrolamento com afundamentos locais . .	21
2.9	Modelo equivalente de um enrolamento para a FRA e o equipamento de medição . . . . .	22
2.10	(a) Arranjo para a medição no IRM (b) Princípio de cálculo da função de transferência . . . . .	24
2.11	Configuração esquemática da medição da impedância/admitância com a SFRA	27
2.12	Diagramas de conexão de ensaios de RF para um transformador trifásico - $\Delta/Y$	30
2.13	Freqüência de amostragem menor que o dobro da freqüência do sinal amostrado . . . . .	32
2.14	Esquema para realizar o ensaio de RF com o IRM . . . . .	33

2.15	Medições de RF no topo e no fundo da bucha de alta tensão . . . . .	34
3.1	Modelo não-linear de um neurônio . . . . .	47
3.2	Arquitetura da rede neural artificial tipo GRNN. . . . .	48
3.3	Princípio de funcionamento interno da unidade padrão. . . . .	49
4.1	Níveis de deformação do enrolamento em estudo . . . . .	53
4.2	Enrolamento de AT a) Nível de deformação 1 b) Nível de deformação 6 . .	54
4.3	Funções de transferência - Grupo 1 . . . . .	54
4.4	Transferência de tensão AT / BT – Grupo 1 – Caso 1 . . . . .	55
4.5	Admitância do enrolamento de AT – Grupo 1 – Caso 2 . . . . .	56
4.6	Medições de RF do caso 3 – Enrolamentos de AT . . . . .	58
4.7	Medições de RF do caso 3 – Enrolamentos de BT . . . . .	58
4.8	Diagramas de RF do transformador sob suspeita de dano – caso 4 . . . .	59
4.9	Diagramas de RF – baixas freqüências – caso 4 . . . . .	59
4.10	Diagramas de RF – médias freqüências – caso 4 . . . . .	60
4.11	Diagramas de RF – altas freqüências – caso 4 . . . . .	60
4.12	Diagramas de RF do transformador de 41.67 MVA em perfeito estado . .	61
A.1	Transformador de potência trifásico (CATÁLOGO: SIEMENS, 2006) . . . .	88
A.2	Detalhe do empilhamento do núcleo (DA SILVA, 2005) . . . . .	89
A.3	a) Núcleo de transformador trifásico de 135 MVA com construção especial para baixo nível de ruído b) Núcleo de um autotransformador monofásico de 224 MVA . . . . .	89
A.4	Tipos de construção de núcleos de transformadores de potência . . . . .	90
A.5	Esquema construtivo de um transformador trifásico tipo núcleo envolvido (HARLOW, 2004) . . . . .	90
A.6	Cabo com transposição contínua . . . . .	91

A.7	Arranjo intercalado de enrolamentos . . . . .	92
A.8	Bobinagem de um enrolamento . . . . .	92
A.9	Enrolamentos empilhados tipo panqueca . . . . .	93
A.10	Enrolamento em camadas (camada simples com dois condutores em paralelo)	94
A.11	Enrolamento helicoidal durante a montagem . . . . .	94
A.12	Esquema do enrolamento tipo disco . . . . .	95
A.13	Cruzamentos internos e externos no enrolamento em discos . . . . .	95
A.14	Bucha não capacitiva . . . . .	96
A.15	Bucha capacitiva (a) aspecto (b) detalhes construtivos . . . . .	97
A.16	Bucha capacitiva (a) distribuição do campo elétrico (b) detalhe do papel impregnado em óleo do capacitor . . . . .	98

# **Lista de Tabelas**

1.1	Condições de Transformadores de Potência	4
1.2	Causas Típicas de Falhas em Transformadores de Potência	4
1.3	Componentes, Defeitos e Respectivos Métodos de Análise	7
2.1	Detectabilidade de Danos em Transformadores de Potência com a FRA	19
2.2	Variação dos Principais Parâmetros do Enrolamento em função da Falta	22
4.1	Avaliação da Transferência de Tensão entre Enrolamentos com a SEQ, sem Partição em Faixas de Freqüências	63
4.2	Avaliação da Transferência de Tensão entre Enrolamentos com a SEQ em Faixas de Freqüências	64
4.3	Avaliação da Transferência de Tensão entre Enrolamentos com o CC, sem Partição em Faixas de Freqüências	64
4.4	Avaliação da Transferência de Tensão entre Enrolamentos com o CC em Faixas de Freqüências	65
4.5	Avaliação da Transferência de Tensão entre Enrolamentos com a SAEL, sem Partição em Faixas de Freqüências	66
4.6	Avaliação da Transferência de Tensão entre Enrolamentos com a SAEL em Faixas de Freqüências	66
4.7	Avaliação da Transferência de Tensão entre Enrolamentos com a GRNN, sem Partição em Faixas de Freqüências	67
4.8	Avaliação da Transferência de Tensão entre Enrolamentos com a GRNN em Faixas de Freqüências	68

4.9 Avaliação da Admitância do Enrolamento AT com a SEQ, sem Partição em Faixas de Freqüências . . . . .	69
4.10 Avaliação da Admitância do Enrolamento AT com a SEQ em Faixas de Freqüências . . . . .	69
4.11 Avaliação da Admitância do Enrolamento AT com o CC, sem Partição em Faixas de Freqüências . . . . .	70
4.12 Avaliação da Admitância do Enrolamento AT com o CC em Faixas de Freqüências . . . . .	70
4.13 Avaliação da Admitância do Enrolamento AT com a SAEL, sem Partição em Faixas de Freqüências . . . . .	71
4.14 Avaliação da Admitância do Enrolamento AT com a SAEL em Faixas de Freqüências . . . . .	71
4.15 Avaliação da Admitância do Enrolamento AT com a GRNN, sem Partição em Faixas de Freqüências . . . . .	72
4.16 Avaliação da Admitância do Enrolamento AT com a GRNN em Faixas de Freqüências . . . . .	73
4.17 Comparação de medições de RF com a SEQ antes e depois do ensaio de trafegabilidade . . . . .	74
4.18 Comparação de medições de RF com o CC antes e depois do ensaio de trafegabilidade . . . . .	75
4.19 Comparação de medições de RF com a SAEL antes e depois do ensaio de trafegabilidade . . . . .	75
4.20 Comparação de medições de RF com a SEQ em transformador de 41.67 MVA em perfeito estado . . . . .	77
4.21 Comparação de medições de RF com a SEQ em transformador de 41.67 MVA sob suspeita de dano . . . . .	77
4.22 Comparação de medições de RF com a CC em transformador de 41.67 MVA em perfeito estado . . . . .	78
4.23 Comparação de medições de RF com o CC em transformador de 41.67 MVA sob suspeita de dano . . . . .	78

4.24 Comparação de medições de RF com a SAEL em transformador de 41.67 MVA em perfeito estado . . . . .	79
4.25 Comparação de medições de RF com a SAEL em transformador de 41.67 MVA sob suspeita de dano . . . . .	79
4.26 Avaliação dos Indicadores Numéricos e da Rede GRNN para o Grupo 1 . .	80
4.27 Avaliação dos Indicadores Numéricos para o Grupo 2 . . . . .	81

# **Lista de Siglas**

- AT** Alta Tensão
- BT** Baixa Tensão
- DGA** Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante
- FFT** Transformada Rápida de Fourier
- FP** Medição do Fator de Potência
- FPIsol** Fator de Potência do Isolamento
- FQ** Análise Físico-Química do Óleo Isolante
- FRA** Análise da Resposta em Freqüência
- GP** Grau de Polimerização
- GRNN** Rede Neural de Regressão Geral
- IRM** Método da Resposta ao Impulso
- IP** Índice de Polarização
- LVI** Método do Impulso em Baixa Tensão
- OLTC** Comutador de Tensão Sob Carga
- PDC** Corrente de Polarização e Despolarização
- RF** Resposta em Freqüência
- Risol** Resistência de Isolação
- RNA** Rede Neural Artificial
- RVM** Medição da Tensão de Retorno
- SFRA** Método da Resposta de Varredura em Freqüências

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Considerações Gerais

Os transformadores de potência são equipamentos muito importantes nos sistemas elétricos de potência, por isso, a retirada não planejada de operação destes equipamentos, decorrente de falhas, ocasiona grandes prejuízos para as empresas do setor elétrico. Estes prejuízos referem-se aos danos ao equipamento em si e às consequências operacionais dependentes da intensidade da falha ocorrida, demora da reposição do equipamento, interrupção do fornecimento de energia e suas consequências sociais. Por estes motivos, diversas técnicas de monitoramento e detecção de faltas incipientes em transformadores de potência têm sido estudadas e implementadas nos últimos anos, com a finalidade de evitar a ocorrência de falhas ou mitigar seus efeitos.

Geralmente, os transformadores de potência são equipamentos muito confiáveis, com vida útil média entre 20 e 35 anos. Na prática, com programas de manutenção adequados, a vida útil pode chegar até 60 anos. Com o aumento da idade dos transformadores, suas condições internas se alteram, degradando-se paulatinamente, aumentando bastante o risco de ocorrência de falhas. As falhas em transformadores de potência geralmente são provocadas por condições severas, como transitórios de chaveamentos, curto-circuitos, raios ou outros acidentes. Quando o transformador é novo, ele possui suficiente rigidez dielétrica e mecânica para suportar condições não usuais de operação do sistema, mas com o passar dos anos ou ocorrência de eventos no sistema, a isolamento do equipamento sofre gradativa degradação, até o ponto em que o transformador é incapaz de suportar eventos, como curto-circuitos e sobretensões transitórias (WANG; VANDERMAAR; SRIVASTAVA, 2002).

A prevenção de falhas e a manutenção dos transformadores em boas condições de operação são muito importantes para as empresas do setor elétrico. Tradicionalmente, programas

de manutenção preventiva combinada com ensaios regulares são utilizados. Com a desregulamentação do mercado energético, a fim de aumentar os lucros das empresas do setor, busca-se a redução dos custos de manutenção através da redução das rotinas de manutenção preventiva. Neste sentido, há uma tendência no setor para mudar do tradicional programa de manutenção baseado no tempo para a manutenção baseada na condição do equipamento (WANG; VANDERMAAR; SRIVASTAVA, 2002).

A mudança para a manutenção baseada na condição do equipamento resulta na redução, ou até mesmo eliminação de rotinas de manutenção baseadas no tempo. Ao invés de realizar a manutenção do transformador em intervalos predeterminados, a manutenção é realizada somente se a condição do equipamento assim o requerer. Conseqüentemente, há uma necessidade crescente de melhores técnicas e metodologias de monitoramento e diagnóstico das condições internas dos transformadores. Isto possibilitará a reparação ou substituição dos equipamentos antes da falha.

Em geral, a vida útil dos transformadores de potência está diretamente relacionada com a vida útil do papel isolante. O envelhecimento normal de transformadores de potência ocorre devido ao desgaste operacional decorrente da operação sob carga, ou seja, degradação do papel isolante do enrolamento que resulta na perda de rigidez mecânica e redução da isolação do transformador. Além do envelhecimento normal, eventos no sistema como a aplicação de forças mecânicas, solicitações térmicas excessivas, sobretensões transitórias e contaminação aceleram a perda de vida útil do transformador aumentando a probabilidade de ocorrência de falhas (WANG; VANDERMAAR; SRIVASTAVA, 2002; LAPWORTH; MCGRAIL, 1998).

Um modelo usual do processo de falhas em transformadores de potência é mostrado na figura 1.1 (LAPWORTH; MCGRAIL, 1998). Este modelo assume que existe um número de funções chaves ou parâmetros, como forças mecânicas, dielétricas e térmicas, e a falha ocorre quando a força de resistência com respeito a um desses parâmetros é excedido pelo *stress* operacional. Na figura 1.1, a abscissa representa a idade do transformador e a ordenada indica a rigidez e o desgaste. Podemos observar que a curva de força de resistência possui uma inclinação que vai aumentando com o aumento da idade do transformador. O declive se torna ainda mais pronunciado com a ocorrência de faltas (curva tracejada). Os eventos no sistema têm uma participação importante no processo de falhas, seja através da inicialização de uma falta, ou, devido a baixa força de resistência no momento do evento, ocasionando a falha do transformador em si.

É desejável, mas não sempre possível distinguir entre um processo de falhas reversível, freqüentemente denominado “defeito”, e um processo irreversível, denominado “falta”. A “condição” de um equipamento se refere à avaliação da confiabilidade esperada. A tabela 1.1 indica uma classificação das condições de transformadores de potência assim como a necessidade e viabilidade de ações corretivas (GUUINIC; AUBIN, 2001).

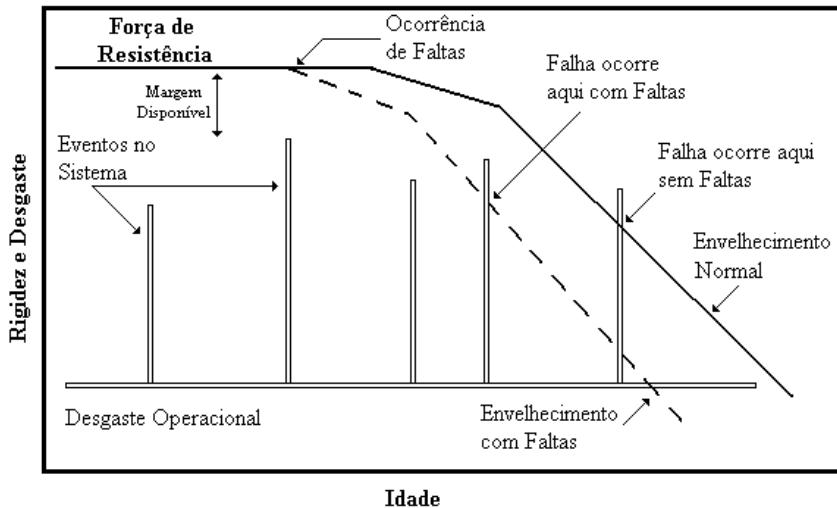


Figura 1.1: Modelo de falha de transformadores de potência

Embora o ideal fosse basear a avaliação da condição de um transformador na força de resistência ou margem disponível (figura 1.1), na prática, as ferramentas necessárias nem sempre estão disponíveis (GUUNIC; AUBIN, 2001).

Falhas em transformadores de potência podem ocorrer como resultado de diferentes causas e condições. Segundo WANG, VANDERMAAR e SRIVASTAVA (2002), as falhas de transformadores podem ser definidas como:

- Qualquer saída forçada devido a um dano no transformador em serviço ( ex. dano no enrolamento, dano no comutador sob carga, etc.)
- Problema que requeira a remoção do transformador para reparo ( ex. produção excessiva de gas, alto nível de umidade, etc.)

As falhas de transformadores de potência podem ser caracterizadas como elétricas, mecânicas ou térmicas. As causas das falhas podem ser internas ou externas. A tabela 1.2 mostra as causas típicas de falhas em transformadores de potência (WANG; VANDERMAAR; SRIVASTAVA, 2002).

Para a análise das falhas em transformadores de potência, eles podem ser divididos em dois grupos, caracterizados por possuírem, ou não, comutador de tensão sob carga (OLTC – On-Load Tap Changers). Um estudo realizado por CIGRÉ WORKING GROUP 05, 1983 (apud WANG; VANDERMAAR; SRIVASTAVA, 2002), comprovou que perto de 41% das falhas em transformadores de potência de grande porte com OLTC foram nos comutadores de tensão sob carga e perto de 19% foram nos enrolamentos. As falhas foram em 53% de origem

Tabela 1.1: Condições de Transformadores de Potência

CONDIÇÃO	DEFINIÇÃO
Normal	Sem problemas óbvios Não são necessárias ações corretivas
Defeituosa	Sem impactos significativos na confiabilidade a curto prazo, mas a vida útil pode ser afetada a longo prazo se medidas corretivas não são tomadas
Em Falta	Pode permanecer em serviço, mas a confiabilidade a curto prazo é reduzida. Pode o não ser possível melhorar a condição com medidas corretivas
Falha	Não permanece em serviço. Medidas corretivas são necessárias antes do equipamento entrar novamente em serviço. (pode não ser economicamente viável, requerendo substituição)

Tabela 1.2: Causas Típicas de Falhas em Transformadores de Potência

CAUSAS INTERNAS	CAUSAS EXTERNAS
Deterioração da Isolação	Danos por Raios
Perda do Aperto do Enrolamento	Transitórios por Chaveamentos no Sistema
Sobre-aquecimento	Sobrecarga no Sistema
Oxigênio no Papel/Óleo	Curto Circuitos
Umidade	
Contaminação por Objetos Sólidos no Óleo Isolante	
Descargas Parciais	
Defeito na Fabricação	
Ressonância no Enrolamento	

mecânica e 31% com origem no dielétrico. Em transformadores sem OLTC, 26,6% das falhas foram nos enrolamentos, 6,4% foram no circuito magnético, 33,3% foram nos terminais, 17,4% foram no tanque e fluido dielétrico, 11% foram em outros acessórios e 4,6% foram no comutador de tensão. A figura 1.2 ilustra a distribuição de falhas em transformadores de potência com OLTC e a figura 1.3 ilustra a distribuição de falhas em transformadores de potência sem OLTC.

Outro estudo realizado por GRECHKO e KALACHEVA (apud WANG; VANDERMAAR; SRIVASTAVA, 2002) diz que 51% da falhas em transformadores de potência em um período de 5 anos foi devido aos seguintes problemas: Umidade, contaminação e envelhecimento causados pela diminuição da rigidez dielétrica interna do transformador; danos aos enrolamentos ou afrouxamento dos enrolamentos causados por forças durante correntes de curto circuito elevadas e danos na bucha do transformador causadas pela perda da rigidez dielétrica da isolação interna.

No tocante a falhas em enrolamentos de transformadores de potência (não é especificado se possuem ou não OLTC), um estudo apresentado por XU, FU e LI (1999) mostra que a taxa de falhas causadas direta ou indiretamente por deformações nos enrolamentos de transformadores de potência é alta. De acordo com os autores, na China, no ano de 1997, o tempo de parada não planejada devido a problemas em enrolamentos foi 79,49% do total de tempo parado na classe de 220kV, de 72,31% para a classe de 330kV e de 98,92% na classe de 500kV.

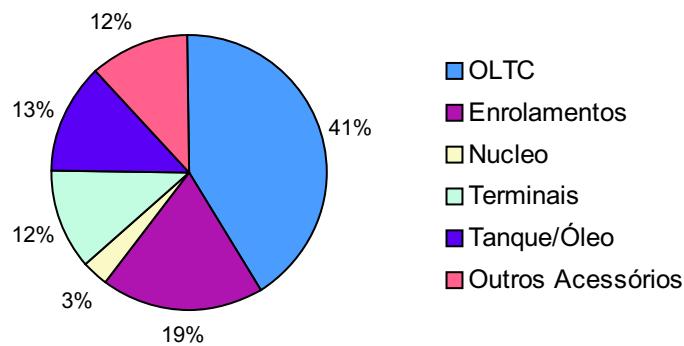


Figura 1.2: Distribuição de falhas em transformadores com OLTC

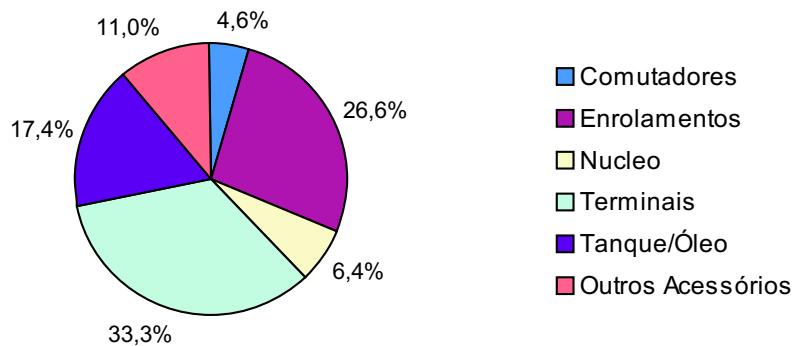


Figura 1.3: Distribuição de falhas em transformadores sem OLTC

## 1.2 Monitoramento e Diagnóstico de Transformadores de Potência

O monitoramento de transformadores de potência é definido como sendo uma coleta *on-line*<sup>1</sup> de dados e inclui desenvolvimento de sensores, técnicas de medição para aplicações em tempo real e aquisição de dados (BENGSSON, 1996). O diagnóstico de transformadores de potência contém interpretação dos dados, que podem ser coletados em tempo real ou através de medições *off-line*<sup>2</sup> nos transformadores.

Na prática, procedimentos de monitoramento e diagnóstico de transformadores de potência podem ser executados por algumas das seguintes razões (LAPWORTH; JARMAN; FUNNELL, 1995):

- para monitorar as condições dos transformadores e prover antecipadamente avisos de falhas;
- para diagnosticar problemas quando o transformador exibe sinais de perigo ou seguindo a operação dos equipamentos de proteção;
- para determinar se o transformador está em condições de suportar situações de operação não-usuais;
- para satisfazer os requisitos de segurança;
- para obter resultados de referência para ajudar na interpretação de testes subseqüentes;
- para ajudar no planejamento de estratégias de re-alocação da população de transformadores.

Para BENGSSON (1996), outra razão importante para executar procedimentos de monitoramento e diagnóstico de transformadores de potência é que o monitoramento *on-line* pode levar à mudança da manutenção baseada no tempo para a manutenção baseada na condição do equipamento.

Com as tecnologias disponíveis atualmente, é possível o monitoramento e diagnóstico de uma grande gama de parâmetros dos transformadores de potência, entretanto, com um custo relativamente alto (BENGSSON, 1996). O desafio é monitorar os parâmetros necessários para diagnosticar o estado do equipamento e garantir a confiabilidade da operação, minimizando custos. Portanto, torna-se necessário o levantamento dos defeitos associados aos principais

---

<sup>1</sup>em linha

<sup>2</sup>fora de linha

componentes dos transformadores e os possíveis métodos de monitoramento e diagnóstico para detecção destes defeitos. Desta forma, a seleção dos parâmetros a serem avaliados pode ser baseada em uma análise estatística das falhas, como as mostradas nas figuras 1.2 e 1.3. A tabela 1.3 ilustra os defeitos mais comuns nos principais componentes de transformadores de potência, com as principais metodologias de monitoramento e diagnóstico utilizadas (MORAIS, 2005).

Tabela 1.3: Componentes, Defeitos e Respectivos Métodos de Análise

COMPONENTES	DEFEITOS	MÉTODOS DE ANÁLISE
OLTC	Problemas nos Contatos	Diferença de temperat. entre o tanque principal e o compart. do comutador
	Problemas Mecânicos	Monitoramento da Corrente do Motor
BUCHAS	Umidade	FP, C, tgδ
	Descargas Parciais	FP, C, tgδ
ENROLAMENTOS	Sobreaquecimento	Termografia, Resistência Elétrica
	Perdas Elétricas Anormais	Perdas em Carga / Totais
	Deslocamento Axial e Radial (Deformação Mecânica)	FRA, Variação da Indutância
	Degrad. da Suportabilidade Dielétrica	RIsol, FPIsol
	Danos nos Condutores	Resistência Elétrica
TANQUE E CONEXÕES	Correntes Circulantes no Tanque	Emissão Infra-Vermelha
PAPEL ISOLANTE	Unimade	RVM, PDC, tgδ(f), FPIsol, Análise Furfural
	Envelhecimento	GP, Furfural, RVM, PDC, tgδ(f)
	Descargas Parciais	Descargas Parciais, DGA
	Sobreaquecimento	DGA, Termografia, Análise Furfural
ÓLEO ISOLANTE	Umidade	FQ
	Sobreaquecimento	DGA, Termografia
	Arco Elétrico	DGA, FQ
	Envelhecimento	DGA, FQ
ISOLAÇÃO COMO UM TODO	Descargas Parciais	DGA, Descargas Parciais, FQ
	Perdas Dielétricas	tgδ, FPIsol
	Contaminação	RIsol, Descargas Parciais
	Umidade	RIsol, tgδ(f)
NÚCLEO	Deterioração	Descargas Parciais
	Falhas no Núcleo	Corrente de Magnetização

Siglas Utilizadas na tabela 1.3

C	Medição da Capacitância	IP	Índice de Polarização
DGA	Análise de Gases Dissolvidos no Óleo	PDC	Corrente de Polarização e Despolarização
FP	Medição do Fator de Potência	RIsol	Resistência de Isolação
FPIsol	Fator de Potência do Isolamento	RVM	Medição da Tensão de Retorno
FQ	Análise Físico-Química do Óleo Isolante	tgδ	Fator de Dissipação a 60 Hz
FRA	Análise da Resposta em Freqüência	tgδ(f)	Fator de Dissipação em Função da Freq.
GP	Grau de Polimerização		

### 1.3 Justificativa, Proposta e Organização do Trabalho

Como observado nas figuras 1.2 e 1.3, e no estudos apresentados por XU, FU e LI (1999) e GRECHKO e KALACHEVA (apud WANG; VANDERMAAR; SRIVASTAVA, 2002), um percentual significativo das falhas em transformadores de potência ocorre nos enrolamentos destes equipamentos. Portanto, o estudo de ferramentas de monitoramento e diagnóstico do estado de enrolamentos de transformadores de potência é uma necessidade e torna-se uma alternativa viável no tocante à diminuição de custos por paradas não planejadas para as empresas do setor elétrico.

De uma forma geral, este trabalho de dissertação propõe um estudo e avaliação da metodologia de diagnóstico de enrolamentos de transformadores de potência denominada Análise da Resposta en Freqüência (FRA), e de ferramentas de auxílio ao diagnóstico com a mesma. O diagnóstico do estado dos enrolamentos de transformadores é realizado comparando diagramas obtidos com o ensaio de resposta em freqüência, que indicam ou não, a presença de avarias no enrolamento em estudo. Os diagramas de FRA comparados se referem a medições realizadas no transformador antes e/ou depois da ocorrência de algum evento que se suspeita que possa ter danificado o transformador. Procedimentos convencionais de comparação de medições de FRA utilizam comparações visuais dos diagramas obtidos, o que requer especialistas treinados para a correta interpretação das curvas diagnóstico do problema. Para contornar esta necessidade de especialistas na avaliação das curvas de ensaios de FRA, três indicadores numéricos estatísticos e uma Rede Neural Artificial tipo GRNN são propostos e avaliados no sentido de dar maior suporte à análise visual das curvas de FRA.

No capítulo 1 são apresentadas considerações sobre falhas em transformadores de potência no sentido de ilustrar o modelo usual de falhas, comentar sobre causas e condições típicas de falhas e definições pertinentes sobre condições de transformadores de potência assim como estudos estatísticos sobre distribuição de falhas nos mesmos. Além disso, são apresentadas considerações sobre monitoramento e diagnóstico de transformadores de potência no sentido de ilustrar componentes, defeitos e respectivos métodos de análise em tais equipamentos. Também no capítulo 1 são apresentados a justificativa, proposta e organização do trabalho de dissertação.

No capítulo 2 é apresentada a metodologia da Análise da Resposta em Freqüência (FRA) como ferramenta de diagnóstico do estado de enrolamento de transformadores de potência. Neste sentido, são apresentadas as características da resposta em freqüência em enrolamentos de transformadores de potência, metodologias e considerações para a realização deste ensaio, correlação entre faltas e variação de parâmetros do enrolamento, fatores importantes que afetam as medições de FRA e considerações sobre modelagem de enrolamento de transformadores para uma melhor interpretação da FRA. Finalmente, é apresentado o histórico da FRA assim como a revisão bibliográfica do trabalho.

No capítulo 3 são estudadas ferramentas de auxílio ao diagnóstico do estado de enrolamentos através da FRA, ou seja, são analisados e propostos algoritmos que calculam diferenças numéricas entre medições de FRA com indicadores numéricos e uma rede neural artificial, para desta forma auxiliar no diagnóstico de transformadores através da análise da resposta em freqüência.

No capítulo 4 são apresentadas as análises realizadas nos diagramas de FRA separados em quatro casos de estudo. As análises se referem à avaliação das curvas de forma visual e com os indicadores numéricos e a rede neural artificial, no sentido de quantificar corretamente as diferenças entre as diversas medições de FRA analisadas e desta maneira avaliar o desempenho dos algoritmos propostos. Deste modo espera-se obter o diagnóstico do estado dos transformadores estudados.

Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as considerações finais sobre a metodologia apresentada, assim como comentários pertinentes sobre os resultados obtidos nas análises dos diagramas de FRA estudados.

## 1.4 Conclusões

As técnicas de monitoramento e diagnóstico de transformadores de potência são importantes no sentido de prever a ocorrência de falhas nos equipamentos e manter o transformador em boas condições operativas, e assim, diminuir os custos de reparação e substituição destes equipamentos, que podem variar de centenas a milhões de dólares. Como mostrado neste capítulo, existem várias técnicas de monitoramento e diagnóstico específicos para componentes de transformadores de potência. Entretanto, foi observado um grande percentual de falhas associados aos enrolamentos destes equipamentos. Por este motivo, o estudo de ferramentas de monitoramento e diagnóstico do estado de enrolamentos de transformadores de potência torna-se possível, justificando pesquisas na área.

Assim, uma técnica que apresenta características atraentes no tocante ao diagnóstico eficaz do estado de enrolamentos de transformadores de potência é a Análise da Resposta em Freqüência (FRA), que é uma técnica relativamente recente e não realizada convencionalmente pelas empresas do setor. As metodologias de implementação e interpretação dos resultados da FRA ainda não estão consolidadas, motivo pelo qual pretende-se desenvolver este trabalho de dissertação com a finalidade de contribuir para uma melhor compreensão da técnica e interpretação dos resultados.

## Capítulo 2

# Análise da Resposta em Freqüência Aplicada a Transformadores de Potência

### 2.1 Considerações Gerais

De acordo com a teoria de controle, o comportamento de um sistema linear, invariante no tempo, de uma entrada e uma saída (SISO) e estável, pode ser descrito pela resposta ao impulso, ou pela sua função de transferência. Neste sentido, o sistema pode ser caracterizado através da análise do comportamento da resposta a um sinal de excitação de entrada. Esta metodologia é conhecida como Análise da Resposta em Freqüência (FRA), também denominada por vários autores (MIKKELSEN, BAK-JENSEN e BAK-JENSEN (1993), LEIBFRIED e FESER (1994), BAK-JENSEN, BAK-JENSEN e MIKKELSEN (1995), WENZEL, BORSI e GOCKENBACH (1998), CHRISTIAN et al. (1999), RAHIMPOUR et al. (2003)) como Método da Função de Transferência. Este método vem sendo gradativamente introduzido no campo de diagnóstico de transformadores de potência pelos bons resultados obtidos com as pesquisas realizadas. Geralmente, o método se mostra mais eficiente em análises realizadas em freqüências maiores que 1 kHz, onde o transformador se comporta de forma linear e o núcleo não possui uma influência determinante nos resultados. A FRA é uma metodologia de diagnóstico que pode ser utilizada no estudo e avaliação de efeitos lineares no interior de um transformador, ou seja, efeitos que mantém as características de linearidade do equipamento, como por exemplo, mudanças mecânicas e elétricas que variam a distribuição interna de capacitâncias e indutâncias, e, consequentemente, a resposta em freqüência do transformador (VAESSEN; HANIQUE, 1992).

O objetivo primário da FRA é determinar a função de transferência no domínio da freqüência do equipamento que está sendo analisado. A função de transferência representa

o circuito RLC<sup>1</sup> que modela o transformador, que é uma rede de parâmetros distribuídos contendo componentes elétricos passivos sensíveis à variação da freqüência, consequentemente, a variação destes componentes devido a danos no transformador pode ser diagnosticada (SWEETSER; MCGRAIL, 2003a)

O ensaio de resposta em freqüência consiste na medição da impedância, admitância e/ou magnitudes de tensão de enrolamentos de transformadores sob uma grande faixa de freqüências, geralmente compreendida entre 10 Hz e 3 MHz. As medições realizadas em transformadores em bom estado, desde que sejam precisas, fornecem um diagrama de resposta em freqüência de referência ou também denominado no meio técnico *impressão digital*<sup>2</sup> do transformador. Obter a *impressão digital* do transformador é importante porque é com ela que são comparadas as medições de RF (resposta em freqüência) realizadas após a ocorrência de eventos no sistema que poderiam ter danificado os enrolamentos do transformador. Desta forma é possível diagnosticar o estado em que se encontram os enrolamentos do equipamento. Se a *impressão digital* não se encontra disponível para a comparação, outras metodologias a serem discutidas posteriormente podem ser utilizadas.

No tocante à comparação entre medições de RF, a mesma é melhor realizada usando-se medições efetuadas no enrolamento antes do transformador entrar em operação e depois da falta, ou seja, comparando a *impressão digital* do transformador com a medição após o evento no sistema que causou a possível falta. É apropriado que ambas medições sejam realizadas com a mesma posição de tap e com os mesmos acessórios. Se o transformador é imerso em óleo isolante, o óleo deve ter a mesma permissividade relativa em ambas medições. Segundo RYDER (2003), a permissividade relativa é influenciada pelo tipo de óleo, a umidade relativa e o envelhecimento natural do transformador. Se for suspeitado que o óleo sofreu qualquer tipo de mudança desde a medição de referência ou se é observada uma significativa mudança na umidade relativa do mesmo, é necessário que se tenha cautela, e é aconselhável que sejam realizadas medições entre fases do mesmo transformador para uma avaliação mais confiável para complementar a comparação com as medições de referência.

A comparação entre fases é possível em transformadores trifásicos, desde que somente uma das três fases do transformador esteja danificada. Devido a diferenças na indutância de magnetização entre as fases, poderão existir diferenças entre diagramas de RF nas baixas freqüências. Em médias e altas freqüências, os resultados geralmente são bastante coerentes, mas não tão bons quanto comparações com a mesma fase em condições aceitáveis de óleo e mesma configuração de ensaio. A figura 2.1 ilustra uma medição real de RF para as três fases em um transformador trifásico de 41 MVA, 138-13.8 kV conexão Y/D. Como observado, existem pequenas diferenças nas médias e altas freqüências e diferenças significativas

<sup>1</sup>Círculo composto por resistores, indutores e capacitores

<sup>2</sup>Diagrama que depende das características físicas do transformador, e portanto, única para cada equipamento

nas baixas freqüências, portanto, estas diferenças devem ser consideradas na análise da resposta em freqüência entre fases. Para alguns transformadores, análises realizadas entre fases podem não fornecer resultados muito satisfatórios, devido ou a diferenças na configuração das ligações no ensaio ou devido aos espaços externos ao enrolamento (RYDER, 2003).

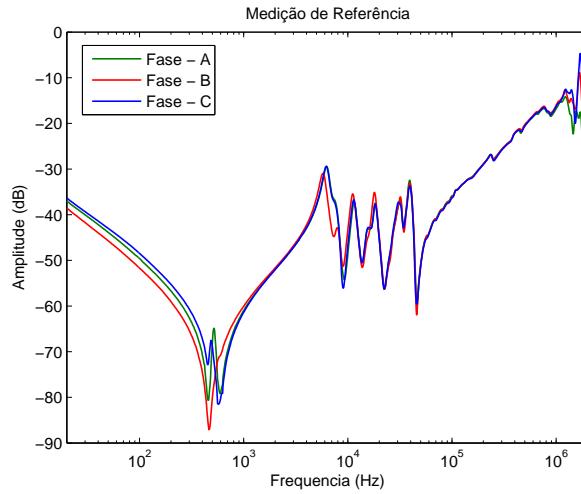


Figura 2.1: Diagramas de RF de referência para um transformador trifásico de 41 MVA

A comparação de medições de RF entre *transformadores irmãos*<sup>3</sup> também é possível. Um exemplo de utilização da técnica de FRA para esta situação é no caso de investigar danos em bancos de transformadores monofásicos. Também para este tipo de comparação, a resposta em baixas freqüências pode apresentar grandes diferenças, entretanto, em médias e altas freqüências os resultados tendem a ser satisfatórios (RYDER, 2003).

Para a realização do ensaio de resposta em freqüência, um sinal de excitação de freqüência variável é aplicado e medido na entrada do enrolamento a ser analisado, o sinal de saída do enrolamento em análise é medido e assim a função de transferência é calculada. Existem duas abordagens para injetar o sinal de excitação necessário para realizar a Análise da Resposta em Freqüência, o Método da Resposta ao Impulso (IRM) e o Método da Resposta de Varredura em Freqüências (SFRA) (RYDER, 2001; TENBOHLEN; RYDER, 2003).

<sup>3</sup>Equipamentos de mesmas características construtivas

## 2.2 Características da Resposta em Freqüência em Enrolamentos de Transformadores de Potência

A Análise da Resposta em Freqüência (FRA) pode ser dividida em três grandes faixas de freqüências para sua análise, baixas freqüências com uma faixa típica entre 10 Hz e 50 kHz, médias freqüências com uma faixa entre 50 kHz e 1 MHz e faixa de altas freqüências compreendida entre 1 MHz e 3 MHz (KIM et al., 2005).

A característica típica e principal da resposta em baixas freqüências para enrolamentos de transformadores de potência apresenta um decréscimo de amplitude da função de transferência, alcançando um valor mínimo ressonante geralmente abaixo de 1 kHz com um posterior aumento da amplitude, sendo esta ressonância causada pela interação da capacitância shunt do enrolamento com a indutância magnetizante do mesmo. No caso de haver dois caminhos para o fluxo magnético no núcleo do transformador de diferentes comprimentos, existirão dois pontos de ressonância, que poderão variar com o estado da magnetização residual do núcleo. Estes pontos de ressonância serão em diferentes freqüências também para *transformadores irmãos*, onde diferenças no processo de fabricação do núcleo produzem variações na relutância dos mesmos (RYDER, 2003).

A figura 2.2 ilustra o esquema de um transformador trifásico, tipo “núcleo envolvido” com seus enrolamentos conectados em *estrela*, como observado na figura, há dois caminhos possíveis para a circulação do fluxo magnético induzido por cada enrolamento. Os enrolamentos das fases A e C, que são as fases externas, possuem dois caminhos de relutância magnética diferente, refletido nos dois pontos de ressonância em baixas freqüências mostrados na figura 2.3. Em contrapartida, como a fase B, devido à simetria construtiva, possui dois caminhos com a mesma relutância magnética, isto resulta em apenas um ponto de ressonância, figura 2.3 (SWEETSER; MCGRAIL, 2003a).

Na RF em médias freqüências há um grupo de ressonâncias correspondente à interação entre a capacitância shunt e a indutância no núcleo de ar dos enrolamentos. Estas ressonâncias são geralmente as mais repetíveis nos ensaios de RF, ou seja, se os ensaios são realizados com padrões similares, as mesmas ressonâncias aparecerão no diagrama de resposta em freqüência de todos os ensaios. Nesta faixa de freqüências, pequenas ou até desprezíveis diferenças podem existir entre medições realizadas em *transformadores irmãos* devido ao efeito de diferenças construtivas nos enrolamentos. Diferenças mais significativas podem ser encontradas entre enrolamentos de diferentes fases em transformadores trifásicos, devido a diferenças nas configurações das ligações ou espaçamentos externos ao enrolamento (RYDER, 2003).

Em altas freqüências observa-se nas medições de RF um grupo confuso de freqüências

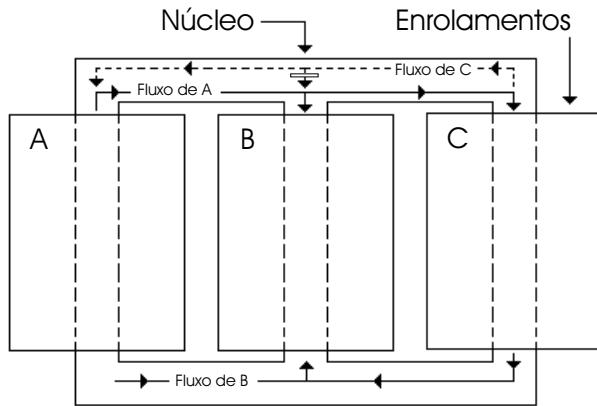


Figura 2.2: Descrição esquemática de um transformador trifásico tipo núcleo envolvido

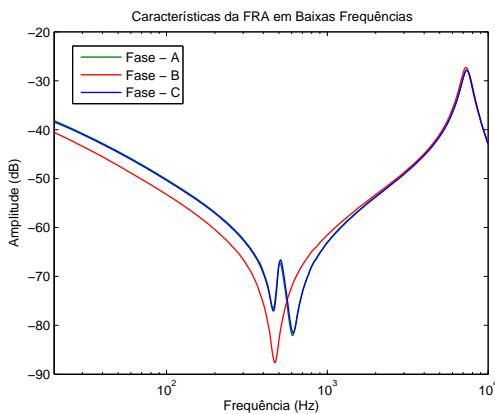


Figura 2.3: Resposta em baixas freqüências para um transformador trifásico

ressonantes correspondentes à interação de capacitâncias séries e shunts com a indutância do núcleo de ar de parte dos enrolamentos. Como nas médias freqüências, a resposta em altas freqüências é afetada pelos aspectos construtivos do enrolamento, configuração das ligações e espaçamentos externos ao enrolamento. Em altas freqüências a influência dos cabos de medição torna-se importante, principalmente em grandes transformadores (RYDER, 2003).

De uma forma geral, um transformador possui um número limitado de ressonâncias em seu diagrama de resposta em freqüência, o que está diretamente relacionado com as características construtivas dos enrolamentos do equipamento (VAESSEN; HANIQUE, 1992). Foi observado por VAESSEN e HANIQUE (1992) que um transformador com enrolamento de camada única e sem OLTC possui um número menor de freqüências de ressonâncias que um transformador com enrolamentos em discos ou equipados como OLTC's e um grande número de posições de tap; além disso, as ressonâncias maiores se encontram na faixa entre poucos kHz e algumas centenas de kHz, dependendo do tamanho do equipamento. Em geral,

transformadores maiores possuem freqüências de ressonâncias menores que transformadores de menor tamanho. A figura 2.4 (ADIMARCO, 2006) mostra a faixa de avaliação com a FRA para diferentes tamanhos de transformadores. Observa-se que a avaliação com FRA fica restrita a uma faixa de freqüências menor, devido à maior influência do circuito de medição em transformadores maiores. A figura 2.4 pode ser utilizada para a especificação das faixas de freqüência (baixas, médias e altas) de acordo com o tamanho dos transformadores de potência (PT) ou distribuição (DT).

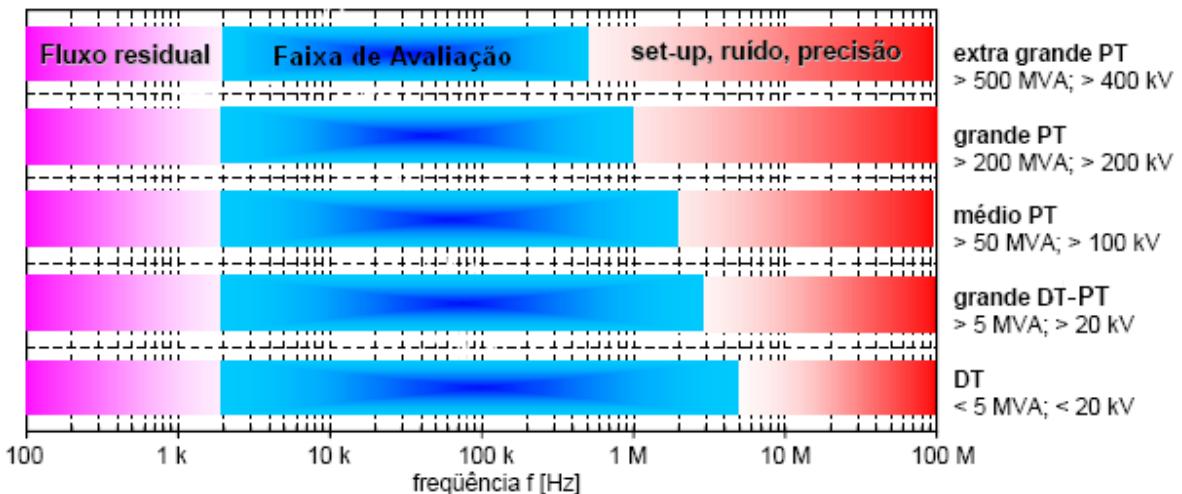


Figura 2.4: Faixas de avaliação com a FRA para diferentes tamanhos de transformadores

Aspectos construtivos das principais partes de transformadores de potência são apresentados no apêndice A, onde são discutidos variações construtivas e materiais empregados na fabricação do núcleo, enrolamentos e buchas, os quais afetam o modelo do transformador e sua resposta em freqüência.

## 2.3 Consideração sobre a Modelagem de Enrolamentos de Transformadores de Potência para a RF

A modelagem de sistemas complexos, como são as partes ativas de transformadores de potência, é um compromisso entre a exatidão e a complexidade do modelo. O número de elementos básicos (resistores, indutores e capacitores) e consequentemente a exatidão do modelo são limitados. Entre diferentes modelos propostos, a seguinte classificação pode ser utilizada: (RAHIMPOUR et al., 2003)

- Modelos tipo *Caixa Preta*

- Modelo baseado na análise modal
- Descrição por pólos e zeros
- Modelos Físicos
  - Modelo de linhas de transmissão de  $n$  fases
- Modelos detalhados (parâmetros distribuídos)
  - Modelos baseados na indutância mútua e auto-indutância
  - Modelos baseados na indutância de dispersão
  - Modelos baseados nos campos eletromagnéticos
- Modelos híbridos
  - Combinação de Modelos tipo *Caixa Preta* e Modelos Físicos

Os modelos tipo caixa preta não são apropriados na modelagem de deslocamento de enrolamento de transformadores de potência, pelo motivo que eles representam somente o comportamento do transformador apenas em seus terminais. Os modelos físicos são baseados na geometria do enrolamento e seus circuitos são modelados com parâmetros concentrados. Estes modelos também são válidos para análise em altas freqüências (RAHIMPOUR et al., 2003).

A modelagem de enrolamentos com o modelo detalhado, ou seja, uma rede R-L-C-M<sup>4</sup> com parâmetros distribuídos permite o cálculo de correntes e tensões utilizando ferramentas comuns de análise e de redes, por exemplo, Alternative Transient Program (ATP), Pspice, etc. Em adição, é possível considerar não-linearidades como histerese e saturação, e efeitos dependentes da freqüência como correntes parasitas e perdas no dielétrico. Enrolamentos complexos podem ser modelados por várias camadas de bobinas (RAHIMPOUR et al., 2003).

Na modelagem de um enrolamento com parâmetros distribuídos, ele é separado em unidades menores, as quais podem ser constituídas de um disco, dois discos ou várias espiras. Um modelo de parâmetros distribuídos interessante foi proposto por RAHIMPOUR et al. (2003). Este modelo representa um enrolamento primário com 30 unidades de enrolamento de discos duplos e o enrolamento secundário de uma camada com 23 espiras. Este modelo pode ser utilizado para a análise da resposta em freqüência em uma faixa de freqüências compreendida entre 10 kHz a 1 MHz. A figura 2.5 ilustra o modelo proposto pelo autor indicando apenas três unidades de enrolamento por motivos de simplicidade. Os parâmetros do modelo são, as indutâncias próprias  $L_i$ , indutâncias mútuas  $L_{ij\pm 1}$ , capacitâncias paralelas

<sup>4</sup>Círculo composto por resistores, indutores, capacitores e indutâncias mútuas

$C_i$ , capacitâncias série  $k_i$ , resistências do condutor  $R_{si}$ , e  $R_{pi}$  e  $R_{ei}$  que representam as perdas no dielétrico entre espiras e entre enrolamento e a terra respectivamente, sendo ambos termos dependentes da freqüência. Os parâmetros foram calculados analiticamente depois de algumas simplificações a partir da estrutura geométrica dos enrolamentos (RAHIMPOUR et al., 2003).

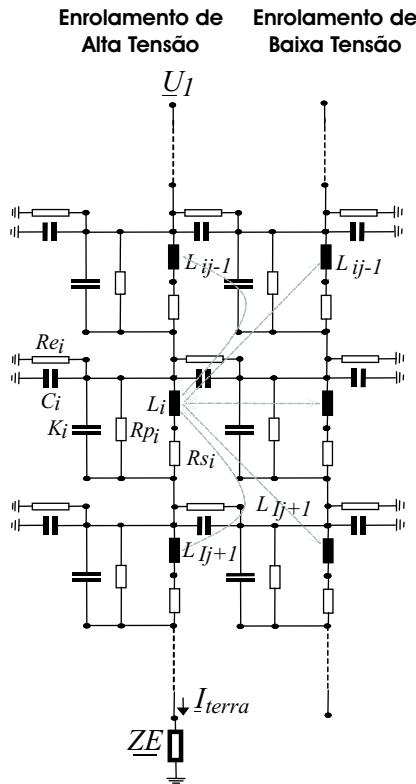


Figura 2.5: Modelo de enrolamentos com parâmetros distribuídos

Outro modelo de enrolamento de transformador analisado foi o proposto por HERSZTERG (2004). Neste modelo, orientado para análise em altas freqüências, o enrolamento foi tratado como uma linha de transmissão longa, monofásica, balanceada, de parâmetros distribuídos e dependentes da freqüência, para o cálculo das tensões e correntes. Os parâmetros foram calculados a partir das características construtivas do transformador, que refletem com muito mais fidelidade o comportamento transitório do enrolamento, pois as tensões e correntes em seus terminais são fortemente dependentes da freqüência, envolvendo fenômenos ressonantes (HERSZTERG, 2004).

Entre todas as abordagens de modelos baseados em parâmetros distribuídos, o primeiro, que é baseado na indutância mútua e na auto indutância é o mais apropriado para a descrição do comportamento do campo magnético, entretanto, segundo RAHIMPOUR et al. (2003) deve ser considerado que:

- O modelo detalhado R-L-C-M é determinado exclusivamente pelas dimensões geométricas e é válido para a faixa de freqüências compreendida entre poucos kHz ( $\pm 10$  kHz) e aproximadamente 1 MHz.
- A descrição baseada na geometria do enrolamento permite uma consideração simplificada de localização de faltas no dielétrico do enrolamento.

A modelagem de enrolamentos de transformadores de potência é importante no sentido de melhorar a compreensão da variação da função de transferência do enrolamento com a modificação de parâmetros envolvidos no modelo, simulando desta forma faltas no enrolamento. Entretanto, é muito importante entender a diferença entre um equipamento físico e o modelo matemático que o representa. Quando um transformador de potência é analisado, pela complexidade do circuito, geralmente a modelagem é realizada de forma simplificada, utilizando-se modelos em que são desprezados parâmetros infinitesimais, que em uma análise considerando um dado intervalo de freqüências podem ter influências significativas nos resultados. Quando equipamentos elétricos são analisados sob uma ampla faixa de freqüências, elaborar um modelo de parâmetros distribuídos apropriado que represente satisfatoriamente o equipamento torna-se complicado (SWEETSER; MCGRAIL, 2003a).

### **2.3.1 Influência das Faltas em Enrolamentos de Transformadores em Medições de RF**

Para que uma falta em um enrolamento seja detectável, ela deve causar uma variação significativa das capacitâncias ou indutâncias do enrolamento de um transformador de potência, caso contrário (descargas parciais é o exemplo mais provável), a falta não é detectável com a FRA. Existem faltas que podem tornar-se detectáveis a partir do momento em que tornam-se suficientemente severas ao ponto de causar danos secundários no enrolamento, por exemplo, espiras em curto circuito, danos mecânicos locais no enrolamento, etc (RYDER, 2003).

A tabela 2.1 (RYDER, 2001) ilustra a natureza de faltas que podem ou não ser detectadas com a Análise da Resposta em Freqüência.

Faltas como espiras em curto circuito e voltas adicionais, mudam as características de magnetização do transformador, e produzem grandes variações na RF em baixas freqüências. Faltas que criam a circulação de corrente em malha fechada (múltiplos núcleos aterrados por exemplo), interferem no fluxo magnético do núcleo e causam pequenas variações na RF em baixas freqüências (RYDER, 2003; RYDER, 2002b).

A resposta em médias freqüências é sensível a faltas que causam mudanças em todas as propriedades dos enrolamentos. Um aumento considerável nas ressonâncias em médias

Tabela 2.1: Detectabilidade de Danos em Transformadores de Potência com a FRA

NATUREZA DA FALTA	DETECTABILIDADE
Núcleo não Aterrado	Não Detectável
Objetos Estranhos no Tanque	Não Detectável
Perda da Pressão de Aperto do Enrolamento	Usualmente não Detectável
Aterrramento Múltiplo do Núcleo	Usualmente não Detectável
Envelhecimento Normal	Detectável (se for muito severo)
Danos Mecânicos ao Núcleo	Detectável (se for muito severo)
Voltas Adicionais	Detectável
Espiras em Curto Circuito	Detectável
Danos Mecânicos ao Enrolamento	Detectável
Espiras Frouxas	Detectável

freqüências indica normalmente movimento axial no enrolamento, entretanto, um decréscimo considerável das ressonâncias em médias freqüências indica normalmente movimento radial do enrolamento interno, conhecido também como encurvamento do enrolamento ou *hoop buckling*. Pequenas diferenças são freqüentemente aceitas como sendo o resultado do ajuste natural do enrolamento (RYDER, 2003).

A resposta em altas freqüências é sensível a faltas que causam mudanças em propriedades de partes dos enrolamentos. Danos localizados no enrolamento causam aparentemente mudanças aleatórias na resposta em altas freqüências, freqüentemente levando à criação de novas freqüências ressonantes. A resposta em altas freqüências pode também ser afetada pelo tanque do transformador ou pelo cabo de aterramento. Tanques mal aterrados são facilmente detectáveis tendo em vista que afetam a RF de todos os enrolamentos, isto considerando que outros tipos de danos geralmente afetam um enrolamento ou no máximo os enrolamentos de uma fase. Cabos fracamente aterrados são mais difíceis de detectar através da FRA porque causam mudanças em apenas um enrolamento e é improvável que levem à criação de novas freqüências de ressonância (RYDER, 2003).

As faltas que afetam a resposta em baixas freqüências podem ser todas detectadas com bastante facilidade utilizando outras técnicas de diagnóstico: espiras em curto circuito podem ser detectadas através do método de corrente de magnetização ou medindo a relação de espiras, a circulação de correntes em malha fechada pode ser detectada através de DGA ou imagem térmica, e núcleos não aterrados podem ser detectados através da medição da capacidade. Por outro lado, as faltas que causam variações em médias e altas freqüências são difíceis de diagnosticar através de outras técnicas. Neste contexto a FRA se caracteriza por ser uma técnica bastante promissora na avaliação de faltas em transformadores de potência.

As figuras 2.6, 2.7 e 2.8 ilustram imagens reais de faltas em enrolamentos de transformadores de potência. A figura 2.6 ilustra o encurvamento de um enrolamento devido a grandes

esforços mecânicos, a figura 2.7 ilustra um curto-circuito entre as espiras de um enrolamento e a figura 2.8 mostra deslocamento de bobinas em um enrolamento com afundamentos locais.



Figura 2.6: Encurvamento de um enrolamento devido a esforços mecânicos



Figura 2.7: Curto-Círcuito entre espiras de um enrolamento

### 2.3.2 Correlação entre Faltas e Parâmetros de Transformadores de Potência

A resposta em freqüência de enrolamentos de transformadores de potência é sensível à variação de parâmetros físicos do equipamento, principalmente de capacitâncias e indutâncias.

Um modelo de enrolamento proposto por ISLAM (2000) pode ser utilizado para entender melhor os principais parâmetros que compõem o enrolamento de transformadores de potência. A figura 2.9 ilustra o modelo proposto com os componentes do circuito de medição incluídos.



Figura 2.8: Deslocamento de bobinas em um enrolamento com afundamentos locais

$C_s$  Capacitância série

$C_g$  Capacitância *shunt* ou geométrica por unidade de comprimento

$L$  Indutâncias própria e mútua

$R$  Resistência de entrada e saída dos equipamentos de medição

$C_b$  Capacitância da Bucha

$V$  Sinal de excitação do equipamento de medição

As capacitâncias paralelas representam principalmente os acoplamentos eletrostáticos dos enrolamentos entre si, e acoplamentos adjacentes entre enrolamentos e “terra” (tanque ou núcleo). Estas capacitâncias são supostas como distribuídas uniformemente ao longo do enrolamento de interesse. As capacitâncias série são encontradas no interior de cada enrolamento, entre espiras, discos, camadas e entre bobinas individuais. As indutâncias próprias e mútuas do enrolamento são formadas por indutâncias parciais formadas pelas indutâncias entre condutores (espiras), indutâncias entre bobinas, indutâncias entre enrolamentos, e indutâncias entre enrolamento e tanque (HERSZTERG, 2004).

Como mencionado anteriormente, as faltas são detectáveis com a FRA a partir do momento em que variam significativamente as capacitâncias e indutâncias que compõem o enrolamento de uma transformador de potência (RYDER, 2003). Podemos associar as faltas no enrolamento, sejam de natureza elétrica ou mecânica, com a modificação dos parâmetros do enrolamento. A seguir são mostrados os principais parâmetros que são modificados devido a algumas faltas de natureza elétrica e mecânica (ISLAM, 2000; HERSZTERG, 2004; RYDER, 2003).

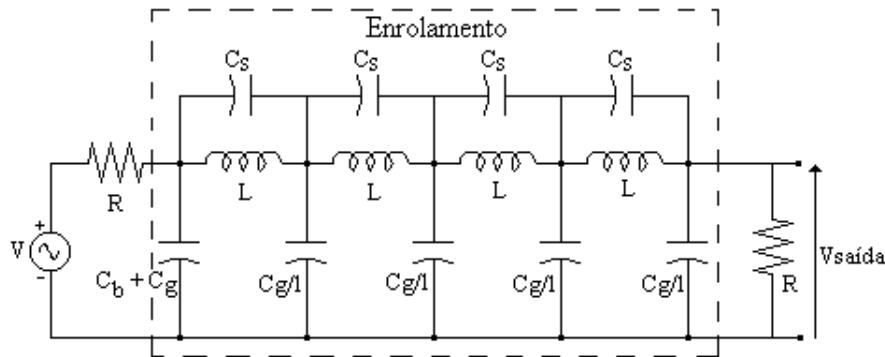


Figura 2.9: Modelo equivalente de um enrolamento para a FRA e o equipamento de medição

Tabela 2.2: Variação dos Principais Parâmetros do Enrolamento em função da Falta

FALTA	PRINCIPAL PARÂMETRO VARIANTE
Circulação de Corrente em Malha Fechada	Indutância
Aterramento Múltiplo	Indutância
Espiras em Curto Circuito	Indutância
Curto Circuito entre Enrolamento e Tanque	Indutância
Curto Circuito entre Enrolamentos	Indutância
Afundamento Local	Indutância
Movimentação de Discos	Capacitância Shunt ou Geométrica
Encurvamento	Capacitância Shunt ou Geométrica
Ingresso de Umidade	Capacitância Shunt ou Geométrica
Espiras Frouxas	Capacitância Série
Envelhecimento da Isolação Sólida	Capacitância Série

## 2.4 Metodologias para obter a Resposta em Freqüência

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

### 2.4.1 Medição no Domínio do Tempo

Em medições de RF no domínio do tempo, os objetos em teste podem ser excitados por sinais de impulso de tensão de baixa ou alta amplitude (RAHIMPOUR et al., 2003). A função de transferência pode ser calculada através da Transformada de Fourier da resposta ao impulso ( $h(t)$ ). Como a função de transferência para sistemas lineares é independente do sinal de entrada aplicado, é possível aplicar sinais de impulso atmosféricos de onda completa ou cortada, obtendo-se funções de transferência idênticas para ambos casos (VAESSEN; HANIQUE, 1992).

O Método da Resposta ao Impulso (IRM) é similar ao método proposto inicialmente por LECH e TYMINSKI em 1966, denominado Método do Impulso em Baixa Tensão (LVI), cuja análise é realizada no domínio do tempo, praticamente não mais utilizado atualmente. A principal diferença entre o IRM e o LVI é que no método LVI o sinal de excitação aplicado ao terminal de entrada do enrolamento em análise não era medido, analisando-se somente a resposta de saída do enrolamento, diferente do IRM em que ambos sinais são medidos. Por este motivo o LVI possui os seguintes inconvenientes: não é possível determinar a função de transferência, o sinal de saída depende da disposição das ligações no ensaio, a estabilidade e a repetibilidade do ensaio não são satisfatórias (VAESSEN; HANIQUE, 1992).

O Método da Resposta ao Impulso (IRM) consiste em injetar um impulso de baixa tensão, em um terminal do enrolamento do transformador a ser analisado. Este sinal de entrada e o sinal de saída são medidos, filtrados e amostrados no domínio do tempo. Posteriormente, os sinais são transformados no domínio da freqüência aplicando a transformada rápida de Fourier (FFT), e a função de transferência é calculada dividindo-se o sinal de saída pelo sinal de entrada (VAESSEN; HANIQUE, 1992; TENBOHLEN; RYDER, 2003). Dependendo do sinal de saída que é medido, a função de transferência calculada pode representar a relação de tensão entre enrolamentos ou a impedância/admitância de um enrolamento em função da freqüência. A amplitude do sinal de impulso aplicado é tipicamente de 100 a 2000 Volts com um tempo de subida entre 100 e 500  $\eta$ s e duração entre 40 e 200  $\mu$ s (RAHIMPOUR et al., 2003). A figura 2.10(a) ilustra a topologia para a realização do IRM e a figura 2.10(b) mostra o princípio do cálculo da função de transferência.

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

Vantagens:

1. Várias funções de transferência podem ser obtidas simultaneamente.
2. O tempo necessário para realizar uma medição é geralmente inferior a um minuto.

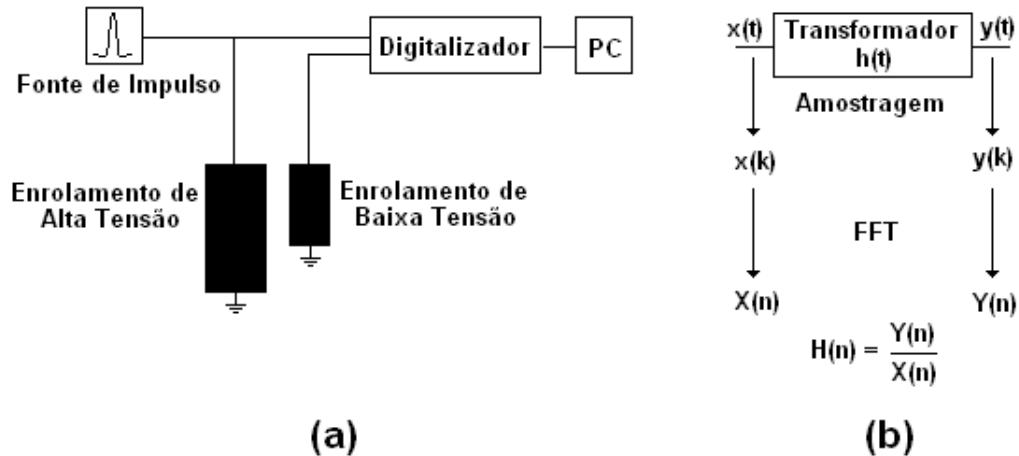


Figura 2.10: (a) Arranjo para a medição no IRM (b) Princípio de cálculo da função de transferência

3. Menor influência da impedância de medição na função de transferência medida e consequentemente uma faixa maior de freqüências pode ser analisada.

4. Pouco interferência dos cabos de medição nos resultados.

Desvantagens:

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

Com a finalidade de um melhor entendimento das vantagens e desvantagens do IRM, citados anteriormente, serão melhor explicados os que foram considerados não óbvios.

Em relação à terceira vantagem, para a medição da função de transferência, normalmente utiliza-se uma impedância *shunt* de medição de  $1 \Omega$ , que possui pouca interferência na função de transferência em altas freqüências, e portanto, a RF pode ser analisada até uma freqüência de 10Mhz sem a influência significativa da impedância *shunt* de medição (WANG; VANDERMAAR; SRIVASTAVA, 2005; BRITTON, 2006).

Em relação à quarta vantagem, para o cálculo da função de transferência representando a impedância/admitância do enrolamento, o sinal de tensão e a corrente de resposta são fisicamente medidos nos terminais do transformador, minimizando a influência dos cabos de medição nos resultados (BRITTON, 2006).

Em relação à primeira desvantagem, considera-se que no IRM, a taxa ou freqüência de amostragem  $f_s$  é fixa. O uso de uma taxa de amostragem muito alta pode causar problemas com a resolução da freqüência  $\Delta f$  no espectro resultante do cálculo da FFT do sinal amostrado. Tendo em conta a equação em que  $\Delta t \cdot \Delta f = \frac{1}{N}$ , onde  $\Delta t$  é o período de amostragem  $\frac{1}{f_s}$  e  $N$  é o número de amostras ou tamanho da memória disponível no digitalizador, uma alta taxa de amostragem implica em uma boa resolução no tempo, mas uma pobre resolução na freqüência, por exemplo, se é disponível uma memória para 4000 amostras com uma freqüência de amostragem de 100 MHz, tem-se uma ótima resolução de 10 ns no tempo, mas uma resolução muito ruim de 25 kHz na freqüência, quando calculada a FFT (VAESSEN; HANIQUE, 1992). Claro que o exemplo utilizado foi exagerado, mas nota-se que se a resolução da freqüência é fixa, os resultados de FRA em baixas freqüências ficam comprometidos, dificultando o diagnóstico de faltas nesta faixa de freqüências.

Em relação à terceira desvantagem, outra limitação do método da resposta ao impulso é que a energia do impulso gerado não é igual em toda a faixa de freqüências analisada, e diminui rapidamente conforme a freqüência aumenta. Sinais de ruído e interferências ambientais podem facilmente influenciar a função de transferência de baixa energia (SWEETSER; MCGRAIL, 2003a).

#### 2.4.2 Medição no Domínio da Freqüência

Antes de descrever a técnica de medição no domínio da freqüência em si, realizar-se-á uma breve introdução sobre conceitos relacionados à função de transferência para uma melhor interpretação do tema.

A função de transferência de um sistema linear e invariante no tempo é a relação da resposta em freqüência entre a saída e a entrada com condições iniciais nulas. A função de transferência é representada no domínio da freqüência e é denotada pela variável de Fourier  $H(j\omega)$ , onde o operador ( $j\omega$ ) representa uma função dependente da freqüência, e,  $\omega = 2\pi f$ . A relação de Fourier entre a saída e a entrada é representada pela equação 2.1 (SWEETSER; MCGRAIL, 2003a; OGATA, 1998).

$$H(j\omega) = \frac{V_{saída}(j\omega)}{V_{entrada}(j\omega)} \quad (2.1)$$

A função de transferência ilustrada na equação 2.1 é uma quantidade complexa e que pode ser representada pela magnitude e pelo ângulo de fase, tendo a freqüência como parâmetro. As duas representações mais usadas para as funções de transferência são o *Diagrama de Bode* ou gráfico logarítmico e o *Diagrama de Nyquist* ou gráfico polar (OGATA, 1998). Também é possível representar os diagramas de RF ou funções de transferência em escala linear, mas a representação em escala logarítmica tem a vantagem de permitir que a informação seja apresentada em uma ampla faixa de freqüências em um único gráfico, diferentemente da escala linear em que freqüentemente é necessário separar os gráficos por décadas para serem examinados. No diagnóstico de transformadores de potência com a análise da resposta em freqüência, geralmente é avaliada a magnitude da função de transferência. Segundo RYDER (2003), normalmente o gráfico de ângulo de fase da função de transferência contém informações menos úteis do que o gráfico da magnitude da mesma.

A técnica de medição no domínio da freqüência é denominada SFRA - Método da Resposta de Varredura em Freqüências (Swept Frequency Response Analysis) e foi desenvolvida por DICK e ERVIN entre 1977 e 1978 como ferramenta de diagnóstico de transformadores de potência. Esta técnica consiste em aplicar e medir um sinal de excitação senoidal com freqüência variável, de baixa tensão, e com amplitude constante no enrolamento do transformador em estudo, também medindo-se o sinal de saída do enrolamento para assim calcular a função de transferência (RYDER, 2001; SWEETSER; MCGRAIL, 2003a). A SFRA fornece informações na forma de uma função de transferência que modela o transformador de potência. O circuito RLC associado a este modelo é função da geometria interna e outros aspectos construtivos do transformador. Desta forma, mudanças na configuração geométrica do transformador alteram o circuito RLC do mesmo, e consequentemente, alteram a função de transferência associada (SWEETSER; MCGRAIL, 2003b).

Dependendo do sinal de saída que é medido no ensaio de RF, a função de transferência calculada pode representar a relação de tensão entre enrolamentos ou a impedância/admitância de um enrolamento em função da freqüência. É muito comum o uso de um analisador de rede para o cálculo da função de transferência representando a impedância/admitância em função da freqüência de um enrolamento, este equipamento aplica um sinal de tensão senoidal em um terminal do enrolamento do transformador, enquanto que a corrente de resposta é medida indiretamente através da tensão na impedância de entrada do analisador que é geralmente de  $50 \Omega$ . A freqüência é variada em uma faixa de interesse, e a função de transferência do enrolamento é calculada e apresentada graficamente na forma de impedância/admitância (módulo e ângulo). A figura 2.11 ilustra o diagrama esquemático para a medição da impedância/admitância de um enrolamento com a SFRA com um analisador de rede (BRITTON, 2006).

Esta metodologia, do ponto de vista intuitivo, é a forma mais direta de medir uma função de transferência, que pode ser considerado como benefício desta técnica. Entretanto, algu-

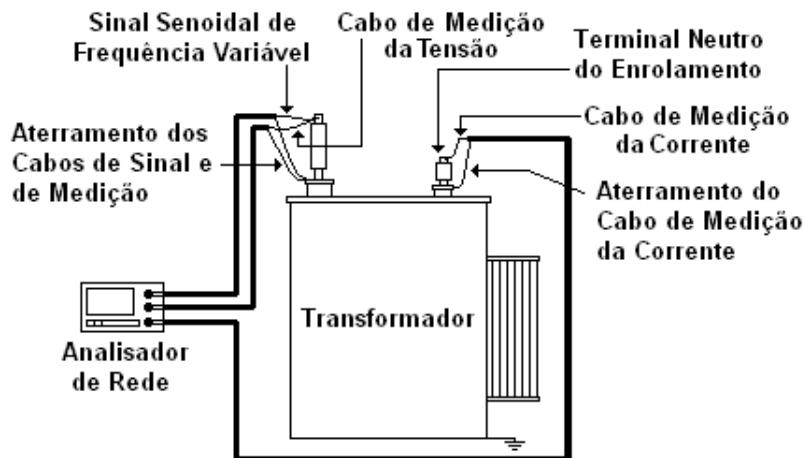


Figura 2.11: Configuração esquemática da medição da impedância/admitância com a SFRA

mas dificuldades práticas são encontradas quando da aplicação desta metodologia em transformadores de grande porte. As medições na SFRA geralmente são realizadas utilizando um analisador de rede que aplica uma tensão senoidal de baixa amplitude (normalmente 10 Volts) ao objeto em teste. Em baixas freqüências (entre dezenas de Hz e poucos kHz), o instrumento tende a prover energia insuficiente para excitar um transformador de grande porte, devido à forte característica indutiva do núcleo. Nas altas freqüências (entre 2 e 5 MHz), a energia provida também pode não ser suficiente, devido à característica altamente capacitiva consequência do alto valor de capacidade do sistema de isolamento do transformador (BRITTON, 2006). Por estes motivos, é recomendado analisar diagramas de respostas de SFRA apenas na faixa de alguns Hz até 2 MHz, quando analisadores de redes são utilizados.

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

Vantagens:

1. Alta imunidade a ruídos em medições em laboratório.
2. Uma ampla faixa de freqüências pode ser varrida.
3. É possível utilizar uma resolução mais precisa em baixas freqüências. Como alternativa, a resolução da freqüência pode ser adaptada à faixa de freqüência a ser medida.
4. Quando se utilizam analisadores de redes, somente um equipamento é necessário para realizar as medições.

Desvantagens:

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

A limitação associada com o uso de analisadores de redes é que a corrente de resposta ao sinal de excitação deve circular por todo o cabo de medição (com um comprimento de 15 m aproximadamente para conectar à bucha de transformadores de grande porte). Na SFRA o cabo de medição é inserido em série com o enrolamento do transformador em teste, portanto o resultado é influenciado pelo comprimento do cabo, além disso, a impedância de entrada do analisador que é normalmente de  $50\ \Omega$ , dependendo do tamanho do transformador, pode amortecer a resposta em altas freqüências. O resultado é uma pobre sensibilidade na faixa de altas freqüências e uma pobre repetibilidade do ensaio sempre que este seja realizado com cabos de diferentes medidas. Em alguns casos, a verdadeira resposta em freqüência do transformador acima de 2 MHz é completamente atenuada pelas limitações associadas com a técnica de medição mencionada (BRITTON, 2006).

## 2.5 Procedimentos para a Realização do Ensaio de Resposta em Freqüência

As medições de RF são realizadas de forma *off-line*, ou seja, o transformador a ser analisado deve estar completamente desconectado do sistema de potência. Isto exige que todas as buchas de todos os enrolamentos sejam desconectadas de qualquer barramento ou isolador. Este procedimento visa evitar que as medições realizadas sejam afetadas de maneira adversa por interferências do sistema, já que é desejável medir somente o circuito RLC correspondente ao enrolamento em análise do transformador. A prática mais usual é realizar o ensaio de resposta em freqüência em um enrolamento a cada vez, enquanto que os terminais dos outros enrolamentos permanecem abertos e flutuando. A resposta em freqüência pode ser medida com os terminais remanescentes aterrados, contudo, isto não permite compará-lo com um diagrama de resposta em freqüência que foi medida com os terminais flutuando, o que corresponderia a um circuito RLC diferente (ISLAM, 2000; DOBLE ENGINEERING, 2002).

O sinal de excitação, com a terra como referência, é aplicado a um terminal do enrolamento que está sendo analisado, o sinal de saída, também em relação à terra, é medido no

outro terminal do mesmo enrolamento, e assim, dependendo da metodologia utilizada para realizar o ensaio, a função de transferência é calculada. No caso de enrolamentos com conexão em delta, os terminais individuais não estão disponíveis, portanto o ensaio deve ser realizado através das fases a-b, b-c e c-a, uma a cada vez (ISLAM, 2000).

A título de exemplo, a figura 2.12 mostra os diagramas de conexão para um transformador delta-estrela, onde 9 testes são necessários para cobrir todas as alternativas de medição, 6 por fase e 3 entre enrolamentos. Na figura 2.12,  $S$  representa a fonte do sinal de excitação e o circuito de medição.

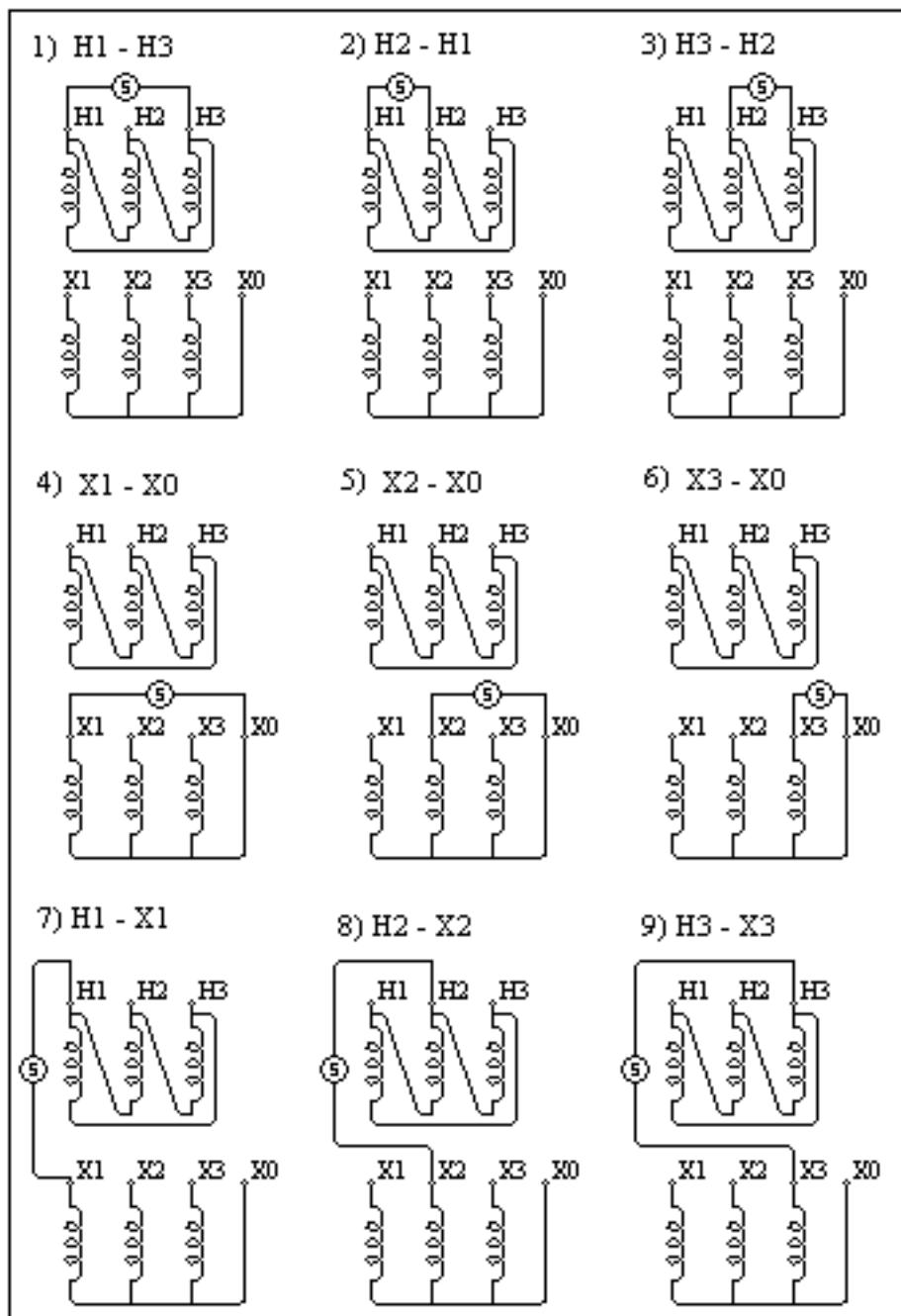
Os equipamentos necessários para realizar a FRA são: fonte do sinal de excitação, digitalizador de sinais, computador com programa para cálculo da FFT dos sinais medidos, medidores de tensão e corrente e cabos de conexão. Na metodologia de análise da resposta em freqüência tipo IRM, a fonte de excitação utilizada é uma fonte de impulso. Na SFRA normalmente é utilizado um analisador de rede para realizar todo o processo do ensaio, este equipamento gera o sinal de excitação senoidal de freqüência variável, realiza as medições e manipula os resultados obtidos. Um número satisfatório de analisadores de rede se encontra disponível comercialmente (VAESSEN; HANIQUE, 1992; RYDER, 2003).

Em relação à normalização da metodologia de diagnóstico de transformadores de potência com a FRA, dois grupos de trabalho se encontram atualmente investigando sobre o assunto, o grupo de trabalho PC57.149 do IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), e o grupo de trabalho A2.26 vinculado ao CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electriques). De uma forma geral, estes grupos de trabalho tem por objetivo realizar uma análise da metodologia FRA propondo uma possível padronização do ensaio (técnicas de medição, procedimentos, etc), e também fornecer um guia para a interpretação dos resultados da FRA.

## 2.6 Fatores Importantes que Afetam as Medições da RF

Podemos separar os fatores que afetam medição de RF em dois grupos, um grupo que afeta a exatidão da função de transferência, ou seja, como ela está sendo medida, e outro grupo que afeta o que a função de transferência obtida representa, ou seja, se ela descreve fielmente o sistema em análise.

No primeiro grupo, referente a fatores que afetam diretamente a exatidão da função de transferência do sistema que está sendo analisado, devemos considerar principalmente a maneira como os sinais estão sendo processados, neste sentido, o principal fator que afeta o processamento dos sinais é a resolução da amostragem (VAESSEN; HANIQUE, 1992; KIM et al., 2005).

Figura 2.12: Diagramas de conexão de ensaios de RF para um transformador trifásico -  $\Delta/Y$

No segundo grupo, os resultados das medições da RF não são somente afetados pelas condições internas do enrolamento do transformador, mas também são afetados pela configuração do sistema de medição utilizado, ou seja, valor da impedância *shunt*<sup>5</sup> utilizada para medir a corrente, arranjo das ligações (comprimento, conexão), etc. (WANG; VANDEMAAR; SRIVASTAVA, 2004). Desta forma, torna-se necessária uma análise destes fatores como forma de avaliar a influência dos mesmos nas medições de RF.

### 2.6.1 Influência da Freqüência de Amostragem

Todo sinal armazenado ou processado em computadores digitais é antes digitalizado, isto é, o sinal é amostrado e suas amostras são transformadas em código binário para depois serem processadas ou armazenadas. De acordo com o Teorema da Amostragem, a quantidade de amostras por unidade de tempo de um sinal, chamada taxa ou freqüência de amostragem, deve ser maior que o dobro da maior freqüência contida no sinal a ser amostrado, isto, para que o sinal possa ser reconstruído integralmente sem erro de *aliasing*<sup>6</sup>. A metade da freqüência de amostragem é chamada freqüência de Nyquist e corresponde ao limite máximo de freqüência do sinal que pode ser reproduzido. Como não é possível garantir que o sinal não contenha sinais acima deste limite (distorções, interferências, ruídos, etc.), é necessário filtrar o sinal com um filtro passa baixa com freqüência de corte ( $f_n$ ) igual ou menor à freqüência de Nyquist (OPPENHEIM; WILLSKY, 1996).

O sinal de amostragem, também chamado função amostra, é constituído de impulsos com freqüência de amostragem  $f_a$ . O espectro deste sinal contém linhas de mesmo nível e freqüências múltiplas inteiras da função amostra, ou seja, 0 Hz (componente continua),  $f_a$ ,  $2f_a$ ,  $3f_a$ , etc. O efeito de *aliasing* é a superposição dos espectros de cada raia PAM (pulsos modulados em amplitude) por falta de espaço. Na reconstrução do sinal pelo filtro passa baixa com freqüência de corte  $f_n$ , a parte do espectro original acima de  $f_n$  (no caso a ponta do triângulo) aparece como se tivesse sido dobrada em torno de  $f_n$  e invertida espectralmente, ou seja, freqüências mais altas passam a ser menores (figura 2.13). Na figura 2.13 observa-se como a forma de onda do sinal reconstruído é deformada em relação ao sinal original devido ao erro de *aliasing*.

Portanto, o uso de uma freqüência de amostragem alta seria uma solução para evitar o fenômeno de *aliasing*. Entretanto, isto pode causar um problema com a resolução de amostragem que é definida como sendo  $\Delta f = \frac{f_a}{N}$ ; onde  $f_a$  representa a freqüência de amostragem e  $N$  o número de amostras na FFT ou capacidade de memória do digitalizador. Uma solução

<sup>5</sup>Em derivação

<sup>6</sup>aparecimento de uma componente de alta freqüência real como uma componente de baixa freqüência virtual, devido ao processo de amostragem

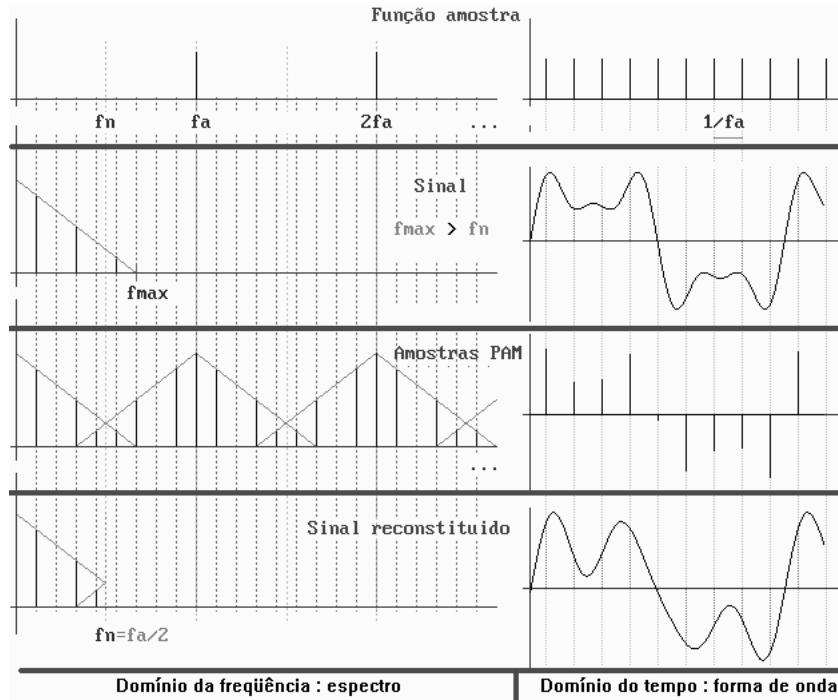


Figura 2.13: Freqüência de amostragem menor que o dobro da freqüência do sinal amostrado

para atender o teorema da amostragem e evitar uma pobre resolução no espectro de freqüências seria escolher a freqüência de amostragem como sendo duas vezes a maior freqüência do sinal que será aplicado no ensaio de RF ( $f_a = 2 \cdot f_{max}$ ), mas devido às características ressonantes dos sinais de resposta de transformadores, é possível que se tenha freqüências superiores à  $f_{max}$  nos sinais de saída. Experiências práticas mostraram que uma taxa de amostragem 4 a 5 vezes maior que ( $f_{max}$ ) é suficiente para que se obtenha bons resultados (VAESSEN; HANIQUE, 1992).

## 2.6.2 Efeito do Valor da Impedância *shunt*

Na realização do ensaio de RF com a metodologia IRM, um sinal de tensão tipo impulso é aplicado no terminal do enrolamento sob teste. Para poder calcular a função de transferência do enrolamento na forma de admitância ou impedância, é necessário medir indiretamente a corrente de saída, utilizando-se para isso uma impedância *shunt* da baixo valor (a figura 2.14 ilustra o diagrama esquemático para realizar a FRA com o IRM onde observa-se a impedância *shunt* para a medição da corrente). Como já mencionado, as medições de RF cobrem uma ampla faixa de freqüências, geralmente entre alguns Hz até 3 MHz. Pequenas deformações ou movimentações do enrolamento são usualmente diagnosticadas e observadas em altas freqüências ( $> 1\text{MHz}$ ). Nas baixas freqüências ( $< 1\text{MHz}$ ), a impedância *shunt*

utilizada para medir a corrente de saída (tipicamente 10 ou  $50\Omega$ ) não é significativa se comparada com a impedância do transformador. Entretanto, em altas freqüências, a impedância *shunt* torna-se comparável com a impedância do transformador, influenciando de forma significativa as medições. No Método da Resposta ao Impulso (IRM), o valor da impedância *shunt* não é definido de forma padrão, e, em muitos casos, é escolhido um valor conveniente para o ensaio. No Método da Resposta de Varredura em Freqüências (SFRA), o valor da impedância de medição é tipicamente de  $50\Omega$ , que é a impedância de entrada do analisador de redes normalmente utilizado no ensaio (WANG; VANDEMAAR; SRIVASTAVA, 2004).

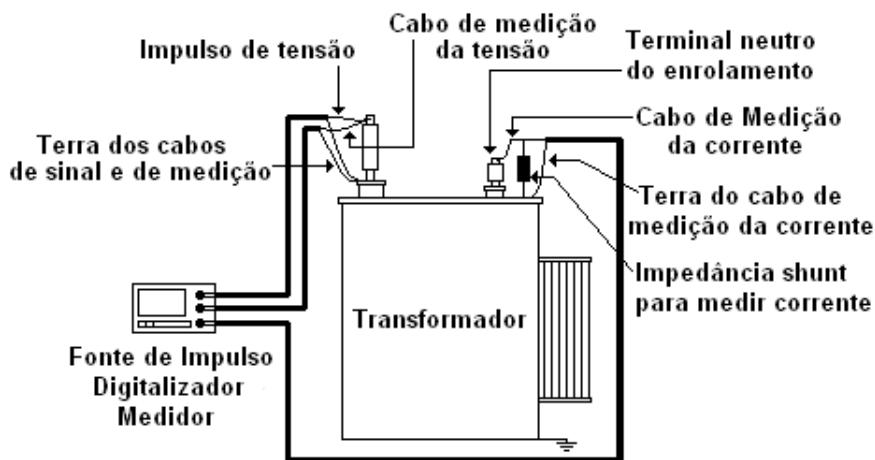


Figura 2.14: Esquema para realizar o ensaio de RF com o IRM

Foi comprovado com testes e medições que a sensibilidade da FRA para pequenas movimentações ou deformações do enrolamento aumenta consideravelmente com a diminuição do valor da impedância *shunt* utilizada no ensaio. Deste modo, para diminuir a influência da impedância nas medições, recomenda-se que esta seja de  $50\Omega$  para medições até 0,5 MHz, de  $10\Omega$  para medições até 3 MHz e de  $1\Omega$  para medições de RF até 10 MHz (WANG; VANDEMAAR; SRIVASTAVA, 2004).

### 2.6.3 Efeito da Bucha de Alta Tensão

Outro fator importante a ser considerado é o efeito das buchas dos transformadores nas medições de RF. Neste sentido, WANG, VANDEMAAR e SRIVASTAVA (2004) analisaram o efeito de medições realizadas considerando como terminais de medição o topo ou o fundo da bucha de alta tensão de um dado transformador. A figura 2.15 ilustra a magnitude da admitância de transferência entre enrolamentos em função da variação da freqüência do sinal de excitação para duas condições de configuração de medição.

As medições foram realizadas nas seguintes condições:

**Topo da Bucha** O sinal de excitação é aplicado no terminal de entrada da bucha do transformador (topo da bucha de alta tensão). O ponto de medição é também o topo da bucha de alta tensão. A corrente do enrolamento secundário é medida com uma impedância *shunt* de  $1 \Omega$ .

**Fundo da Bucha** O sinal de excitação é aplicado no topo da bucha de alta tensão. A medição é realizada diretamente no terminal do enrolamento de alta tensão, na parte interna do transformador. A corrente do enrolamento secundário também é medida com uma impedância *shunt* de  $1 \Omega$ .

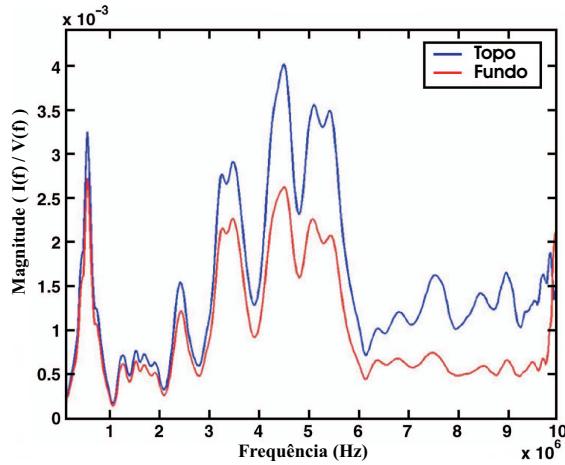


Figura 2.15: Medições de RF no topo e no fundo da bucha de alta tensão

Os resultados mostram que a magnitude da função de transferência (admitância de transferência entre enrolamentos) medida diretamente do terminal do enrolamento de alta tensão (fundo da bucha), é menor do que a magnitude da função de transferência medida no terminal do topo da bucha. Isto ocorre porque a indutância da bucha cancela a tensão capacitiva equivalente do enrolamento, e, consequentemente, a admitância medida no topo da bucha é menor que a medida no fundo da bucha do transformador (WANG; VANDEMAAR; SRIVASTAVA, 2004).

$$\frac{I}{V(\text{topo})} > \frac{I}{V(\text{fundo})}; \quad V(\text{topo}) < V(\text{fundo}), \quad \text{na faixa de freqüências entre 3 e 9 MHz.}$$

Na faixa entre 0 e 3 MHz, as admitâncias medidas para os dois casos são similares, fato que não ocorre na faixa entre 3 e 9 MHz. Esta discrepância mostra que os resultados de medições de RF são muito sensíveis à configuração do teste ou seja localização dos mediidores e configuração das ligações. Todos estes fatores são críticos para a repetibilidade do teste, portanto, para aumentar a confiabilidade e repetibilidade da FRA, é importante reduzir a variabilidade do arranjo das ligações (WANG; VANDEMAAR; SRIVASTAVA, 2004).

## 2.6.4 Efeito da Conexão do Neutro do Enrolamento de Alta Tensão

A configuração de conexão do neutro do transformador também pode afetar os resultados de medições de RF. Isto foi comprovado por WANG, VANDEMAAR e SRIVASTAVA (2004), que realizaram estudos onde analisaram a influência da conexão do neutro do enrolamento de alta tensão de um dado transformador. No estudo foram realizadas medições de RF com duas configurações para o neutro do enrolamento de alta tensão; na primeira o neutro se encontrava flutuando, ou seja, isolado do sistema; no segundo caso o neutro se encontrava solidamente conectado ao tanque do transformador. Os resultados mostraram que a influência da conexão do neutro à terra depende da faixa de freqüências, ou seja, para freqüências menores que 1,5 MHz, o impacto não é significativo, diferentemente para freqüências maiores que 1,5 MHz, onde as magnitudes das admitâncias apresentaram diferenças consideráveis. Portanto, para a detecção de pequenos danos em enrolamentos de transformadores, os resultados de ensaios de RF devem ser realizados utilizando a mesma configuração de conexão do neutro.

## 2.6.5 Efeito do Comprimento dos Condutores de Medição

As impedâncias que influenciam as medições de RF são: a impedância do transformador, a impedância *shunt* para a medição da corrente de saída e a impedância dos cabos utilizados para as medições. A influência da impedância *shunt* para a medição da corrente de saída já foi discutida na seção 2.6.2. Agora analisaremos os efeitos do comprimento dos condutores nas ligações para as medições da RF, onde normalmente utilizam-se cabos coaxiais para as conexões.

WANG, VANDEMAAR e SRIVASTAVA (2004) realizaram medições com três tipos de configurações de condutores, condutores de comprimento médio, apropriados para realizar ensaios de RF em transformadores pequenos e de médio porte, condutores de comprimento longo ( $\pm 15$  m), utilizados em medições com transformadores de grande porte, e por último, condutores muito curtos, simulando praticamente a ausência de cabos, utilizados em ensaios de RF para transformadores de distribuição. Os resultados indicaram que os condutores de comprimento padrão não influenciam significativamente as medições até 2 MHz, também mostraram que condutores muito longos não influenciam as medições até 0,5 MHz. Isto significa que acima de 2 MHz, a impedância dos condutores das ligações dominam a resposta em freqüência, e a sensibilidade para detectar mudanças no enrolamento do transformador é drasticamente reduzida.

## 2.7 Histórico da Técnica de FRA e Revisão Bibliográfica

Os primeiros estudos realizados para diagnosticar faltas em transformadores de potência no domínio do tempo foram na década de 60 na Polônia, quando Lech e Tyminski propuseram o método de Impulso de Tensão Reduzida (LVI - Low Voltage Impulse). Este método foi posteriormente melhorado, estudado e refinado na Inglaterra por Waters e Stalewski em 1968 e nos Estados Unidos por Rogers e Humbard e por Gillies e Humbard na década de 70 (DICK; ERVEN, 1978).

Em 1978, Dick e Ervin propuseram uma metodologia baseada no domínio da freqüência, onde o sinal de excitação aplicado nos terminais do enrolamento do transformador era uma onda senoidal com a freqüência variável. No trabalho, os autores simularam a variação das capacitâncias e indutâncias dos enrolamentos e entre enrolamentos para determinar a sensibilidade do método proposto para mudanças destes parâmetros, simulando eventuais danos no enrolamento (DICK; ERVEN, 1978). Desta forma, os autores propuseram uma metodologia de diagnósticos de transformadores de potência no domínio da freqüência. Atualmente, na literatura especializada, a excitação com um sinal senoidal em uma ampla faixa de freqüências é conhecida como SFRA.

No ano de 1992 Vaessen e Hanique propuseram outra metodologia de análise da resposta em freqüência em transformadores no domínio do tempo, onde, da mesma forma que no LVI, utilizou-se um sinal impulso de baixa tensão como sinal de excitação. O sinal de excitação e o sinal de saída foram medidos, amostrados e transformados no domínio da freqüência através da transformada rápida de Fourier (FFT), e assim, a função de transferência do sistema foi calculada. Desta forma inúmeros problemas anteriores da utilização do método de LVI convencional foram solucionados ou eliminados com a nova proposta. Além disso, os autores provaram que a resposta em freqüência para sistemas lineares independe do sinal de excitação aplicado, mostrando que para dois sinais de impulsos atmosféricos aplicados, um completo e outro cortado, a resposta em freqüência obtida foi a mesma (VAESSEN; HANIQUE, 1992).

Em 1993, Mikkelsen et al. realizaram testes de sensibilidade para examinar a relação entre a função de transferência e características da isolação do óleo, características do núcleo e isolação sólida do enrolamento de um transformador. Foi feita uma análise utilizando um indicador numérico denominado espectro de desvio estocástico  $\sigma[\%]$ , este indicador foi utilizado para quantificar o desvio entre 9 (nove) medições idênticas realizadas com a finalidade de estudar a estabilidade e repetibilidade da técnica utilizada e quantificar os desvios nos testes realizados, quando na presença de faltas no transformador. No tocante à isolação do óleo, foi concluído que o método detecta somente faltas que envolvem a variação da constante dielétrica do óleo, esta característica foi observada nas baixas freqüências (200 Hz - 2 kHz).

Para avaliar variações nos parâmetros do núcleo com FRA foram serradas duas pequenas ranhuras de sentidos diferentes no núcleo do transformador em teste, (sentido perpendicular e mesmo sentido que a laminação do núcleo), com o ensaio concluiu-se que para diagnosticar faltas com a FRA envolvendo o núcleo do transformador é necessário que estas provoquem variações em toda a relutância do núcleo ou variações nas perdas totais no ferro. Com relação à isolação sólida do enrolamento do transformador, é possível detectar somente faltas que causam variação em toda a capacidade distribuída do enrolamento do transformador ou se curtos circuitos entre voltas de enrolamentos são constatados (MIKKELSEN; BAK-JENSEN; BAK-JENSEN, 1993).

Inicialmente, o monitoramento de transformadores através do Método da Função de Transferência era realizado apenas de forma off-line, com o transformador desconectado do sistema. Em 1994, Leibfried e Feser publicaram um trabalho onde a função de transferência era calculada a partir de sinais de tensão e corrente transitórios medidos depois de manobras de chaveamento realizadas na subestação onde se encontrava o transformador em estudo, sem que este precisasse ser desconectado do sistema. Os resultados obtidos mostraram que investigações adicionais eram necessárias para determinar a influência da configuração do sistema na função de transferência, para assim validar a técnica de monitoramento on-line de transformadores de potência (LEIBFRIED; FESER, 1994).

No ano de 1995, Bak-Jensen et al. empregaram o método da função de transferência para identificar problemas mecânicos e de envelhecimento em transformadores de potência. Neste trabalho os autores utilizaram também o desvio estocástico, também conhecido como desvio espectral, como indicador numérico para quantificar as variações entre as medições realizadas (BAK-JENSEN; BAK-JENSEN; MIKKELSEN, 1995).

Em 1999, Xu et al. propuseram pela primeira vez a utilização de técnicas de inteligência artificial para avaliar as medições obtidas com a FRA. Foram introduzidos alguns capacitores entre alguns pontos de tap do enrolamento e entre alguns pontos de tap e a terra, simulando a deformação do enrolamento. Desta forma, quando foram realizadas as medições, estas foram comparadas com a medição do enrolamento em perfeito estado, e assim obtiveram coeficientes que quantificaram numericamente diferenças entre as medições por faixas de freqüências. Os coeficientes adotados foram o coeficiente de correlação e o desvio padrão. Estes coeficientes foram adotados como entrada para uma Rede Neural Artificial (RNA), multi-camadas utilizando um algoritmo de retropropagação. A RNA possuía uma saída binária representando estado normal ou falha. Depois de treinada, a RNA foi capaz de distinguir com grande precisão que o enrolamento onde as faltas foram simuladas se encontrava em estado falhado (XU; FU; LI, 1999).

No ano de 2001, Simon Ryder publicou um estudo de alguns casos de aplicação da FRA no diagnóstico de transformadores. Em um dos casos estudados, o autor mostrou a influência

do núcleo do transformador na FRA em baixas freqüências, tipicamente até 1 (um) kHz (RYDER, 2001). Em 2002, o mesmo autor publicou um trabalho sobre detectabilidade de faltas em transformadores, realizando várias simulações de faltas consideradas pertinentes em um transformador real, obtendo bons resultados e conclusões satisfatórias sobre quais faltas são e quais não são detectáveis através da FRA (RYDER, 2002b).

Também Ryder, em 2002, comparou dois indicadores numéricos estatísticos como forma de avaliar e quantificar diferenças entre funções de transferência levantadas para um transformador. Ele comparou o desempenho do coeficiente de correlação, proposto anteriormente por XU, FU e LI (1999), e o desvio espectral, em 4 (quatro) casos estudados. Ryder concluiu que o coeficiente de correlação teve um desempenho bom ou muito bom nos casos analisados, mas advertiu que quando a faixa de dados analisados apresenta uma forte tendência, ou seja, diagramas com formas similares mas diferentes amplitudes, este indicador poderia apresentar falsos negativos. Em contrapartida, o desvio espectral apresentou desempenho bom em dois casos analisados, ruim em um caso e muito ruim no outro caso analisado, fornecendo falsos negativos. O indicador apresentou um desempenho inadequado quando a amplitude dos diagramas de RF analisados aproximaram-se de zero, ou seja, tipicamente nas altas freqüências. O desvio espectral é mais sensível para pequenas variações na amplitude do sinal resultante (RYDER, 2002a).

Pleite et al realizaram em 2002 um trabalho de modelagem de transformadores para análise da resposta em freqüência. Nele os autores dividiram o modelo proposto em três células, cada uma analisada somente em uma faixa determinada de freqüências. A primeira célula, estudada em baixas freqüências, representou os efeitos do núcleo ferromagnético, a segunda célula, analisada em médias freqüências, representou os grandes efeitos no enrolamento, e por último a terceira célula, estudada em altas freqüências, representou os efeitos menores no enrolamento (PLEITE et al., 2002).

Em 2003, Simon Ryder publicou mais um trabalho de diagnóstico de faltas em transformadores utilizando a FRA. Neste em particular, destacou-se a análise realizada das características da resposta em baixas, médias e altas freqüências nos enrolamentos de transformadores, descrevendo a aparição de freqüências ressonantes com a variação da impedância do transformador em função da freqüência. Também foi abordada no trabalho a relação entre as faltas mais comuns avaliadas com a FRA e as mudanças físicas que elas provocam no transformador e, consequentemente, a faixa de freqüências em que estas faltas são detectadas (RYDER, 2003).

Rahimpour et al. pesquisaram o diagnóstico de deslocamentos axiais e deformações radiais nos enrolamentos de transformadores utilizando o método da função de transferência. No trabalho publicado em 2003 propuseram um modelo baseado na auto-indutância e na indutância mútua do enrolamento do transformador e sua descrição matemática no domínio da

freqüência para avaliar a capacidade do modelo para a detecção de deslocamentos axiais e deformações radiais dos enrolamentos, e assim, comparar com resultados experimentais em dois transformadores analisados. Os autores concluíram que existe uma boa concordância entre os resultados medidos e calculados na faixa de freqüências entre aproximadamente 10 kHz até 1 MHz. O modelo prediz corretamente características essenciais da resposta em freqüência, tais como freqüências de ressonância e amortecimento de ressonâncias. A correlação entre as mudanças na função de transferência e deslocamento axial ou deformação radial correspondente é dada corretamente pelo modelo, o que demonstra que deslocamentos mecânicos em enrolamentos de transformadores podem ser avaliados com a ajuda de modelos detalhados. Todas as funções de transferência mostram que as deformações radiais mudam as características da função de transferência em toda a faixa de freqüências enquanto os deslocamentos axiais provocam mudanças acima de 200 kHz (RAHIMPOUR et al., 2003).

Em 2004, Wang et al. estudaram os fatores que afetam medições realizadas na FRA, tais como, valor da impedância shunt utilizada nas medições, efeito da bucha de alta tensão, efeito do aterrramento do neutro do enrolamento de alta tensão nas medições, efeito das conexões da medição e efeito do movimento radial do enrolamento do transformador (WANG; VANDEMAAR; SRIVASTAVA, 2004).

Em janeiro de 2005, Kim et al. realizaram uma análise de faltas em transformadores utilizando uma FRA melhorada. Os autores constataram que devido a Transformada Discreta de Fourier (DFT) na análise espectral convencional dividir toda a faixa de freqüências em um numero finito de pontos de escala linear, a resposta em freqüência obtida possui pesos estatísticos superiores para as altas do que para as baixas freqüências, o que pode negligenciar o diagnóstico de faltas nas baixas freqüências. Para contornar este problema, foi proposta a Análise Sintética Espectral (ASE) incluindo o Método de Corte e Concatenação (MCC) e a interpolação de baixas freqüências. No trabalho, eles compararam a Soma de Erro Quadrático (SEQ) e Coeficiente de Correlação (CC) (indicadores numéricos utilizados até então para o diagnóstico de faltas em transformadores) com a Soma Quadrática do Erro Relativo(SQER), Soma Quadrática do Max-Min Erro Relativo (SQMMER) e Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL) (indicadores numéricos propostos). Os indicadores propostos consideraram melhor as características específicas da resposta em freqüência em transformadores de potência para a identificação de danos nos enrolamentos (KIM et al., 2005).

Todas as metodologias de FRA utilizam a faixa de freqüências entre poucos Hz e no máximo 3 MHz para realizar o ensaio de resposta em freqüência. Considera-se que medições realizadas em freqüências superiores a 3 MHz não contêm informações importantes no diagnóstico de deformações axiais e radiais em enrolamentos de transformadores e que em altas freqüências o transformador pode ser aproximado por uma rede de capacitâncias distribuídas e que mudanças no enrolamento não afetam significativamente as medições de RF. O trabalho publicado em Julho de 2005 por Wang et al sugere que essas considerações

são uma sobre-simplificação, e que informações de altas freqüências ( $>3$  MHz) podem ser utilizadas. Os pesquisadores usaram simulações e medições para investigar a sensibilidade da FRA na identificação de mudanças no transformador em faixas de freqüências entre 2 e 10 MHz. Foi concluído que à medida que a impedância de medição shunt utilizada no ensaio de RF aumenta, a máxima freqüência utilizável para as medições diminui. Usando uma impedância shunt de medição de 50 ohms, a FRA detecta movimentação do enrolamento até aproximadamente 500 kHz enquanto que com uma impedância de 1 ohm a sensibilidade é até aproximadamente 10 MHz. Outra conclusão importante é que a impedância da bucha de alta tensão tem um impacto significativo nos resultados de FRA acima de 3 MHz. Além destas considerações, os autores apresentaram a proposta de uma nova metodologia para a FRA, a HIFRA (High Frequency Response Analysis), que detecta problemas no enrolamento do transformador em estágios iniciais e de forma *on line*. A HIFRA utiliza um sensor-detector dentro do tanque do transformador, especificamente na base da bucha, para a aquisição dos sinais com o objetivo de evitar a influência da impedância do circuito de medição externo utilizado na FRA convencional. Para a HIFRA *on line*, três fontes de sinais potenciais foram investigadas e comparadas, transitórios de chaveamentos no sistema, sinais de *pickup* aleatórios de linhas de transmissão e sinais injetados no tap da bucha capacitiva. A HIFRA se apresenta como uma metodologia promissora, melhorando a detectabilidade de pequenas movimentações e deformações em enrolamentos que somente são identificáveis em altas freqüências ( $>3$  MHz) (WANG; VANDERMAAR; SRIVASTAVA, 2005).

## 2.8 Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a metodologia denominada Análise de Resposta em Freqüência (FRA) como ferramenta de diagnóstico de danos em enrolamentos de transformadores de potência. Neste sentido, foram apresentadas as características da resposta em freqüência e a influência das faltas em enrolamentos de transformadores, dividindo a análise em três grandes faixas de freqüência, as baixas, médias e altas freqüências.

No tocante à metodologias para a realização do ensaio de resposta em freqüência, foram apresentadas, discutidas e comparadas as duas metodologias utilizadas atualmente para a realização do ensaio, medições no domínio do tempo e medições no domínio da freqüência.

Tendo em vista a importância da qualidade das medições de RF como ferramenta de diagnóstico de transformadores de potência, fatores que influenciam tais medições devem ser conhecidos e considerados. Neste contexto, foram apresentados os principais fatores que influenciam as medições de RF, como o valor da impedância shunt, a inclusão da bucha de alta tensão na medição, a conexão do neutro do enrolamento de alta tensão e o comprimento dos condutores de medição.

É importante destacar que a aplicação da metodologia Análise de Resposta em Freqüência para o diagnóstico de transformadores é recente. Atualmente, grupos de trabalho com renomados pesquisadores da área encontram-se aprofundando estudos sobre o tema, mas ainda não existe uma norma que defina os procedimentos de realização do ensaio de RF assim como a relação entre defeitos no transformador associados com a mudança na resposta em freqüência do mesmo.

# Capítulo 3

## Ferramentas de Diagnóstico Através da Análise da Resposta em Freqüência

### 3.1 Considerações Gerais

A FRA não é um método de diagnóstico absoluto, mas sim, um método de comparação; ou seja, os resultados de medições realizadas com a FRA são comparados com medições denominadas “Impressões Digitais”, que são medições realizadas quando o transformador se encontrava em perfeito estado de funcionamento. Se não são encontradas diferenças significativas entre as medições comparadas, provavelmente não houve mudanças no interior do transformador, caracterizando ausência de danos no mesmo. Infelizmente, impressões digitais nem sempre estão disponíveis para comparação, por este motivo outras alternativas devem ser consideradas para a comparação entre as medições de resposta em freqüência. Neste contexto, funções de transferência de transformadores de mesmas características construtivas (transformadores “irmãos”) podem ser utilizadas como referências para a comparação entre medições. As propriedades simétricas dos enrolamentos e do núcleo também podem ser utilizadas para a comparação de medições de RF (resposta em freqüência), ou seja, em transformadores trifásicos, pode-se realizar medições individuais de cada enrolamento para a comparação, mas isto somente quando danos afetam somente uma das três fases do transformador em estudo. Uma análise separada das três fases detectará as diferenças da fase danificada em relação às outras (CHRISTIAN et al., 1999).

Na FRA convencional é realizada uma comparação visual dos diagramas obtidos com o ensaio de resposta em freqüência para o diagnóstico do estado do transformador em estudo, o que requer especialistas treinados e experientes para a correta interpretação dos resultados. Com a finalidade de dar maior suporte ao especialista no diagnóstico do problema, alguns pesquisadores sugerem o uso de indicadores numéricos como forma de quantificar as

diferenças nas medições realizadas no ensaio de RF (KIM et al., 2005). Os indicadores numéricos para a comparação de medições de RF encontrados na literatura são: desvio padrão (DP) e Coeficiente de Correlação (CC) (XU; FU; LI, 1999); Desvio Espectral Estocástico ( $\sigma$ ) (MIKKELSEN; BAK-JENSEN; BAK-JENSEN, 1993); Raiz Média Quadrática (RMS) (MC KELVEY; AKÇAY; LJUNG, apud KIM et al., 2005); Soma Quadrática do Erro Relativo (SQER), Soma Quadrática do Max-Min Erro Relativo (SQMMER) e Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL) (KIM et al., 2005). O desvio padrão e a raiz média quadrática podem ser classificados como um somatório do erro quadrático (SEQ). Neste trabalho foram escolhidos os indicadores SEQ, CC, e a SAEL, com a finalidade de avaliar e comparar o desempenho destes indicadores no tocante à capacidade de quantificação correta de diferenças entre medições de RF.

Além dos indicadores numéricos citados, técnicas de inteligência artificial também podem ser usadas como forma de avaliar diferenças entre medições de ensaios de resposta em freqüência. Neste sentido, é proposto o uso de uma Rede Neural Artificial (RNA) tipo GRNN (General Regression Neural Network), que é uma rede com grande capacidade de generalização e é utilizada quando se tem uma quantidade suficiente de medições de funções de transferência do transformador sob suspeita de dano ou de transformadores de mesma característica construtiva, visto que são necessárias várias medições para o treinamento da RNA a fim de alcançar um desempenho satisfatório.

Na comparação de medições de RF, os aspectos que devem ser observados como indicadores-chave de danos no transformador são (RYDER, 2003):

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

Considerando que a forma de onda dos diagramas de resposta em freqüência de transformadores de potência contêm vários pontos de ressonâncias, principalmente nas freqüências superiores, e que um pequeno deslocamento de um pico pode afetar drasticamente o desvio entre dois diagramas, um indicador apropriado deve ser implementado como ferramenta para avaliar diferenças entre medições de ensaios de resposta em freqüência. Desta forma, serão apresentados nos ítems seguintes, os três indicadores numéricos estatísticos e a rede neural artificial tipo GRNN implementados como ferramentas de auxílio ao diagnóstico de danos em enrolamentos de transformadores de potência com a FRA.

## 3.2 Indicadores Numéricos Estatísticos

A seguir são descritos os indicadores numéricos: Soma do Erro Quadrático (SEQ), o Coeficiente de Correlação (CC) e a Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL). Serão realizados os comentários pertinentes sobre o desempenho de cada um em quantificar diferenças de medições de ensaio de resposta em freqüência em transformadores de potência.

### 3.2.1 Soma do Erro Quadrático (SEQ)

O desvio padrão e a raiz média quadrática podem ser classificados como uma SEQ, como mostra a equação 3.1 a seguir:

$$\delta_{SEQ}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N} \quad (3.1)$$

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

Quando as magnitudes de  $x_i$  e  $y_i$  são da mesma ordem para todos os  $i$ , a SEQ é um bom indicador de diferenças entre as amostras, contribuindo para o diagnóstico do problema. Entretanto, se as ordens de  $x_i$  e  $y_i$  diferem em algumas regiões, o que freqüentemente ocorre em picos ou vales de diagrams de resposta em freqüência de transformadores de potência, este indicador não quantifica corretamente diferenças entre as amostras devido a que ele é afetado de forma dominante por um pequeno número de picos ou vales de magnitude relativamente alta (KIM et al., 2005).

### 3.2.2 Coeficiente de Correlação (CC)

O CC, como seu nome mostra, indica a correlação entre dois valores ou curvas, se aproximando de 0 se os valores de amostras não se correlacionam, e se aproximando de 1 se os valores são similares. O coeficiente de correlação é descrito pela equação 3.2:

$$\delta_{CC}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{i=1}^N y_i^2}} \quad (3.2)$$

A equação 3.2 é normalizada pelo termo denominador, ao contrário da SEQ. Sob um

condição particular de  $y_i = cx_i$  na região  $i_l \leq i \leq i_h$  onde  $c$  é uma constante,  $\delta_{CC}$  é igual a 1 como mostrado a seguir: (KIM et al., 2005)

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

Esta propriedade deste indicador numérico pode levar a tomar decisões equivocadas. Por exemplo, assumindo que  $c = 1000$ , ou seja, ( $y_i = 1000x_i$ ) para todo  $i$  em certa região, apesar de uma grande discrepância entre  $x_i$  e  $y_i$ , a correlação fornecida por CC entre  $x_i$  e  $y_i$  é igual a 1, falhando na detecção da anormalidade. Portanto, CC é um indicador numérico considerado inadequado para a comparação da resposta em freqüência que possam incluir medições com padrões similares em forma de onda mas diferentes em magnitude (KIM et al., 2005).

### 3.2.3 Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL)

O indicador numérico descrito pela equação 3.3 foi proposto por KIM et al. (2005) como ferramenta para indicar relação entre medições de RF, o autor afirma que entre todos os critérios de comparação examinados por ele para comparação de medições de RF, a SAEL é o mais indicado. O motivo é que geralmente as medições de RF são apresentadas em escala logarítmica para a comparação visual dos resultados, portanto, o que é visto no gráfico em escala logarítmica é calculada pela SAEL.

$$\delta_{SAEL}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N |20 \log_{10} y_i - 20 \log_{10} x_i|}{N} \quad (3.3)$$

## 3.3 Redes Neurais Artificiais (RNA)

O cérebro é um sistema de processamento de informação altamente complexo, não linear e paralelo. Ele tem a capacidade de organizar seus constituintes estruturais conhecidos por *neurônios*, de forma a realizar certos processos (p.ex. reconhecimento de padrões, percepção e controle motor) muito mais rapidamente que o computador digital hoje existente (HAYKIN, 2001). A rede neural artificial é um sistema de processamento da informação que tem características de desempenho em comum com as redes neurais biológicas (FAUSETT, 1994).

Segundo HAYKIN (2001), uma rede neural artificial é um processador maciço e paralelamente distribuído constituído de unidades de processamento simples (neurônios), que tem a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para o uso. Ela se assemelha ao cérebro em dois aspectos:

1. O conhecimento é adquirido pela rede a partir de seu ambiente através de um processo de aprendizagem;
2. Forças de conexão entre neurônios, conhecidas como pesos sinápticos, são utilizados para armazenar o conhecimento adquirido.

A RNA consiste em um grande número de elementos de processamento simples, chamados neurônios, unidades, células ou nós. Cada neurônio é conectado a outro neurônio por meio de elos de comunicação direta, cada um com um peso associado, que representam a informação que será usada pela rede para resolver o problema. RNA's podem ser aplicadas a uma grande variedade de problemas, tais como armazenagem e recuperação de dados, classificação de padrões, mapeamento de padrões de entrada para padrões de saída, agrupamento de padrões similares ou para encontrar soluções em problemas de otimização (FAUSETT, 1994).

Redes Neurais Artificiais têm sido desenvolvidas como generalização de modelos matemáticos do conhecimento humano, considerando que (FAUSETT, 1994):

1. O processamento da informação ocorre através de muitos elementos simples, denominados neurônios;
2. Os sinais são transmitidos entre os neurônios através de um elo de conexão;
3. Cada elo de conexão tem um peso associado, o qual, em redes neurais típicas são múltiplos do sinal transmitido;
4. Cada neurônio aplica uma função de ativação (normalmente não linear) em sua rede de entrada (soma dos pesos multiplicados pelos sinais de entrada) para determinar seu sinal de saída.

O procedimento utilizado para realizar o processo de aprendizagem é chamado de algoritmo de aprendizagem, cuja função é modificar os pesos sinápticos da rede de uma forma ordenada para alcançar um objetivo de projeto desejado (HAYKIN, 2001).

As redes neurais são caracterizadas pelo seu padrão de conexão entre neurônios (chamado arquitetura da rede), pelo seu método de determinação dos pesos nas conexões (chamado treinamento, ou aprendizado), e pela sua função de ativação (FAUSETT, 1994).

### 3.3.1 Modelo de um Neurônio

Um neurônio é uma unidade de processamento de informação que é fundamental para a operação de uma rede neural. A figura 3.1 indica o diagrama em blocos do modelo de um neurônio, que forma a base para o projeto de redes neurais artificiais. São identificados três elementos básicos do modelo neuronal (HAYKIN, 2001).

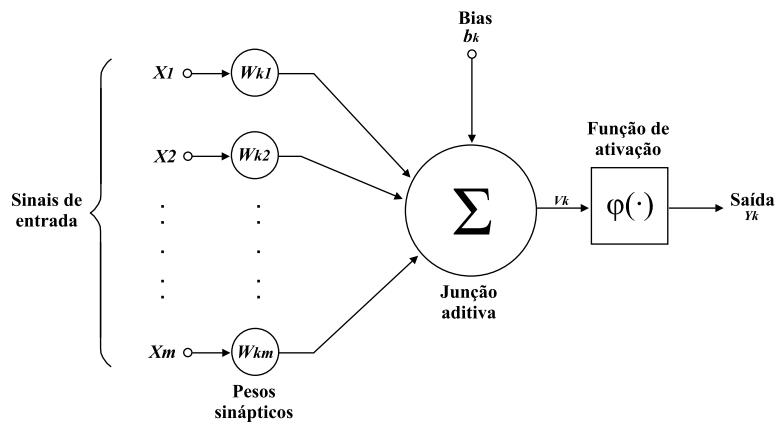


Figura 3.1: Modelo não-linear de um neurônio

1. Um conjunto de sinapses ou elos de conexão, cada uma caracterizada por um peso ou força própria. especificamente, um sinal  $x_j$  na entrada da sinapse  $j$  conectada ao neurônio  $k$  é multiplicado pelo seu peso sináptico  $w_{kj}$ . O primeiro índice do peso sináptico  $w_{kj}$  se refere ao neurônio em questão e o segundo se refere ao terminal de entrada da sinapse à qual o peso se refere. O peso sináptico de um neurônio artificial pode estar em um intervalo que inclui valores negativos bem como positivos.
2. Um somador para somar os sinais de entrada, ponderados pelas respectivas sinapses do neurônio (as operações descritas aqui constituem um combinador linear).
3. Uma função de ativação para restringir a amplitude da saída de um neurônio. A função de ativação é também referida como função restritiva já que restringe ou limita o intervalo permissível de amplitude do sinal de saída a um valor finito. Tipicamente, o intervalo normalizado da amplitude da saída de um neurônio é escrito como o intervalo unitário fechado  $[0,1]$  ou alternativamente  $[-1,1]$ .

### 3.3.2 Rede Neural Artificial tipo GRNN

A rede tipo GRNN é uma variação da rede de base radial (RBF- *radial basis function*) que é uma rede que apresenta grande capacidade de generalização e é utilizada principalmente

para a aproximação de funções (CARDOSO JR, 2003). O projeto de uma RBF pode ser visto como um problema de ajuste de curva (aproximação) em um espaço de alta dimensionalidade. De acordo com este ponto de vista, aprender é equivalente a encontrar uma superfície em um espaço multidimensional, que forneça o melhor ajuste para os dados de treinamento, com o critério de melhor ajuste sendo medido em um sentido estatístico. Correspondentemente, generalização é equivalente ao uso desta superfície multidimensional para interpolar os dados de teste. No contexto de uma rede neural, as unidades ocultas fornecem um conjunto de funções que constituem uma base arbitrária para os padrões (vetores) de entrada, quando eles são expandidos sobre o espaço oculto: estas funções são chamadas de funções de base radial (HAYKIN, 2001).

A rede GRNN é uma rede direta, que a partir de um vetor de entrada  $\vec{x}$ , calcula um vetor de saída  $\vec{y}$ . Sua arquitetura pode ser vista na figura 3.2 (CARDOSO JR, 2003).

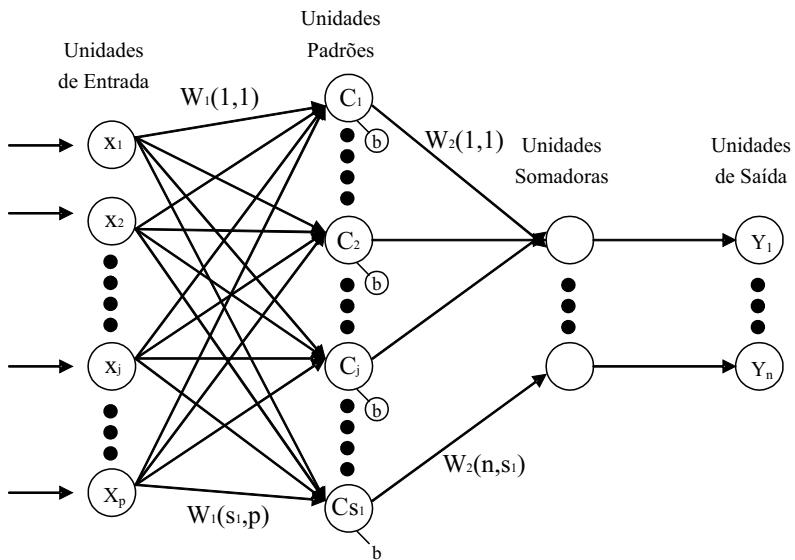


Figura 3.2: Arquitetura da rede neural artificial tipo GRNN.

As unidades de entrada têm como função distribuir as variáveis  $x$  a todos os neurônios que compõem a camada padrão (unidades padrões), onde:

$\vec{x}$  - vetor que contém todas as variáveis de entrada.

$p$  - corresponde ao número de variáveis de entrada.

Cada neurônio pertencente à camada padrão corresponde a um exemplar (ou um centro de agrupamento). O número de neurônios que compõem esta camada corresponde ao número de exemplares utilizados no aprendizado. Após o aprendizado, quando um novo vetor é apresentado à rede, é calculada a distância entre este e os exemplares previamente definidos e armazenados. Geralmente é utilizada a distância euclidiana na realização destes cálculos.

O valor quadrático ou absoluto destas diferenças é somado e multiplicado pelo bias, sendo então enviados a uma função de ativação não-linear. Os valores de saída destas unidades diminuem gradualmente na medida em que a distância entre o vetor de entrada e o vetor que representa o padrão armazenado (centro de agrupamento) aumenta.

Normalmente utiliza-se uma exponencial como função de ativação. As unidades pertencentes à camada padrão podem ser visualizadas na figura 3.3. O valor 0,8326 é obtido calculando a raiz quadrada do logaritmo neperiano de 0,5, portanto, se a distância euclidiana for igual ao espalhamento (*spread*), a resposta do neurônio será 0,5 (CARDOSO JR, 2003).

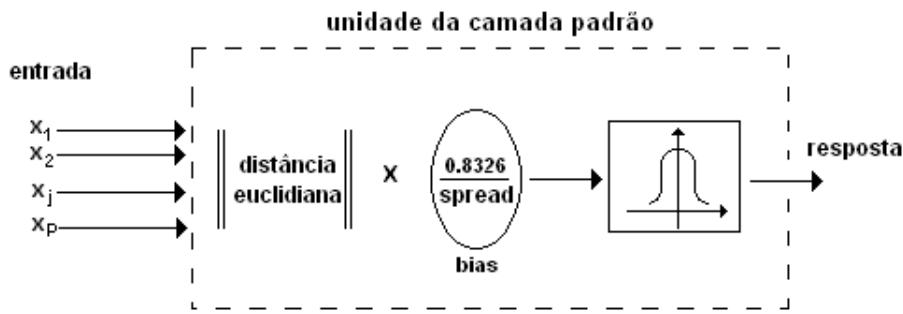


Figura 3.3: Princípio de funcionamento interno da unidade padrão.

O ajuste do parâmetro *spread* é realizado de maneira heurística, sendo este geralmente um valor entre a mínima e máxima distância entre os vetores que correspondem aos padrões armazenados. Caso o parâmetro *spread* seja muito grande, várias unidades poderão ser excitadas quando uma entrada for apresentada à rede. Neste caso, dizemos que a rede apresenta uma capacidade de generalização demasiada. Caso contrário, se o valor for muito pequeno, implica em uma excitação única e exclusiva da unidade que possuir o exemplar mais próximo ao vetor apresentado à rede, sendo esta incapaz de generalizar (CARDOSO JR, 2003).

O desempenho da rede é principalmente influenciado pelo parâmetro de ajuste do bias (*spread*) e pelos padrões armazenados. A saída das unidades pertencentes à camada padrão é enviada à camada de soma, onde o número de unidades que compõem esta camada corresponde ao número de observações (saídas desejadas). As unidades de soma têm a função de realizar o somatório da saída das unidades padrão, de acordo com o número de observações que cada exemplar representa. Este número de observações varia conforme o número de saídas desejadas, no caso mostrado na figura 3.2 com  $n$  saídas. As unidades de camada de saída simplesmente dividem cada um dos somatórios resultantes das unidades de soma pelo somatório total de todas as unidades que compõem a camada de soma (CARDOSO JR, 2003).

A saída da rede é calculada de forma direta pela equação

$$\vec{y}(\vec{x}) = \frac{\vec{w}^2 \vec{a}(\vec{x})}{\vec{1}^T \vec{a}(\vec{x})} \quad (3.4)$$

onde

$$\vec{1} = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \dots 1_{S1}]^T \quad (3.5)$$

e

$$a_j(\vec{p}) = f(\|\vec{w}_j^1 - \vec{x}\| \vec{b}_j) \quad (3.6)$$

sendo  $j$ , o  $j$ -ésimo elemento de  $\vec{a}$  e  $\|\vec{w}_j - \vec{x}\|$ , a distância euclidiana entre a  $j$ -ésima linha da matriz peso  $W$  e o vetor de entrada  $\vec{x}$ . Do mesmo modo,  $\vec{b}_j$  é o  $j$ -ésimo *bias*. A função de transferência ou função ativação  $f$  é dada por:

$$f(\vec{n}) = e^{-\vec{n}^2} \quad (3.7)$$

Entre as principais vantagens apresentadas pelas redes do tipo GRNN podemos citar (CARDOSO JR, 2003):

- o processo de aprendizado ocorre em um único passo (não é necessário um processo iterativo) e pode generalizar a partir de exemplos tão logo estes sejam armazenados;
- fácil implementação;
- o resultado é limitado aos vetores mínimos e máximos das observações;
- não converge a um mínimo local da função utilizada como critério de erro (isto pode ocorrer com processos iterativos), uma vez que esta não utiliza tal função.

A principal desvantagem, em relação a outras redes, é que requer substancial esforço computacional para avaliar novos pontos, quando o conjunto de exemplos utilizado durante o treinamento for muito grande. Neste caso, segure-se a utilização de técnicas de agrupamento (*cluster*) para primeiramente definir o centro dos agrupamentos (CARDOSO JR, 2003).

## 3.4 Conclusões

Com a finalidade de dar maior suporte ao diagnóstico do estado de enrolamento de transformadores de potência, e não simplesmente realizar uma análise visual dos resultados obtidos com a FRA, foram apresentados e comentados três indicadores numéricos estatísticos

e a rede neural tipo GRNN que serão implementados neste trabalho. Com tais ferramentas, serão analisados dados referentes a medições de ensaios de RF obtidos com um pesquisador da área e uma empresa do setor elétrico.

Podemos separar os dados que serão analisados em dois grupos, no primeiro grupo, os dados são medições realizadas em um transformador de potência, cujo enrolamento primário sofreu vários graus de deformação radial propositalmente. O segundo grupo de dados se refere à ensaios realizados no parque de transformadores de potência de uma empresa do setor, como parte da rotina de manutenção preventiva. Neste sentido, serão implementados e avaliados algoritmos com os indicadores numéricos e a GRNN propostos, com a finalidade de indicar e quantificar as diferenças entre as medições analisadas.

Cabe ressaltar que a FRA não é uma técnica de diagnóstico absoluta, e sim um método de comparação, por este motivo o estudo e avaliação de metodologias e técnicas que auxiliem na interpretação dos resultados de FRA torna-se recomendável.

# Capítulo 4

## Implementação das Ferramentas de Diagnóstico e Resultados Obtidos

### 4.1 Considerações Gerais

Neste capítulo são implementadas as ferramentas descritas no capítulo 3 para o diagnóstico através da análise da resposta em freqüência. Os algoritmos serão aplicados a dois conjuntos de dados referentes a medições obtidas com ensaios de resposta em freqüência realizadas por um renomado pesquisador da área e uma empresa do setor elétrico. Com os resultados da implementação dos algoritmos será realizada uma análise preliminar da aplicabilidade de cada algoritmo para quantificar as diferenças entre os resultados das medições de resposta em freqüência (RF).

Seria interessante para o desenvolvimento do trabalho analisar o maior número possível de dados de ensaios de RF, envolvendo a maior quantidade possível de faltas, de modo a se ter um processo confiável para a avaliação das ferramentas desenvolvidas. No entanto, devido à dificuldade de obter dados de ensaios de resposta em freqüência que descrevam tais condições, será analisado apenas um número limitado de dados descrevendo condições de falta. Os casos que serão analisados, assim como o que representam serão descritos nos itens a seguir.

Vale salientar que todas as funções de transferência obtidas com medições de RF serão divididas em faixas de freqüências para as análises. Estas faixas estão compreendidas entre 10 Hz e 50 kHz para a baixas freqüências, 50 kHz e 1 MHz para as médias freqüências e entre 1 MHz e 2 MHz para as altas freqüências. A partição das freqüências nestas faixas foi proposta por KIM et al. (2005) e foi escolhida empiricamente tendo em conta alguns aspectos típicos da magnitude da resposta em freqüência de transformadores de potência.

Ao final deste capítulo será apresentado um resumo da avaliação do desempenho de cada indicador numérico e da rede tipo GRNN no tocante à avaliação e diagnóstico das funções de transferência utilizadas.

## 4.2 Análise de Dados de Ensaios de RF

### 4.2.1 Grupo 1 - Análise de Deformações Radiais

O primeiro conjunto de dados que será analisado é proveniente de ensaios de RF obtidos com o Prof. Dr. Stefan Tenbohlen do Instituto de Transferência de Energia e Tecnologias de Alta Tensão da Universidade de Stuttgart (Alemanha). Os dados se referem a medições de RF realizadas em um transformador de potência onde foram realizadas propositalmente deformações radiais no enrolamento de alta tensão, com a finalidade de analisar o comportamento das funções de transferência medidas para vários níveis de deformação mecânica. Os diagramas de RF obtidos se referem à transferência de tensão entre os enrolamentos de alta tensão (AT) e baixa tensão (BT) (caso 1), e a admitância do enrolamento em que as deformações foram realizadas (caso 2). A figura 4.1 mostra um resumo dos diferentes níveis de deformação que o enrolamento de alta tensão sofreu. A profundidade do afundamento (deformação radial) é de 1 cm, correspondente a 3,5 % do diâmetro do enrolamento. Considerando que o enrolamento pode ser dividido em 4 faces ou partes, cada nível de deformação representa a deformação radial de 1 cm em níveis relativos de deformação axial em cada face. Como mostrado na figura 4.1, no nível de deformação 9, que é o mais severo, 100 % das faces A, B e C e 50 % da face D foram danificadas.

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

Figura 4.1: Níveis de deformação do enrolamento em estudo

Imagens dos níveis de deformação 1 e 6 são mostrados na figura 4.2.

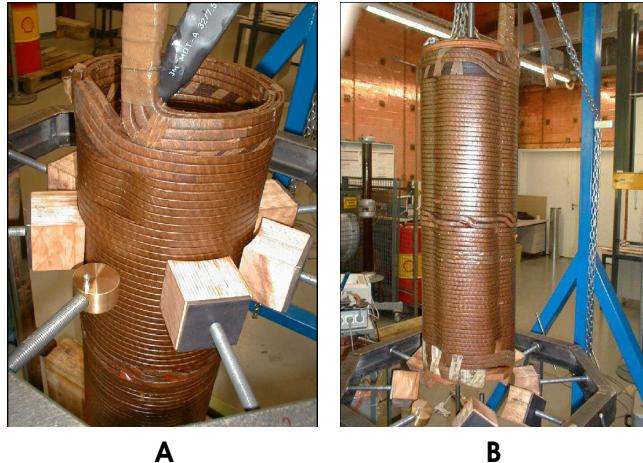


Figura 4.2: Enrolamento de AT a) Nível de deformação 1 b) Nível de deformação 6

A figura 4.3(a) mostra as funções de transferência do caso de estudo 1, medidas para os diferentes níveis de deformação realizados, que representam a transferência de tensão entre os enrolamentos AT e BT. No esquema de ligação e medição para a realização da FRA, o sinal de excitação foi aplicado ao enrolamento de alta tensão e a tensão foi medida no enrolamento de baixa tensão para assim calcular a transferência de tensão entre os enrolamentos. A figura 4.3(b) mostra as funções de transferência do caso de estudo 2, medidas para os diferentes níveis de deformação simulados. Estas funções de transferência representam a admitância do enrolamento de alta tensão. No esquema de ligação e medição para a realização da FRA, o sinal de excitação foi aplicado no enrolamento de AT e a corrente foi medida também no enrolamento AT, para assim calcular a admitância do mesmo.

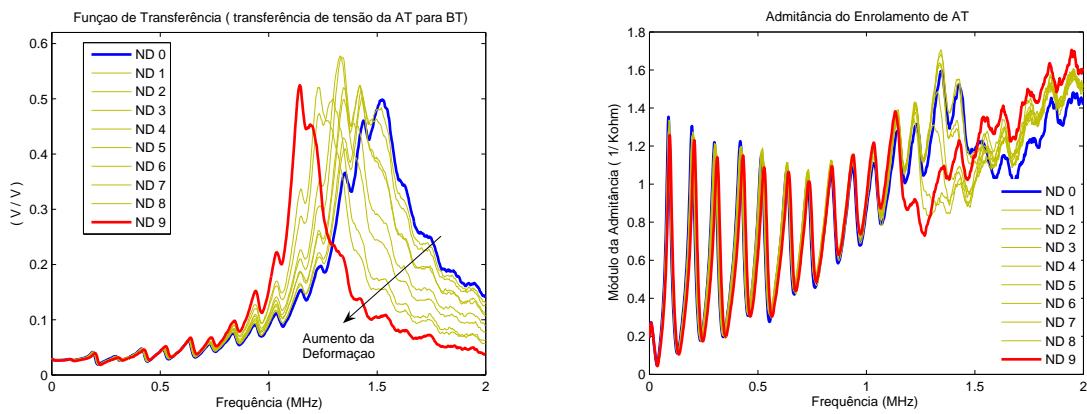


Figura 4.3: Funções de transferência - Grupo 1

Primeiramente serão comparadas as funções de transferência como um todo, ou seja,

não será realizada nenhuma partição em grupos de freqüências. Posteriormente, para avaliar a diferença das medições em função da faixa de freqüências de interesse, cada função de transferência será dividida em três grandes faixas de freqüências, já descritas anteriormente.

As figuras 4.4 (a), (b) e (c) ilustram a transferência de tensão entre enrolamentos (caso 1) divididas em baixas, médias e altas freqüências respectivamente.

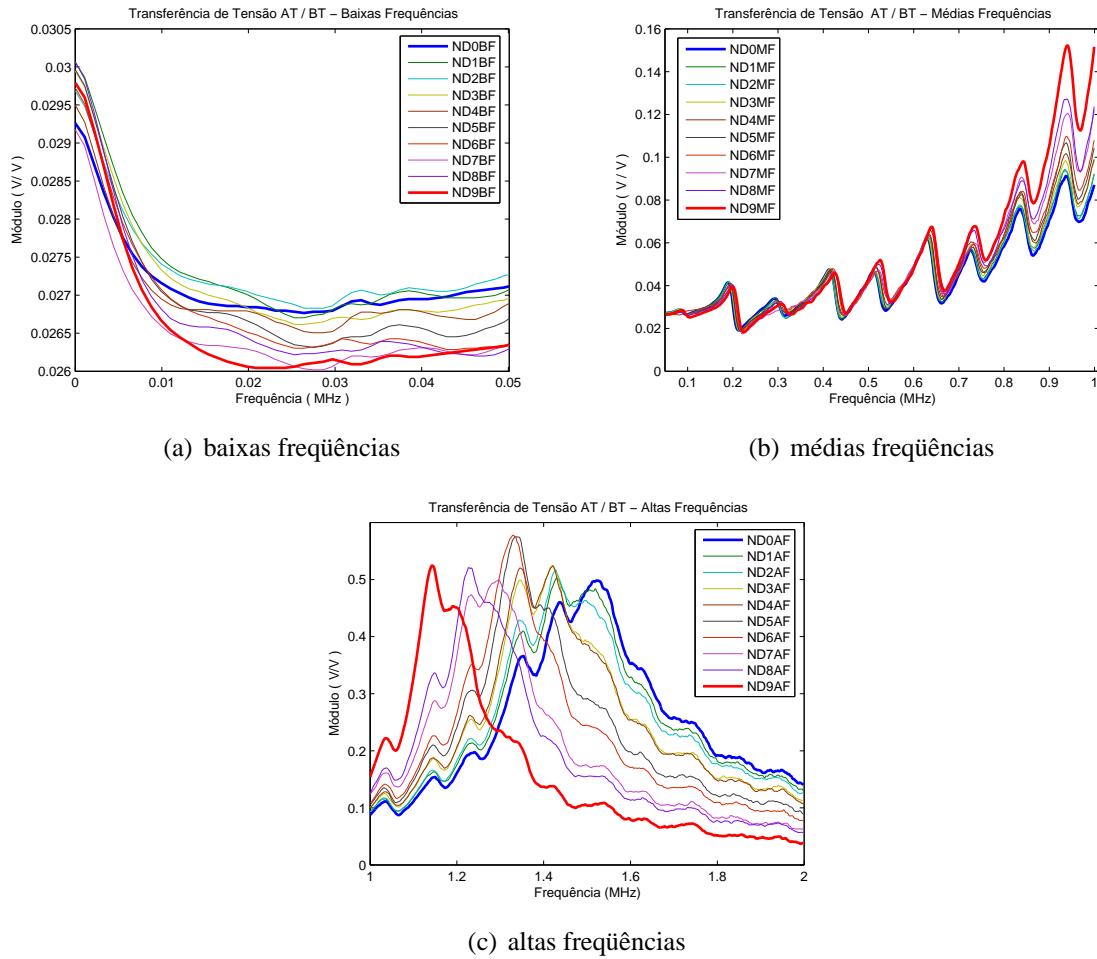


Figura 4.4: Transferência de tensão AT / BT – Grupo 1 – Caso 1

As figuras 4.5 (a), (b) e (c) ilustram o módulo da admitância do enrolamento de AT (caso 2) divididas em baixas, médias e altas freqüências respectivamente.

Como as ferramentas implementadas representam numericamente as funções de transferência estudadas, é importante realizar uma análise visual prévia destas curvas. Desta forma, a seguir é apresentado um resumo das características das funções de transferências do caso 1, analisadas por faixas de freqüências.

Com a inspeção visual das funções de transferência que representam níveis de deformação realizados (grupo 1) observa-se:

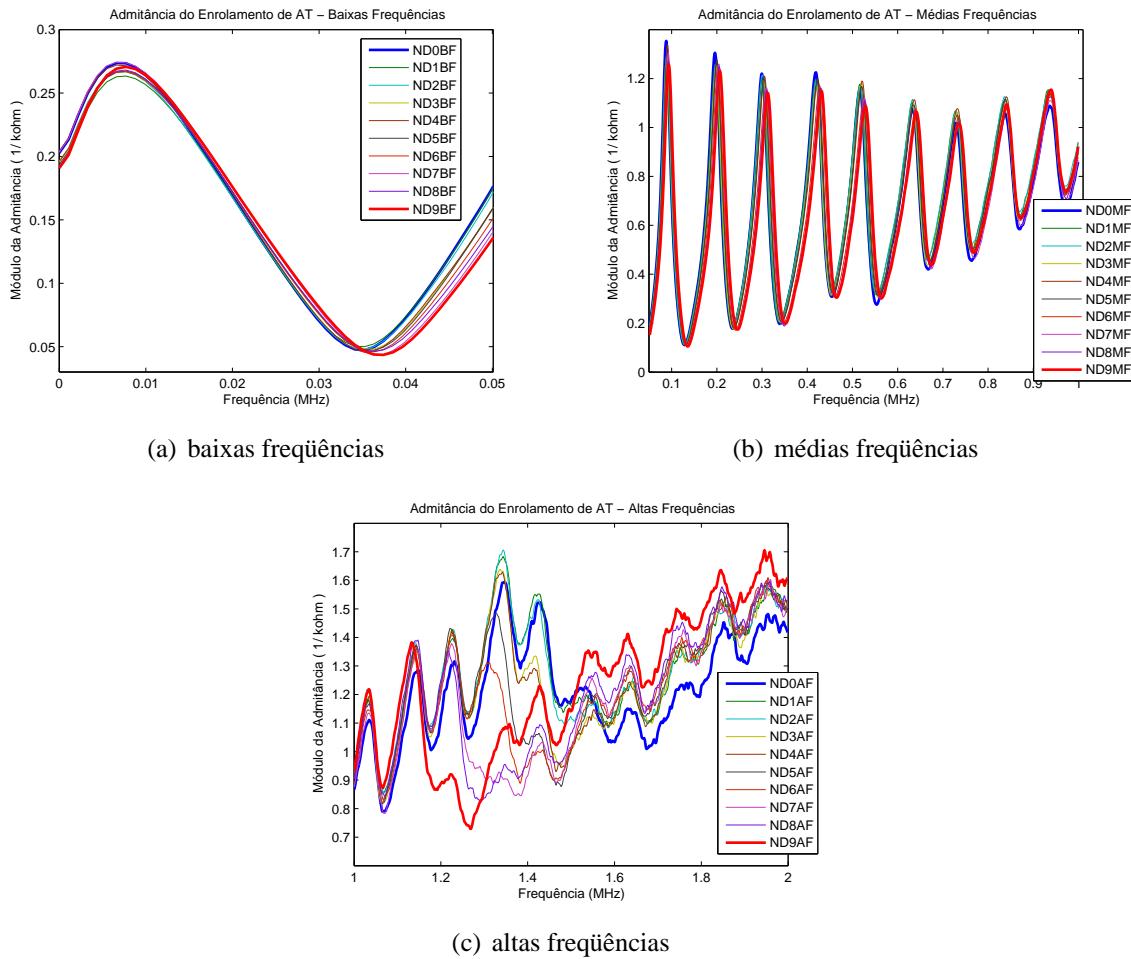


Figura 4.5: Admitância do enrolamento de AT – Grupo 1 – Caso 2

- Transferência de Tensão AT/BT (caso 1):
  - Baixas Freqüências: Variações pouco significativas, apenas pequenas variações na amplitude.
  - Médias Freqüências: Aumento da amplitude da função de transferência proporcional ao nível de deformação.
  - Altas Freqüências: Deslocamento do pico máximo de ressonância da função de transferência proporcional ao nível de deformação. Eliminação de algumas freqüências de ressonância conforme aumento da intensidade da deformação.
- Admitância do Enrolamento AT (caso 2):
  - Baixas Freqüências: Pequeno deslocamento horizontal das curvas proporcional à intensidade da deformação mecânica.
  - Médias Freqüências: Variação na amplitude das curvas com aumento proporcional à intensidade da deformação.

- Altas Freqüências: Variação significativa na amplitude e forma global das curvas, principalmente com o aumento da intensidade da deformação mecânica.

#### 4.2.2 Grupo 2 - Análise de Ensaios de RF em Empresa do Setor Elétrico

Em uma etapa anterior, foram obtidos diagramas de ensaios de RF de vários transformadores pertencentes a uma empresa do setor elétrico. Estes dados em sua maioria eram “impressões digitais” de transformadores em perfeito estado de funcionamento. Entre os diagramas de RF de transformadores sob suspeita de falta, foram selecionados dois casos (caso 3 e caso 4), referentes a medições de RF em transformadores distintos. Os ensaios foram realizados com a metodologia SFRA utilizando um analisador de redes da DOBLE Engineering Co.

Os dados para o caso de análise 3 se referem a medições de RF realizadas em um transformador móvel de 30 MVA, 145-13 kV, conexão Y/Δ, adquirido pela empresa em 2004. Entre os ensaios exigidos pela empresa no comissionamento do equipamento estava o ensaio de trafegabilidade, cujo objetivo é verificar a capacidade do transformador móvel, completamente montado, de resistir a todos os esforços de aceleração dinâmica e de deformação específica resultantes de frenagens, vibrações, etc., ocasionadas pelo seu tráfego por estradas pavimentadas e não pavimentadas. Foi realizado o ensaio de RF antes e depois do ensaio de trafegabilidade, onde foi possível observar alterações, conforme apresentados nas figuras 4.6 e 4.7, que representam os módulos das impedâncias (separados em faixas de freqüências) dos enrolamentos do transformador antes e depois do ensaio de trafegabilidade.

Os dados para o caso de análise 4 consistem em medições de RF em um transformador de 69-13,8 kV, 41,67 MVA conexão Y/Δ e com regulação sob carga. Durante a operação normal do transformador ocorreu disparo dos disjuntores pela atuação da proteção diferencial (proteção 87). Havendo tentativa de religamento do equipamento, novamente ocorreu a atuação da proteção 87. Por esta razão, foi realizada a coleta de óleo, ensaios no relé e inspeção no transformador, não tendo sido encontrado nenhum problema, inclusive com a cromatografia gasosa. O transformador foi submetido a ensaios elétricos, observando-se pequenas alterações na relação de transformação e impedância da fase A, porém foi a SFRA que apresentou resultados conclusivos indicando o enrolamento que se encontrava danificado (DE AGUIAR, 2005). A figura 4.8(a) mostra os diagramas de resposta em freqüência representando o módulo da impedância dos enrolamentos de alta tensão e a figura 4.8(b) mostra os diagramas de resposta em freqüência representando o módulo da impedância dos enrolamentos de baixa tensão. Como não se dispõe de “impressões digitais” do transformador em estudo para a comparação de medições de RF antes e depois do evento, a comparação das medições será realizada entre fases, isto porque como observado na figura 4.8, aparentemente só os enrolamentos da fase A do transformador se encontram danificados, validando a comparação entre

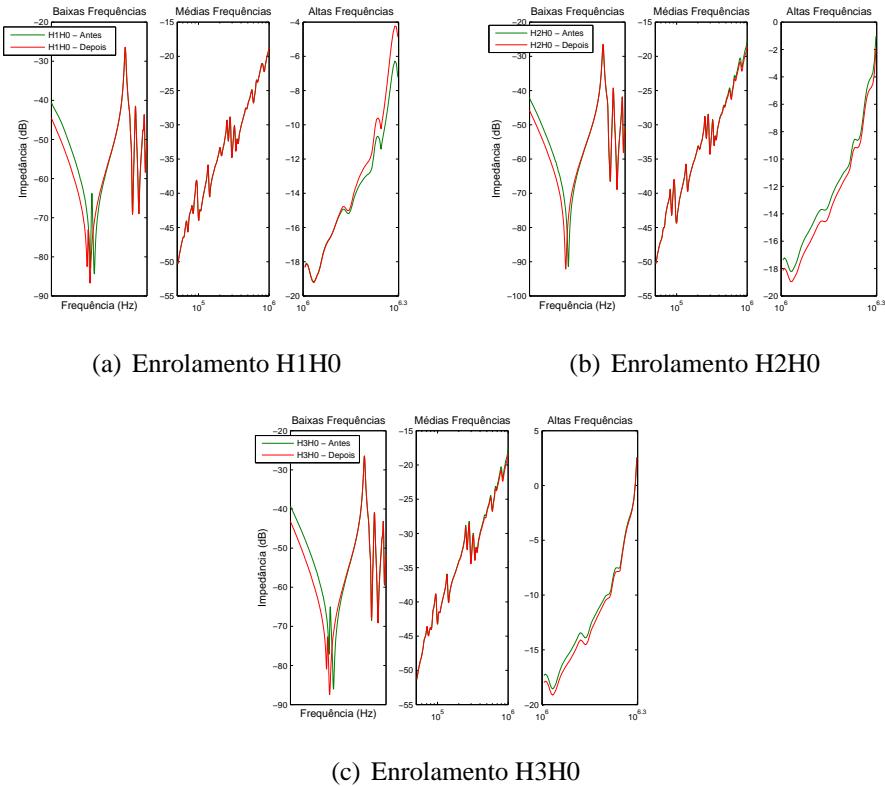


Figura 4.6: Medições de RF do caso 3 – Enrolamentos de AT

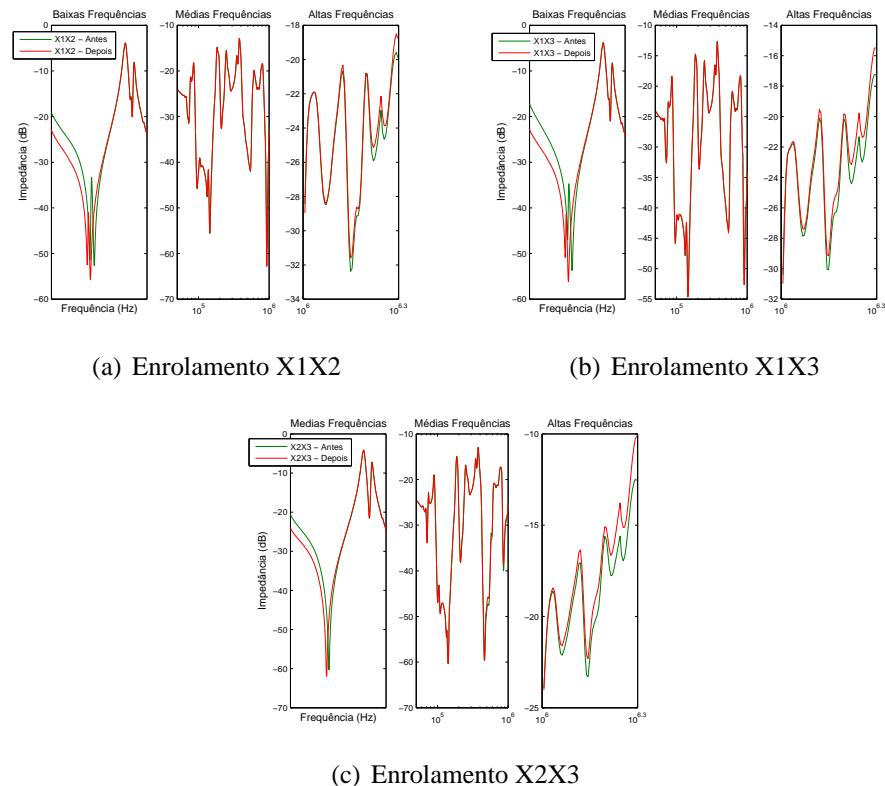
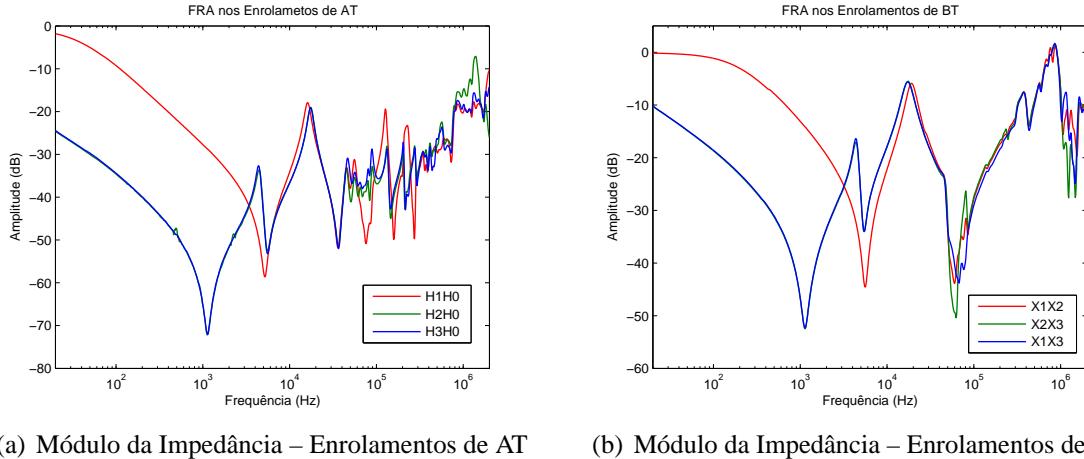


Figura 4.7: Medições de RF do caso 3 – Enrolamentos de BT

fases. Deve-se tomar muito cuidado no diagnóstico de danos neste tipo de comparação, já que como mostrado no capítulo 2 item 2.1, cada enrolamento possui características inerentes que levam a diferenças nas suas características de resposta em freqüência mesmo quando da inexistência de danos.

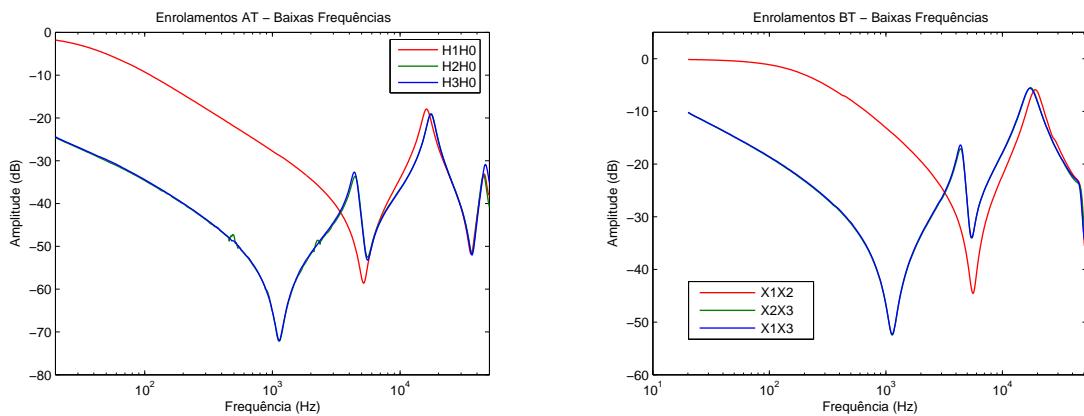


(a) Módulo da Impedância – Enrolamentos de AT

(b) Módulo da Impedância – Enrolamentos de BT

Figura 4.8: Diagramas de RF do transformador sob suspeita de dano – caso 4

Com o objetivo de uma melhor interpretação visual dos módulos das funções de transfe- rências disponíveis, são separados em faixas de freqüências conforme indicado nas figuras 4.9, 4.10 e 4.11.



(a) Módulo da Impedância – Enrolamentos de AT

(b) Módulo da Impedância – Enrolamentos de BT

Figura 4.9: Diagramas de RF – baixas freqüências – caso 4

No grupo de dados obtidos com a empresa, se encontravam disponíveis “impressões digitais” que representam diagramas de RF do módulo da impedância de um transformador trifásico 69-13,8 kV de 41,67 MVA com as mesmas características do transformador sob suspeita de dano, porém, consta nos dados enviados que este equipamento já foi recuperado por uma fábrica de transformadores, fato que impede que estas “impressões digitais” sejam utilizadas para a comparação com as medições de RF do transformador sob suspeita,

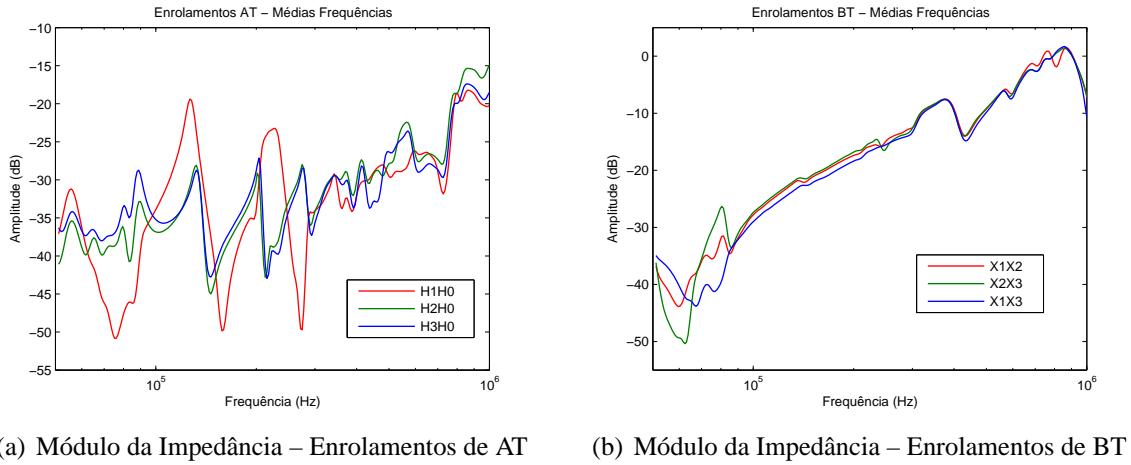


Figura 4.10: Diagramas de RF – médias freqüências – caso 4

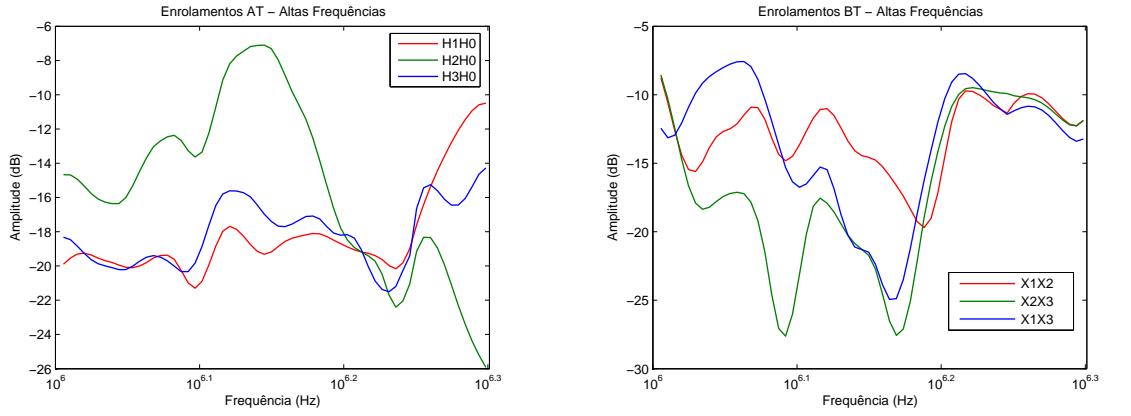


Figura 4.11: Diagramas de RF – altas freqüências – caso 4

devido ao fato que a distribuição de parâmetros físicos no transformador recuperado foi alterada. Porém, uma informação muito importante pode ser obtida das “impressões digitais” do transformador recuperado. Os diagramas de RF do transformador citado podem ser avaliados com os indicadores numéricos para assim quantificar numericamente diferenças típicas em transformadores em perfeito estado de funcionamento quando são comparados entre fases. Desta forma, pode-se ter uma maior sensibilidade das diferenças típicas dos valores dos indicadores numéricos e assim poder realizar uma melhor interpretação destes na análise dos diagramas de RF do transformador sob suspeita de dano. A figura 4.12 ilustra os módulos das impedâncias dos enrolamentos do transformador de 41,67 MVA em perfeito estado de funcionamento utilizados na análise.

Uma avaliação visual das funções de transferência do grupo 2 é apresentada a seguir. Cabe ressaltar que as curvas do caso 3 são referentes ao ensaio de RF antes e depois do ensaio de trafegabilidade ao qual o transformador foi submetido. Portanto medições são

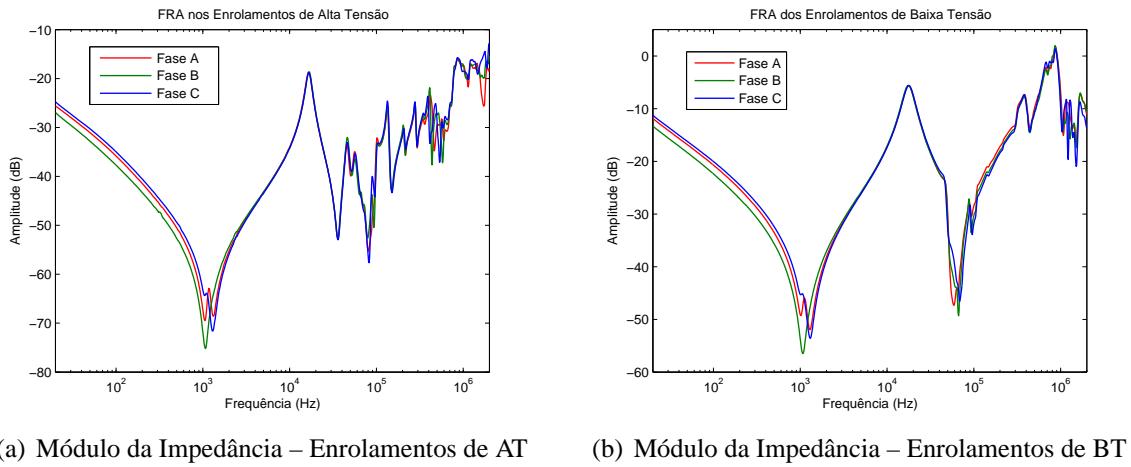


Figura 4.12: Diagramas de RF do transformador de 41.67 MVA em perfeito estado

comparadas com *impressões digitais*. No entanto, no caso de estudo 4, *impressões digitais* não se encontram disponíveis e as comparações são realizadas entre fases.

Com a inspeção visual das funções de transferência ou diagramas de RF do grupo 2, observam-se as seguintes características:

- Diagramas de RF do caso 3:
  - Baixas Freqüências: Variação significativa na amplitude das funções de transferência de todos os enrolamentos em freqüências inferiores a 2 kHz.
  - Médias Freqüências: Diferenças insignificantes entre as curvas para todos os enrolamentos.
  - Altas Freqüências: Pequenas diferenças na amplitude das curvas para todos os enrolamentos.
- Diagramas de RF do caso 4:
  - Baixas Freqüências: Curvas referentes aos enrolamentos da fase A tanto em AT como em BT possuem amplitudes diferentes das demais curvas.
  - Médias Freqüências: O enrolamento H1H0 difere de forma global das demais curvas dos enrolamentos de AT. Já nas curvas que representam os enrolamentos de BT, as diferenças entre as curvas não permitem identificar algum problema.
  - Altas Freqüências: todas as curvas são diferentes em amplitude e forma, tornando difícil algum diagnóstico nesta faixa de freqüências.

Na região das altas freqüências, como já foi abordado no item 2.4.2, quando a metodologia de SFRA é utilizada para realizar o ensaio de RF, pode existir uma interferência

indesejável dos cabos de medição nos resultados. Nos diagramas de FRA dos casos 3 e 4, especificamente nas altas freqüências é observado que todos os diagramas são diferentes em amplitude e forma, o que torna difícil chegar a um diagnóstico. Portanto, nestes casos de estudo, a região das altas freqüências não será considerada para diagnosticar os transformadores a serem analisados.

## 4.3 Implementação dos Algoritmos

Os indicadores numéricos e a rede neural artificial apresentados no capítulo 3 foram implementados no ambiente MATLAB®, com a finalidade quantificar as diferenças entre funções de transferência. Os parâmetros utilizados na implementação da GRNN serão comentados à medida que os resultados fornecidos por esta rede neural sejam apresentados.

Em relação ao primeiro grupo de diagramas de RF no item 4.2.1, as funções de transferência (FT) disponíveis são separadas em dois casos de estudo, caso de estudo 1 (figura 4.3a) e caso de estudo 2 (figura 4.3b). Estas funções de transferência serão analisadas com os três indicadores numéricos estatísticos, e, devido à quantidade suficiente de curvas disponíveis para treinar e testar a RNA, também serão analisadas com a GRNN. Como nestes casos se conhece exatamente qual curva representa cada nível de deformação realizado, os coeficientes obtidos com a implementação dos algoritmos serão avaliados no sentido de estimar se estes representam numericamente as diferenças reais nas medições de RF analisadas visualmente.

No segundo grupo de diagramas de RF no item 4.2.2, também serão analisados dois casos de estudo. O caso de estudo 3 (figuras 4.6 e 4.7) e o caso de estudo 4 (figura 4.8). Nestes casos serão utilizados apenas os três indicadores numéricos estatísticos implementados (SEQ, CC e SAEL) devido à quantidade reduzida de curvas disponíveis, impossibilitando o treinamento e teste da rede GRNN. Para uma análise com a RNA, pelo menos deveriam estar disponíveis duas curvas para treinamento, (condição normal e falha) e uma curva para teste da rede neural.

## 4.4 Resultados Obtidos – Análise de Deformações Radiais

### 4.4.1 Caso de estudo 1 - Diagramas de RF da Transferência de Tensão entre Enrolamentos AT – BT

A seguir serão apresentados os resultados referentes à implementação dos algoritmos que calculam a Soma do Erro Quadrático (SEQ), o Coeficiente de Correlação (CC), a Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL) para as funções de transferência que representam a transferência de tensão entre enrolamentos de AT e BT. Também serão apresentados os resultados obtidos com a rede neural tipo GRNN que indica se diagramas de RF apresentados se encontram em condição normal ou em falta.

#### Resultados obtidos com a Soma do Erro Quadrático (SEQ)

São comparados cada nível de deformação (ND) com o nível de deformação 0 ou referência que representa o enrolamento em perfeito estado de funcionamento.

A Tabela 4.1 mostra a análise das funções de transferência como um todo, ou seja, sem partição em freqüências de interesse. A Tabela 4.2 apresenta a mesma análise, porém com as funções de transferência divididas em três faixas de freqüências: baixas, médias e altas freqüências. Como esperado, à medida que o nível de deformação aumenta, o coeficiente SEQ aumenta, indicando uma maior diferença entre as curvas analisadas.

Tabela 4.1: Avaliação da Transferência de Tensão entre Enrolamentos com a SEQ, sem Partição em Faixas de Freqüências

Soma do Erro Quadrático (SEQ)	
ND	Valor
0	0,00000000
1	0,00028847
2	0,00064018
3	0,00251537
4	0,00292227
5	0,00705653
6	0,00991497
7	0,01587950
8	0,01838688
9	0,02557656

Com a análise visual dos diagramas de RF do caso 1, especificamente na região das baixas freqüências, observa-se muito pouca diferença entre os diagramas representando os níveis de deformação do enrolamento em estudo. Assim, podemos admitir que nessa região de freqüências as deformações não causaram modificações consideráveis na RF. Na

Tabela 4.2: Avaliação da Transferência de Tensão entre Enrolamentos com a SEQ em Faixas de Freqüências

Soma do Erro Quadrático (SEQ)			
ND	Baixas Freqüências	Médias Freqüências	Altas Freqüências
0	0,000000000	0,000000000	0,000000000
1	0,000000098	0,000002612	<b>0,000574766</b>
2	0,000000046	0,000003023	<b>0,001278200</b>
3	0,000000069	<b>0,000010915</b>	<b>0,005023148</b>
4	0,000000039	<b>0,000020344</b>	<b>0,005828452</b>
5	0,000000155	<b>0,000029258</b>	<b>0,014093046</b>
6	0,000000223	<b>0,000050537</b>	<b>0,019792876</b>
7	0,000000401	<b>0,000117604</b>	<b>0,031664813</b>
8	0,000000327	<b>0,000149809</b>	<b>0,036651776</b>
9	0,000000449	<b>0,000375145</b>	<b>0,050825122</b>

região das médias freqüências, diferenças consideráveis são observadas a partir do nível de deformação 3. Neste contexto, podemos estabelecer o valor do coeficiente SEQ na região das médias freqüências ( $3 \times 10^{-6}$  – Tabela 4.2), referente ao ND 2, como sendo o limiar que define diferenças consideráveis entre as medições. Como observado na Tabela 4.2, na região das altas freqüências, os coeficientes SEQ ultrapassam o limiar estabelecido já a partir do nível de deformação inicial. Na região das médias freqüências, o limiar estabelecido foi ultrapassado a partir do ND 3.

### Resultados obtidos com o Coeficiente de Correlação (CC)

A Tabela 4.3 ilustra a correlação de cada função de transferência, que representa um nível de deformação específico em relação à função de transferência de referência (ND=0). Neste caso foram analisadas os diagramas de RF sem partição em faixas de freqüências.

Tabela 4.3: Avaliação da Transferência de Tensão entre Enrolamentos com o CC, sem Partição em Faixas de Freqüências

Coeficiente de Correlação (CC)	
ND	Valor
0	1,000000000
1	0,99657212
2	0,99210426
3	<b>0,96849292</b>
4	<b>0,96355151</b>
5	<b>0,90924339</b>
6	<b>0,87006030</b>
7	<b>0,78289582</b>
8	<b>0,74459835</b>
9	<b>0,62325817</b>

Observamos na Tabela 4.3 a variação do CC à medida que o nível de deformação au-

Tabela 4.4: Avaliação da Transferência de Tensão entre Enrolamentos com o CC em Faixas de Freqüências

Coeficiente de Correlação (CC)			
ND	Baixas Freqüências	Médias Freqüências	Altas Freqüências
0	1,00000000	1,00000000	1,00000000
1	0,99995587	0,99973343	0,99648558
2	0,99999282	0,99956068	0,99189918
3	0,99995395	0,99906028	<b>0,96765517</b>
4	0,99998800	0,99841816	<b>0,96260233</b>
5	0,99992144	0,99758034	<b>0,90671823</b>
6	0,99991658	0,99581971	<b>0,86638729</b>
7	0,99997645	0,99101623	<b>0,77647795</b>
8	0,99987663	0,98900779	<b>0,73680915</b>
9	0,99989764	<b>0,97744548</b>	<b>0,61080890</b>

menta, mas a diferença entre os coeficientes torna-se considerável apenas a partir do nível de deformação 3. Foi considerada uma diferença significativa entre dois diagramas quando o valor do coeficiente de correlação foi menor que 0,98.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados da comparação dos diagramas de RF do caso 1 através do CC com as funções de transferência divididas em baixas, médias e altas freqüências. Os resultados observados na Tabela 4.4 mostram que o CC ultrapassou o limiar estabelecido na região das altas freqüências novamente a partir do nível de deformação 3. Na região de médias freqüências, o limiar foi ultrapassado apenas no ND 9.

### Resultados obtidos com a Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL)

São ilustradas as relações de cada função de transferência em relação à função de transferência de referência.

A Tabela 4.5 mostra a análise das funções de transferência sem partição em faixas de freqüências. Observa-se nesta tabela o aumento do coeficiente SAEL com o aumento da deformação o enrolamento em estudo. A Tabela 4.6 apresenta a análise onde os diagramas de RF foram divididos em três faixas de freqüências.

Como comentado anteriormente, as deformações não causaram modificações consideráveis na RF em baixas freqüências. Na região das médias freqüências, a análise visual dos diagramas de FRA para este caso indica diferenças consideráveis a partir do nível de deformação 3. Assim, podemos estabelecer o valor do coeficiente SAEL na região das médias freqüências (0,28 – Tabela 4.6), referente ao ND 2, como sendo o limiar que define diferenças consideráveis entre as medições. Como observado na Tabela 4.6, na região das altas freqüências o valor limiar estabelecido é ultrapassado a partir do nível de deformação inicial.

Tabela 4.5: Avaliação da Transferência de Tensão entre Enrolamentos com a SAEL, sem Partição em Faixas de Freqüências

<b>Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL)</b>	
<b>ND</b>	<b>Valor</b>
0	0,00000000
1	0,42102592
2	0,61782009
3	1,20423253
4	1,36039383
5	2,09409866
6	2,66385605
7	3,74369598
8	4,10796046
9	5,57096453

Tabela 4.6: Avaliação da Transferência de Tensão entre Enrolamentos com a SAEL em Faixas de Freqüências

<b>Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL)</b>			
<b>ND</b>	<b>Baixas Freqüências</b>	<b>Médias Freqüências</b>	<b>Altas Freqüências</b>
0	0,00000000	0,00000000	0,00000000
1	0,06588218	0,19605309	<b>0,65298444</b>
2	0,05876056	0,27586362	<b>0,97139089</b>
3	0,06537398	<b>0,39199479</b>	<b>2,03427139</b>
4	0,05742102	<b>0,55044842</b>	<b>2,19675139</b>
5	0,11366679	<b>0,56825368</b>	<b>3,64515446</b>
6	0,13712221	<b>0,81178255</b>	<b>4,55289112</b>
7	0,19836262	<b>1,11199880</b>	<b>6,42558325</b>
8	0,17262864	<b>1,13354449</b>	<b>7,13539126</b>
9	0,20931434	<b>1,54802105</b>	<b>9,66763286</b>

Na região das médias freqüências este valor é ultrapassado a partir do nível de deformação 3.

### Resultados obtidos com a Rede Neural Artificial tipo GRNN

O objetivo da rede neural artificial tipo GRNN é indicar a condição da função de transferência entre normal e falta. A rede foi treinada com 4 curvas representando funções de transferência do caso em estudo. A curva que representa o nível de deformação 0 foi indicada à rede como sendo o estado em que o enrolamento se encontra em perfeita condição de funcionamento, já os níveis de deformação 1; 5 e 9 foram apresentados à rede como sendo curvas de RF que representam uma condição de falta. O espraiamento adotado para este caso foi de 0,6 e a rede neural foi testada com as curvas de RF restantes (níveis de deformação 2, 3, 4, 6, 7, e 8). Como já foi comentado no item 3.3.2 na capítulo 3, os vetores de entrada (diagramas de RF) têm como função distribuir as variáveis de entrada a todos os neurônios que compõem a camada padrão, neste caso, o número de variáveis que compõem cada vetor

de entrada é de 1817 pontos. Cada neurônio pertencente à camada padrão corresponde a um exemplar, neste caso um diagrama de RF. Portanto, como a rede foi treinada com 4 curvas, este é o número de neurônios da camada padrão. As unidades de soma têm a função de realizar o somatório da saída da unidade padrão de acordo com o número de observações que cada digrama de RF representa, ou seja, as opções de saídas desejadas, que neste caso são duas, condição normal e condição de falta.

A determinação de um limiar que defina uma diferença considerável entre os diagramas de RF é realizado de forma heurística, visto que requer uma certa sensibilidade do programador para determinar o espalhamento na camada padrão da GRNN e tem relação com a quantidade de dados disponíveis para o treinamento da rede. Desta forma, foi escolhido como limiar o valor 0,97, que se ultrapassado, indica uma condição de falta.

A Tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos com a implementação da rede neural tipo GRNN para a análise dos diagramas de RF sem partições em faixas de freqüências. Na mesma pode ser observado que a partir do nível de deformação 3 a rede indica uma condição de falta.

Tabela 4.7: Avaliação da Transferência de Tensão entre Enrolamentos com a GRNN, sem Partição em Faixas de Freqüências

Rede Neural Tipo GRNN		
ND	Condição Normal	Condição de Falta
2	0,126103	0,873897
3	0,009199	<b>0,990801</b>
4	0,002492	<b>0,997508</b>
6	0,000000	<b>1,000000</b>
7	0,000000	<b>1,000000</b>
8	0,000000	<b>1,000000</b>

Na análise em faixas de freqüências, o parâmetro que sofreu alterações foi o espalhamento, que de acordo com a faixa de freqüência possui um valor diferente desde que a magnitude dos valores são diferentes nas três faixas de freqüências. Os valores adotados são: spread=0,05 para baixas freqüências, spread=0,05 para médias freqüências e spread=0,3 para as altas freqüências. A Tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos com a implementação da rede neural tipo GRNN para a análise das funções de transferência divididas em baixas, médias e altas freqüências.

Como observado na Tabela 4.8, na região das altas freqüências, a rede neural foi capaz de identificar o estado de falta já a partir dos níveis de deformação iniciais, onde o limiar de 0,97 foi ultrapassado. Na região das médias freqüências, o limiar foi ultrapassado a partir do ND 4, indicando condição de falta.

Tabela 4.8: Avaliação da Transferência de Tensão entre Enrolamentos com a GRNN em Faixas de Freqüências

Rede Neural Tipo GRNN						
ND	Baixas Freqüências		Médias Freqüências		Altas Freqüências	
	Normal	Falta	Normal	Falta	Normal	Falta
2	0,250599	0,749401	0,368935	0,631065	0,000440	<b>0,999560</b>
3	0,250197	0,749803	0,112178	0,887822	0,000000	<b>1,000000</b>
4	0,250259	0,749741	0,012769	<b>0,987231</b>	0,000000	<b>1,000000</b>
6	0,249756	0,750244	0,000023	<b>0,999977</b>	0,000000	<b>1,000000</b>
7	0,249731	0,750269	0,000000	<b>1,000000</b>	0,000000	<b>1,000000</b>
8	0,249566	0,750434	0,000000	<b>1,000000</b>	0,000000	<b>1,000000</b>

#### 4.4.2 Caso de estudo 2 - Diagramas de RF da Admitância do Enrolamento Alta Tensão

A seguir serão apresentados os resultados referentes à implementação dos algoritmos que calculam a Soma do Erro Quadrático (SEQ), o Coeficiente de Correlação (CC), a Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL) para os diagramas de RF que representam a admitância do enrolamento de alta tensão. Também serão apresentados os resultados obtidos com a rede neural tipo GRNN que indica se os diagramas de RF apresentados se encontram em condição normal ou em falta.

Nas análises seguintes, são comparadas diagramas de RF representando cada nível de deformação com o diagrama de RF de referência (ND=0).

##### Resultados obtidos com a Soma do Erro Quadrático (SEQ)

A Tabela 4.9 mostra os coeficientes SEQ dos diagramas de RF representando os diferentes ND em relação ao diagrama de referência sem partição em faixas de freqüências. Podemos observar que à medida que o nível de deformação aumenta, a admitância do enrolamento em análise também varia, denotado pela variação do coeficiente SEQ.

Com a análise visual dos diagramas de RF na região das baixas freqüências é observado um deslocamento horizontal das curvas proporcional à intensidade da deformação mecânica realizada no enrolamento em estudo. Como observado na tabela 4.10, a partir do nível de deformação 6 na região das baixas freqüências, as magnitudes do SEQ aumentam consideravelmente. Desta forma, assumimos como o limiar de indicativo de falta o valor da SEQ correspondente ao nível de deformação 5, igual a  $66 \times 10^{-6}$ .

A Tabela 4.10 apresenta a análise onde as funções de transferência foram divididas em três faixas de freqüências: baixas, médias e altas freqüências. Observa-se valores da SEQ

Tabela 4.9: Avaliação da Admitância do Enrolamento AT com a SEQ, sem Partição em Faixas de Freqüências

Soma do Erro Quadrático (SEQ)	
ND	Valor
0	0,00000000
1	0,00425826
2	0,00527764
3	0,00742187
4	0,01031626
5	0,01670689
6	0,02565528
7	0,03803735
8	0,03921645
9	0,04578640

superiores ao limiar estabelecido nas regiões de médias e altas freqüências já a partir dos níveis de deformação iniciais, coerente com as diferenças observadas visualmente.

Tabela 4.10: Avaliação da Admitância do Enrolamento AT com a SEQ em Faixas de Freqüências

Soma do Erro Quadrático (SEQ)			
ND	Baixas Freqüências	Médias Freqüências	Altas Freqüências
0	0,00000000	0,00000000	0,00000000
1	0,00002849	<b>0,00159292</b>	<b>0,00700751</b>
2	0,00001483	<b>0,00215335</b>	<b>0,00851607</b>
3	0,00005639	<b>0,00256553</b>	<b>0,01241344</b>
4	0,00003801	<b>0,00709008</b>	<b>0,01391103</b>
5	0,00006612	<b>0,00522781</b>	<b>0,02846579</b>
6	<b>0,00010589</b>	<b>0,01548387</b>	<b>0,03663390</b>
7	<b>0,00022002</b>	<b>0,02384444</b>	<b>0,05346875</b>
8	<b>0,00016094</b>	<b>0,02552341</b>	<b>0,05423738</b>
9	<b>0,00028939</b>	<b>0,03333717</b>	<b>0,05995995</b>

### Resultados obtidos com o Coeficiente de Correlação (CC)

A Tabela 4.11 mostra os coeficientes CC dos diagramas de RF representando os diferentes ND em relação ao diagrama de referência sem partição em faixas de freqüências. A Tabela 4.12 apresenta a análise onde as funções de transferência foram divididas em baixas, médias e altas freqüências.

Foi considerado uma diferença significativa entre dois diagramas quando o valor do coeficiente de correlação foi menor que 0,98. Podemos observar através da Tabela 4.11 que somente no nível de deformação 9 o limiar estabelecido foi ultrapassado. Na Tabela 4.12 observamos na região das medias freqüências que o limiar indicando diferenças consideráveis entre as curvas foi ultrapassado a partir do nível de deformação 7. Nas demais regiões o CC

Tabela 4.11: Avaliação da Admitância do Enrolamento AT com o CC, sem Partição em Faixas de Freqüências

Coeficiente de Correlação (CC)	
ND	Valor
0	1,00000000
1	0,99921398
2	0,99880697
3	0,99666066
4	0,99547238
5	0,99200241
6	0,98724549
7	0,98089515
8	0,98038950
9	<b>0,97768875</b>

não indicou diferenças entre as curvas de RF. Os valores do coeficiente CC calculados para este caso não são coerentes com as diferenças observadas visualmente.

Tabela 4.12: Avaliação da Admitância do Enrolamento AT com o CC em Faixas de Freqüências

Coeficiente de Correlação (CC)			
ND	Baixas Freqüências	Médias Freqüências	Altas Freqüências
0	1,00000000	1,00000000	1,00000000
1	0,99979490	0,99897420	0,99937165
2	0,99995405	0,99871435	0,99887706
3	0,99927975	0,99771010	0,99632991
4	0,99940783	0,99396494	0,99596567
5	0,99912339	0,99543104	0,99087581
6	0,99855091	0,98516829	0,98791393
7	0,99631749	<b>0,97687553</b>	0,98221820
8	0,99774158	<b>0,97545803</b>	0,98199255
9	0,99539344	<b>0,96785038</b>	0,98089270

### Resultados obtidos com a Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL)

A Tabela 4.13 mostra os coeficientes SAEL dos diagramas de RF representando os diferentes ND em relação ao diagrama de referência sem partição em faixas de freqüências.

A Tabela 4.14 apresenta os resultados do coeficiente SAEL onde os diagramas de RF foram divididos em faixas de freqüências. Observa-se na tabela que a partir do nível de deformação 3, na região das baixas freqüências, a magnitude do coeficiente SAEL aumenta consideravelmente. Desta forma, assumimos como limiar o valor 0,16 como indicativo de diferença entre as curvas de RF.

É notado na Tabela 4.14 a variação da admitância do enrolamento em função da variação da deformação. Outro fato observado é como as deformações realizadas no enrolamento em

Tabela 4.13: Avaliação da Admitância do Enrolamento AT com a SAEL, sem Partição em Faixas de Freqüências

Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL)	
ND	Valor
0	0,00000000
1	0,46866713
2	0,54715248
3	0,60673066
4	0,79566006
5	0,86792072
6	1,18549730
7	1,44018051
8	1,53164390
9	1,79075524

estudo afetam mais a admitância do enrolamento do que a transferência de tensão entre os enrolamentos de AT e BT. Isto torna-se evidente observando a SAEL na região de baixas freqüências onde observa-se diferenças significativas entre as curvas a partir do nível de deformação 3. Nas regiões das medias e altas freqüências, o limiar estabelecido é ultrapassado a partir dos níveis de deformação iniciais, mostrando coerência com as diferenças observadas visualmente entre os diagramas de RF.

Tabela 4.14: Avaliação da Admitância do Enrolamento AT com a SAEL em Faixas de Freqüências

Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL)			
ND	Baixas Freqüências	Médias Freqüências	Altas Freqüências
0	0,00000000	0,00000000	0,00000000
1	0,18498075	<b>0,41476796</b>	<b>0,53451994</b>
2	0,15688474	<b>0,50521338</b>	<b>0,60716799</b>
3	<b>0,44725023</b>	<b>0,54715239</b>	<b>0,67154569</b>
4	<b>0,31663012</b>	<b>0,89174101</b>	<b>0,72924225</b>
5	<b>0,49354783</b>	<b>0,78037748</b>	<b>0,97040728</b>
6	<b>0,59918701</b>	<b>1,3624639</b>	<b>1,04784464</b>
7	<b>0,90425213</b>	<b>1,71060391</b>	<b>1,21119775</b>
8	<b>0,72102796</b>	<b>1,76690434</b>	<b>1,35026114</b>
9	<b>1,06002099</b>	<b>2,03305137</b>	<b>1,59855837</b>

### Resultados obtidos com a Rede Neural Artificial tipo GRNN

Da mesma forma que para o caso de estudo 1, a rede foi treinada com 4 curvas representando diagramas de RF, portanto, este é o número de neurônios da camada padrão. O número de variáveis que compõem cada vetor de entrada é de 1817 pontos. O número de observações que cada digrama de RF representa, ou seja, as opções de saídas desejadas são duas, condição normal e condição de falta. A curva que representa o nível de deformação 0

foi indicada à rede como sendo o estado em que o enrolamento se encontra em perfeita condição de funcionamento. Já os níveis de deformação 1, 5 e 9 foram apresentados à rede como sendo curvas que representam uma condição de falta. O espraiamento adotado para este caso foi de 1.0 e a rede neural foi testada com as curvas de RF restantes (níveis de deformação 2, 3, 4, 6, 7, e 8).

Novamente, a determinação de um limiar que defina uma diferença considerável entre os diagramas de RF é realizado de forma heurística, considerando aspectos já comentados no item 4.4.1. Foi escolhido como limiar o valor 0,97, que se ultrapassado, indica a condição de falta.

A Tabela 4.15 apresenta os resultados obtidos com a implementação da rede neural tipo GRNN para a análise dos diagramas de RF sem partições em faixas de freqüências. Como observado na tabela, para todos os níveis de deformação testados, a rede deu um alto percentual de certeza de falta no enrolamento.

Tabela 4.15: Avaliação da Admitância do Enrolamento AT com a GRNN, sem Partição em Faixas de Freqüências

Rede Neural Tipo GRNN		
ND	Condição Normal	Condição de Falta
2	0,002420	0,997580
3	0,011384	0,988616
4	0,000181	0,999819
6	0,000000	1,000000
7	0,000000	1,000000
8	0,000000	1,000000

Na análise em faixas de freqüências, o parâmetro que sofreu alterações foi o espraiamento, que de acordo à faixa de freqüência possui um valor diferente, devido às diferenças das magnitudes dos valores dos diagramas de RF nas faixas de freqüência. Os valores adotados foram; spread=0.4 para baixas freqüências, spread=0.5 para médias freqüências e spread=0.6 para as altas freqüências. A Tabela 4.16 apresenta os resultados obtidos com a implementação da rede neural tipo GRNN para a análise dos diagramas de RF divididos em baixas, médias e altas freqüências.

Como observado na Tabela 4.16, na região das medias e altas freqüências, a rede neural foi capaz de identificar o estado de falta já a partir dos níveis de deformação iniciais, onde o limiar estabelecido foi ultrapassado. Na região das baixas freqüências, a rede neural indicou condição normal, fato não coerente com o observado visualmente.

Tabela 4.16: Avaliação da Admitância do Enrolamento AT com a GRNN em Faixas de Freqüências

Rede Neural Tipo GRNN						
ND	Baixas Freqüências		Médias Freqüências		Altas Freqüências	
	Normal	Falta	Normal	c Falta	Normal	Falta
2	0,252902	0,747098	0,013853	<b>0,986147</b>	0,000001	<b>0,999999</b>
3	0,249753	0,750247	0,021218	<b>0,978782</b>	0,000055	<b>0,999945</b>
4	0,251206	0,748794	0,000000	<b>1,000000</b>	0,000003	<b>0,999997</b>
6	0,247963	0,752037	0,000000	<b>1,000000</b>	0,000000	<b>1,000000</b>
7	0,246072	0,753928	0,000000	<b>1,000000</b>	0,000000	<b>1,000000</b>
8	0,246369	0,753631	0,000000	<b>1,000000</b>	0,000000	<b>1,000000</b>

## 4.5 Resultados Obtidos – Ensaios de RF em Empresa do Setor Elétrico

### 4.5.1 Caso de estudo 3 - Diagnóstico de Transformador Móvel de 30 MVA

A seguir serão apresentados os resultados referentes à implementação dos algoritmos que calculam a Soma do Erro Quadrático (SEQ), o Coeficiente de Correlação (CC) e a Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL) para os diagramas de RF que representam o módulo da impedância dos enrolamentos de um transformador móvel de 30 MVA antes e depois do ensaio de trafegabilidade. A análise com a GRNN não será realizada devido à quantidade reduzida de curvas disponíveis, visto que são necessárias várias curvas para o treinamento e teste da rede neural artificial.

Nos diagramas de RF deste caso de estudo, uma análise visual detectou variações significativas na amplitude em freqüências inferiores a 2 kHz e pequenas diferenças na amplitude na região das altas freqüências em todas as curvas representando a impedância dos enrolamentos do transformador estudado. Segundo RYDER (2003), faltas que redirecionam o fluxo magnético no núcleo do transformador são as que variam a RF em baixas freqüências. Outros ensaios realizados pela empresa dona do transformador móvel descartaram a possibilidade de que circuitos abertos e espiras em curto circuito sejam as responsáveis pela variação da RF em baixas freqüências. O magnetismo residual foi apontado como uma provável causa, porém, ensaios posteriores com o núcleo magnetizado e desmagnetizado no mesmo transformador não apresentaram qualquer variação nas curvas. Como afirmado por DE AGUIAR (2005), aparentemente o ensaio de trafegabilidade, extremamente exigente, causou pequeno deslocamento do núcleo afetando desta forma a RF em baixas freqüências.

### Resultados obtidos com a Soma do Erro Quadrático (SEQ)

A Tabela 4.17 apresenta os coeficientes para cada enrolamento que representam a SEQ das medições posteriores em relação às medições anteriores ao ensaio de trafegabilidade ao qual foi submetido o transformador móvel em análise. As medições foram divididas em faixas de freqüências para a análise.

Tabela 4.17: Comparação de medições de RF com a SEQ antes e depois do ensaio de trafegabilidade

Soma do Erro Quadrático (SEQ)			
Enrolamento	Baixas Freqüências	Médias Freqüências	Altas Freqüências
H1H0	<b>18,9115442</b>	0,00296210	0,00007969
H2H0	<b>15,6541502</b>	0,06315954	0,01917554
H3H0	<b>23,2222598</b>	0,05648621	0,01323453
X1X2	<b>16,9445536</b>	0,25279117	0,00632098
X1X3	<b>21,0673351</b>	0,08390743	0,01108661
X2X3	<b>13,0706010</b>	0,20090158	0,00036588

Na análise visual, não foram observadas variações consideráveis entre as medições na região das medias freqüências. Portanto assume-se como um limiar que indica diferença entre as medições o maior valor do coeficiente SEQ nesta faixa de freqüências, igual a 0,25279. Na Tabela 4.17 observa-se que na região das baixas freqüências as magnitudes dos coeficientes SEQ são muito superiores ao limiar estabelecido e aos coeficientes das demais faixas de freqüências, indicando desta forma diferenças nesta região entre as medições. O motivo pelo qual o limiar não foi ultrapassado e a SEQ não indicou diferenças na região de altas freqüências mesmo sendo observadas visualmente pequenas diferenças entre as medições se deve ao fato já comentado no capítulo 3 item 3.2.1 onde se menciona que informações contidas ao redor de vales ou região de baixos valores de magnitude de curvas de RF são freqüentemente subestimadas com a SEQ.

### Resultados obtidos com o Coeficiente de Correlação (CC)

A Tabela 4.18 apresenta os coeficientes de correlação, para cada enrolamento, entre as medições posteriores em relação às medições anteriores ao ensaio de trafegabilidade ao qual foi submetido o transformador móvel em análise. As medições foram divididas em faixas de freqüências para a análise.

Na Tabela 4.18 observa-se que praticamente todos os valores do CC são próximos a 1, ou seja, para esta comparação o CC não indicou diferenças significativas entre as funções de transferências medidas antes e depois do ensaio de trafegabilidade. Como afirmado por KIM et al. (2005), o CC é um indicador numérico considerado inadequado para a comparação da

Tabela 4.18: Comparação de medições de RF com o CC antes e depois do ensaio de trafegabilidade

Coeficiente de Correlação (CC)			
Enrolamento	Baixas Freqüências	Médias Freqüências	Altas Freqüências
H1H0	0,99761740	0,99999909	0,99835010
H2H0	0,99793987	0,99997766	0,99985731
H3H0	0,99695379	0,99998138	0,99997473
X1X2	0,99107308	0,99988010	0,99988922
X1X3	0,98870596	0,99995757	0,99969050
X2X3	0,99301910	0,99991271	0,99930714

resposta em freqüência que possam incluir medições com padrões similares em forma de onda mas diferentes em magnitude.

### Resultados obtidos com a Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL)

A Tabela 4.19 apresenta os coeficientes da soma absoluta do erro logarítmico, para cada enrolamento, entre as medições posteriores em relação às medições anteriores ao ensaio de trafegabilidade ao qual foi submetido o transformador móvel em análise. As medições foram divididas em faixas de freqüências para a análise.

Tabela 4.19: Comparação de medições de RF com a SAEL antes e depois do ensaio de trafegabilidade

Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL)			
Enrolamento	Baixas Freqüências	Médias Freqüências	Altas Freqüências
H1H0	<b>3,00042877</b>	0,04317037	<b>0,5867097</b>
H2H0	<b>2,48962765</b>	0,15035926	<b>0,75322581</b>
H3H0	<b>3,22030748</b>	0,17341852	<b>0,50343548</b>
X1X2	<b>2,70183075</b>	0,15984074	<b>0,39390323</b>
X1X3	<b>3,04708181</b>	0,14761111	<b>0,78198387</b>
X2X3	<b>2,21325529</b>	0,22775185	<b>0,91777419</b>

Assume-se como o limiar que diferença entre as medições o maior valor do coeficiente SAEL na região das medias freqüências, igual a 0,2277. Na Tabela 4.19 os indicadores SAEL calculados ultrapassam o limiar estabelecido nas regiões das baixas e altas freqüências, indicando diferença entre as medições. Na região das altas freqüências, as pequenas diferenças observadas visualmente foram consideradas normais por DE AGUIAR (2005). Vemos entretanto que numericamente as diferenças devem ser melhor estudadas, visto que nesta região, a amplitude das funções de transferências é baixa e os valores do coeficiente SAEL obtidos não são desprezáveis. Segundo RYDER (2003), a RF em altas freqüências é sensível às faltas que provocam mudanças nas propriedades de parte específicas do enrolamento, ou seja, faltas localizadas. Entretanto, geralmente este tipo de falta leva à criação de novas freqüências de ressonância, fato que não foi observado nas curvas das figuras 4.6 e 4.7,

onde as curvas mantiveram seu formato variando apenas na amplitude. Isto foi comprovado pelos valores do CC que foram todos próximos a 1. As pequenas variações na região das altas freqüências podem ser explicadas como sendo variações na impedância de aterramento do sistema, que afetam os diagramas de RF de todos os enrolamentos, fato que foi observado no caso analisado.

#### **4.5.2 Caso de estudo 4 - Diagnóstico de Transformador de Potência de 41.67 MVA**

A seguir serão apresentados os resultados referentes à implementação dos algoritmos que calculam a Soma do Erro Quadrático (SEQ), o Coeficiente de Correlação (CC) e a Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL) para os diagramas de RF que representam o módulo da impedância dos enrolamentos de um transformador de 41.67 MVA sob suspeita de dano após a atuação da proteção.

Como os diagramas de RF disponíveis são medições após a ocorrência do evento que originou o dano sob suspeita, as comparações serão realizadas entre as fases dos enrolamentos do mesmo grupo de tensão. Os indicadores numéricos em estudo mostram a relação entre dois grupos de dados, ou seja a correlação entre duas funções de transferência. Mas neste caso, temos três funções de transferência que representam os enrolamentos de AT e três funções de transferência que representam os enrolamentos de BT. Assim, devemos escolher qual será a função de transferência de referência para calcular os coeficientes. Uma análise visual prévia das funções de transferência mostrou que a fase sob suspeita de dano é a fase A. Portanto, escolhemos como diagrama de RF de referência as referentes às fases H3H0 no grupo de AT e X1X3 no grupo de BT. Um detalhe muito importante que deve ser considerado na análise é o tipo de conexão do transformador que está sendo analisado. Neste caso, os enrolamentos de AT estão conectados em estrela (Y), e portanto, a impedância medida em função da freqüência (função de transferência) reflete a impedância real do enrolamento. Entretanto, os enrolamentos de BT estão conectados em delta ( $\Delta$ ) e uma medição nos terminais da fase A significa medir a impedância da fase A em paralelo com a soma das impedâncias das fases B e C. Portanto, um dano em uma das fases vai alterar de alguma forma as curvas de RF das demais fases também. Nas análises das curvas também deve ser considerada a influência do acoplamento magnético entre os enrolamentos.

A análise com a GRNN não será realizada devido à quantidade reduzida de curvas disponíveis, visto que são necessárias várias curvas para o treinamento e teste da rede neural artificial. Todas as medições foram divididas em faixas de freqüências para a análise.

## Resultados obtidos com a Soma do Erro Quadrático (SEQ)

Antes da análise do transformador sob suspeita de dano, são mostrados na Tabela 4.20 valores típicos de coeficientes da SEQ em um transformador similar ao estudado mas com os enrolamentos em perfeitas condições. Foram utilizados como referência de cálculo os diagramas de RF dos enrolamentos H3H0 e X1X3 da fase C. Como observado na Tabela 4.20, em baixas freqüências, devido a assimetrias construtivas, os coeficientes da SEQ na fase B de ambos enrolamentos (AT e BT) são bem maiores que os da fases A e C, que possuem caminhos magnético similares.

Tabela 4.20: Comparação de medições de RF com a SEQ em transformador de 41.67 MVA em perfeito estado

Soma do Erro Quadrático (SEQ)						
	H1H0 (A)	H2H0 (B)	H3H0 (C)	X1X2 (A)	X2X3 (B)	X1X3 (C)
<b>Baixas Freqüências</b>	1,3660151	8,0055063	0,000000	0,9026553	7,3867798	0,000000
<b>Médias Freqüências</b>	6,9589003	6,8172218	0,000000	6,7938541	2,5117385	0,000000
<b>Altas Freqüências</b>	17,3187055	4,0918734	0,000000	11,8267696	10,5731830	0,000000

A Tabela 4.21 apresenta os coeficientes que representam a soma do erro quadrático das medições de RF das fases de AT e BT tendo como referências H3H0 e X1X3 respectivamente para o caso de análise de um transformador de 41.67 MVA sob suspeita de dano.

Tabela 4.21: Comparação de medições de RF com a SEQ em transformador de 41.67 MVA sob suspeita de dano

Soma do Erro Quadrático (SEQ)						
	H1H0 (A)	H2H0 (B)	H3H0 (C)	X1X2 (A)	X2X3 (B)	X1X3 (C)
<b>Baixas Freqüências</b>	443,908828	0,4980608	0,00000	274,581452	0,0818979	0,00000
<b>Médias Freqüências</b>	48,6187493	3,9070120	0,00000	4,5595623	13,0211804	0,00000
<b>Altas Freqüências</b>	3,2008486	34,0353704	0,00000	16,7140940	29,5646034	0,00000

Com uma análise visual da figura 4.8 pode ser claramente observado que as funções de transferência que descrevem os enrolamentos de AT e BT da fase A do transformador de 41.67 MVA se encontram visivelmente diferentes das demais curvas. Entretanto, como discutido nos ítems 2.1 e 2.2, quando a comparação de medições é realizada entre fases, devido a características construtivas do transformador, existem diferenças consideráveis em baixas freqüências e também diferenças em altas freqüências (figura 4.12). Estas diferenças inerentes devem ser consideradas na análise das funções de transferência, portanto, os números devem ser analisados contando que já existem diferenças entre as medições sem que algum dano se caracterize. Neste sentido, ao compararem-se as magnitudes dos valores da SEQ em baixas freqüências, na análise do transformador danificado observa-se claramente uma diferença considerável na fase A (ambos enrolamentos, AT e BT) que apóia fortemente a

confirmação da suspeita de dano na fase A. Outro indicativo de dano observa-se nos coeficientes da SEQ em médias freqüências, mas apenas no enrolamento H1H0 da AT da fase A. Os coeficientes da SEQ para as altas freqüências indicam diferenças na fase B do transformador, porém, como observado na figura 4.12, mesmo no transformador com os enrolamentos em perfeito estado, as diferenças em altas freqüências são visíveis.

### Resultados obtidos com o Coeficiente de Correlação (CC)

Antes da análise do transformador sob suspeita de dano, são mostrados na Tabela 4.22 valores típicos de CC entre medições em um transformador similar ao estudado mas com os enrolamentos em perfeitas condições. Como observado na Tabela 4.22, apenas em medições na região de altas freqüências o CC quantificou alguma diferença considerável, mesmo sabendo-se pela análise visual que existem diferenças consideráveis também em baixas freqüências.

Tabela 4.22: Comparação de medições de RF com a CC em transformador de 41.67 MVA em perfeito estado

Coeficiente de Correlação (CC)						
	H1H0 (A)	H2H0 (B)	H3H0 (C)	X1X2 (A)	X2X3 (B)	X1X3 (C)
<b>Baixas Freqüências</b>	0,9996651	0,9983216	1,000000	0,9994552	0,9961390	1,000000
<b>Médias Freqüências</b>	0,9969955	0,9970031	1,000000	0,9935026	0,9975568	1,000000
<b>Altas Freqüências</b>	0,9834004	0,9954587	1,000000	0,9727932	0,9706026	1,000000

A Tabela 4.23 apresenta os coeficientes de correlação entre as medições de RF das fases de AT e BT tendo como referências H3H0 e X1X3 respectivamente para o caso de análise de um transformador de 41.67 MVA sob suspeita de dano.

Tabela 4.23: Comparação de medições de RF com o CC em transformador de 41.67 MVA sob suspeita de dano

Coeficiente de Correlação (CC)						
	H1H0 (A)	H2H0 (B)	H3H0 (C)	X1X2 (A)	X2X3 (B)	X1X3 (C)
<b>Baixas Freqüências</b>	0,8908560	0,9998644	1,000000	0,7664467	0,9999478	1,000000
<b>Médias Freqüências</b>	0,9786594	0,9982056	1,000000	0,9962319	0,9872498	1,000000
<b>Altas Freqüências</b>	0,9952654	0,9495020	1,000000	0,9599682	0,9622937	1,000000

Na região de baixas freqüências o CC calculado indicou diferença nos enrolamentos H1H0 e X1X2 da fase A. Já na região de médias freqüências a diferença mais visível se deu nos enrolamento H1H0 da fase A e X2X3 da fase B. Na região das altas freqüências os enrolamentos que apresentaram aparentemente alguma anormalidade foram o H2H0 da fase B e o X1X3 da fase C, mas como comentado no item 4.2.2, a região das altas freqüências não será considerada para diagnosticar o transformador em estudo.

### Resultados obtidos com a Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL)

Antes da análise do transformador sob suspeita de dano, são mostrados na Tabela 4.24 valores típicos do coeficiente SAEL entre medições em um transformador similar ao estudado mas com os enrolamentos em perfeitas condições. Como já comentado anteriormente, existem diferenças nas medições de RF mesmo sem presença de danos nos enrolamentos.

Tabela 4.24: Comparação de medições de RF com a SAEL em transformador de 41.67 MVA em perfeito estado

Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL)						
	H1H0 (A)	H2H0 (B)	H3H0 (C)	X1X2 (A)	X2X3 (B)	X1X3 (C)
<b>Baixas Freqüências</b>	0,8377912	2,0839478	0,000000	0,7084880	2,0236897	0,000000
<b>Médias Freqüências</b>	1,6015296	1,5939666	0,000000	1,7948148	1,1160925	0,000000
<b>Altas Freqüências</b>	2,7712258	1,4794354	0,000000	2,7722419	2,7672903	0,000000

A Tabela 4.25 apresenta os coeficientes da SAEL entre as medições de RF das fases de AT e BT tendo como referências diagramas de RF dos enrolamentos H3H0 e X1X3 respectivamente para o caso de análise de um transformador de 41.67 MVA sob suspeita de dano. Como observado na tabela, na região de baixas freqüências, os coeficientes da SAEL para os enrolamentos da fase A são muito maiores aos que seriam esperados se os mesmos não estivessem danificados, portanto existe uma forte possibilidade que algum enrolamento da fase A esteja danificado. Um indicativo bastante forte de dano também são os valores do coeficiente SAEL na região de médias freqüência, especificamente do enrolamento H1H0, que possui um coeficiente muito superior se comparado aos coeficientes dos demais enrolamentos de AT.

Tabela 4.25: Comparação de medições de RF com a SAEL em transformador de 41.67 MVA sob suspeita de dano

Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL)						
	H1H0 (A)	H2H0 (B)	H3H0 (C)	X1X2 (A)	X2X3 (B)	X1X3 (C)
<b>Baixas Freqüências</b>	17,3633695	0,3430225	0,0000	13,7546516	0,1767221	0,0000
<b>Médias Freqüências</b>	5,0554037	1,6288666	0,0000	1,4300814	2,0466851	0,0000
<b>Altas Freqüências</b>	1,3195645	5,0361129	0,0000	3,2597580	3,7501612	0,0000

## 4.6 Avaliação do Desempenho dos Indicadores Numéricos e da Rede GRNN

A seguir será apresentado um resumo da avaliação dos indicadores numéricos e da rede neural artificial tipo GRNN implementados no tocante a quantificar diferenças entre medições de RF apresentadas anteriormente. Somente serão avaliados os coeficientes que repre-

sentam diferenças entre funções de transferências que foram divididas em faixas de freqüências, visto que esta análise demonstrou ser mais objetiva para o diagnóstico de anormalidades nos enrolamentos dos transformadores estudados.

#### 4.6.1 Grupo 1 – Análise de Deformações Radiais

A Tabela 4.26 apresenta um resumo da avaliação dos indicadores numéricos e da rede neural tipo GRNN em quantificar diferenças entre medições de RF do grupo 1 (transferência de tensão entre enrolamento e admitância do enrolamento AT). Como visto na tabela, devido a fatores já explicados, apenas o coeficiente de correlação (CC) não apresentou um desempenho ótimo no sentido de quantificar as diferenças entre as medições neste grupo de curvas.

Tabela 4.26: Avaliação dos Indicadores Numéricos e da Rede GRNN para o Grupo 1

Critério	SEQ		CC		SAEL		GRNN	
	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2
Amplitude								
Baixas Freqüências	O	O	O	X	O	O	O	X
Médias Freqüências	O	O	X	X	O	O	O	O
Altas Freqüências	O	O	O	X	O	O	O	O
<b>Taxa de Acerto (%)</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>66.66</b>	<b>0.00</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>66.66</b>

O = bom    X = ruim

#### 4.6.2 Grupo 2 – Ensaios de RF em Empresa do Setor Elétrico

A Tabela 4.27 apresenta um resumo da avaliação dos indicadores numéricos e da rede neural tipo GRNN em quantificar diferenças entre medições de RF do grupo 2 (medições antes e depois do ensaio de trafegabilidade e medições em um transformador sob suspeita de dano). Observa-se na tabela que o SEQ na região das baixas freqüências não obteve um desempenho aceitável. Podemos dizer o mesmo do CC, mas para todas as faixas de freqüências.

### 4.7 Conclusões

A seguir serão apresentados os comentários e conclusões gerais das análises dos casos de estudos avaliados neste capítulo.

Tabela 4.27: Avaliação dos Indicadores Numéricos para o Grupo 2

Critério	SEQ		CC		SAEL	
	Caso 3	Caso 4	Caso 3	Caso 4	Caso 3	Caso 4
Amplitude						
Baixas Freqüências	O	O	X	O	O	O
Médias Freqüências	O	O	X	O	O	O
Altas Freqüências	–	–	–	–	–	–
<b>Taxa de Acerto (%)</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>0.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
	O = bom		X = ruim		– = não analisado	

A primeira conclusão a que podemos chegar com os resultados preliminares obtidos no caso de estudo 1 é que a análise das funções de transferência é melhor realizada com as curvas divididas em faixas de freqüências, ou seja, é mais fácil relacionar visualmente os números com as curvas divididas em faixas de freqüências. A avaliação dos coeficientes obtidos com os algoritmos implementados para as funções de transferência do caso 1 mostrou que apenas o coeficiente de correlação (CC) não indicou diferenças visíveis nas curvas que representam níveis de deformação iniciais. Os problemas deste coeficiente em quantificar diferenças entre medições de RF já foram comentados anteriormente.

No caso de estudo 2 novamente observa-se que os coeficientes obtidos com a partição em faixas de freqüências são mais facilmente relacionados com as curvas às quais representam. Avaliando os coeficientes que representam os indicadores numéricos e a rede tipo GRNN para este caso de estudo conclui-se novamente que o coeficiente de correlação (CC) não apresentou resultados satisfatórios no sentido de quantificar diferenças entre a curva de referência e curvas que representam níveis de deformação menos severos.

No caso de estudo 3, os coeficientes numéricos foram avaliados no sentido de quantificar corretamente as diferenças entre as curvas nas baixas freqüências e também, as pequenas diferenças na região das altas freqüências. Neste sentido, o indicador numérico SEQ obteve um desempenho não satisfatório na quantificação de diferenças nas altas freqüências. Já o CC obteve desempenho não satisfatório em todas as faixas de freqüências. O coeficiente SAEL desempenhou de forma satisfatória quantificando corretamente as diferenças observadas entre as curvas de RF analisadas em todas as faixas de freqüências. As diferenças encontradas na região das baixas freqüências confirma a suspeita da empresa dona do transformador, de pequena movimentação do núcleo. Já as pequenas diferenças observadas na região das altas freqüências em todos os diagramas neste caso de estudo se deve provavelmente a uma variação da impedância de aterramento no ensaio de RF.

Uma análise visual preliminar dos diagramas de RF do caso de estudo 4 comprovou uma possível falta no enrolamento de AT (H1H0), na Fase A do equipamento. Os coeficientes SEQ, CC e SAEL indicaram diferenças significativas na região de baixas freqüências e di-

ferenças considerável na região de médias freqüências para o enrolamento H1H0. Desta maneira podemos concluir que estes indicadores confirmaram o diagnóstico de falta na fase A, especificamente no enrolamento de AT (H1H0). De uma forma geral, estes indicadores numéricos tiveram um desempenho considerado satisfatório porque foram capazes de quantificar corretamente as diferenças observadas nas curvas de RF deste caso de estudo.

Desta forma neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos com a inspeção visual e implementação de algoritmos para quantificar diferenças entre medições de RF dos quatro casos de estudo apresentados. Foi constatado que a SEQ e o CC são indicadores numéricos que apresentaram inconvenientes dependendo das características das curvas de RF analisadas com eles, entretanto, podem ser utilizados para alguns casos em que as características das curvas não afetem seus desempenhos. O coeficiente SAEL teve um desempenho satisfatório nas análises realizadas, podendo ser utilizado no suporte ao diagnóstico de transformadores de potência com a FRA. A rede neural artificial tipo GRNN foi implementada e utilizada nos casos de estudo 1 e 2 com um desempenho considerado satisfatório. Um inconveniente do uso desta metodologia na análise da resposta em freqüência é que dificilmente um número suficiente de dados do mesmo transformador ou de transformadores “irmãos” estará disponível para a análise, portanto, sua utilização fica restrita a situações em que um banco de dados de ensaios de RF do mesmo grupo de transformadores esteja disponível.

# Capítulo 5

## Conclusões Gerais e Sugestões Para Trabalhos Futuros

### 5.1 Conclusões

Devido à importância de entender melhor o processo de falhas em transformadores de potência, foram apresentadas considerações no sentido de mostrar um modelo usual de falhas, causas, condições e distribuição das falhas em componentes dos transformadores. Além disso, foram apresentadas considerações sobre monitoramento e diagnóstico de transformadores de potência, apresentando os principais defeitos em componentes de transformadores com as respectivas metodologias análise.

Foi constatado que um grande percentual de falhas em transformadores de potência se dá nos enrolamentos destes equipamentos. Dentro deste contexto, o estudo de metodologias de monitoramento e diagnóstico de enrolamentos de transformadores de potência é importante, justificando um estudo nesta área. Neste sentido, este trabalho de dissertação de mestrado apresentou a Análise da Resposta em Freqüência (FRA) como uma metodologia de diagnóstico do estado de enrolamentos de transformadores de potência. O uso desta metodologia de diagnóstico por empresas do setor elétrico tem aumentado pelos bons resultados obtidos nas pesquisas realizadas.

No tocante a procedimentos para a realização do ensaio de RF (resposta em freqüência), duas técnicas foram estudadas: no domínio do tempo o IRM e no domínio da freqüência a SFRA. As duas metodologias possuem vantagens e desvantagens para a realização da FRA. Geralmente, para a realização da SFRA são utilizados analisadores de redes, que medem indiretamente a corrente por meio de uma queda de tensão sobre uma impedância de entrada de  $50 \Omega$ . Observa-se que em freqüências maiores que 2 MHz a resposta em freqüência

pode ser completamente atenuada pela impedância de medição. Para análises entre poucos Hz e 2 MHz a SFRA é uma metodologia recomendada para realizar este ensaio devido à alta imunidade a ruídos e melhor resolução nas diferentes faixas de freqüências. O IRM é um método cuja característica mais atraente é a possibilidade de analisar uma faixa de freqüência mais ampla (até 10MHz), devido à pouca influência dos cabos de medição e permitir o uso de uma impedância de medição (geralmente  $1 \Omega$ ) muito menor que a utilizada no SFRA. Portanto, esta impedância terá menos influência na RF em altas freqüências ( $> 2\text{MHz}$ ). Entretanto, um problema crítico deste método é a sensibilidade a sinais de ruído que podem influenciar prejudicialmente a função de transferência medida.

Referente à avaliação de diagramas de RF para o diagnóstico do estado de enrolamentos de transformadores de potência, além da análise visual das curvas, foram propostos três indicadores numéricos estatísticos e uma rede neural artificial como ferramentas de auxílio. Os indicadores numéricos propostos foram a Soma do Erro Quadrático (SEQ), o Coeficiente de Correlação (CC) e a Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL). Já a rede neural artificial implementada foi um do tipo GRNN (General Regression Neural Network). Estes método de diagnóstico foram aplicados em 4 casos de estudo analisados.

Nos casos de estudo 1 e 2, as curvas representaram diagramas de RF com vários níveis de deformação mecânica realizados propositalmente no enrolamento de alta tensão de um transformador de potência. Os resultados da implementação dos algoritmos dos indicadores numéricos e da rede tipo GRNN foram avaliados no sentido de estimar se estes representam numericamente as diferenças constatadas com as análises visuais dos diagramas de RF. A avaliação dos coeficientes obtidos com os algoritmos implementados mostrou que a SEQ, a SAEL e a rede neural tipo GRNN tiveram um desempenho satisfatório. Entretanto, na análise das curvas de RF dos dois primeiros casos de estudo, o CC não indicou diferenças visíveis nas curvas que representam níveis de deformação iniciais e portanto seu desempenho foi considerado insatisfatório nestes casos.

No caso de estudo 3 foram comparados diagramas de RF medidos em um transformador móvel antes e depois de ser realizado o ensaio de trafegabilidade no equipamento. Uma análise visual detectou variações na amplitude em freqüências inferiores a 2 kHz e pequenas diferenças na amplitude na região das altas freqüências entre as curvas analisadas. Aparentemente, o ensaio de trafegabilidade, extremamente exigente, causou pequeno deslocamento do núcleo afetando desta forma a RF em baixas freqüências. Os coeficientes numéricos foram avaliados no sentido de quantificar corretamente as diferenças entre as curvas nas baixas freqüências, e também, as pequenas diferenças nas altas freqüências. Desta maneira, o indicador numérico SEQ obteve um desempenho não satisfatório na região das altas freqüências, o CC obteve desempenho não satisfatório em todas as faixas de freqüências. Por outro lado, o coeficiente SAEL teve um desempenho satisfatório quantificando corretamente as diferenças observadas entre as curvas de RF analisadas em todas as faixas de freqüências.

Nos diagramas de RF referentes ao caso de estudo 4, devido à falta de disponibilidade de impressões digitais do transformador estudado, as comparações foram realizadas entre fases. Deste modo, diferenças construtivas consideradas normais foram tidas em conta na análise. Uma avaliação visual preliminar comprovou uma possível falta na fase A do transformador, especificamente no enrolamento de AT (H1H0). A SEQ, o CC e a SAEL além de indicarem diferenças consideráveis na região de baixas freqüências, indicaram também diferenças consideráveis na região de médias freqüências para o enrolamento H1H0, fato não observado no enrolamento de baixa tensão da fase A. Neste contexto, os indicadores numéricos foram capazes de quantificar corretamente as diferenças observadas nas curvas de RF do caso de estudo e pelos valores encontrados podemos concluir que estes indicadores confirmaram o diagnóstico de falta na fase A, especificamente no enrolamento H1H0.

É importante frisar que a utilização da metodologia FRA no diagnóstico do estado de enrolamentos de transformadores de potência é recente. Atualmente grupos de trabalho compostos por renomados pesquisadores da área se encontram aprofundando estudos sobre o tema, mas ainda não existe normatização que descreva claramente a metodologia para a realização do ensaio de resposta em freqüência, assim como a relação entre defeitos nos enrolamentos dos transformadores associados com variações na sua resposta em freqüência. Desta forma, este trabalho objetiva contribuir no sentido de descrever aspectos considerados importantes na metodologia de diagnóstico apresentada e avaliar ferramentas que podem auxiliar na correta interpretação de diagramas de RF.

### 5.1.1 Dificuldades Encontradas

Dentro do contexto de estudo da Análise da Resposta em Freqüência (FRA) como técnica de diagnóstico de transformadores de potência se encontra a análise e avaliação dos diagramas de RF. Para isso, é necessário realizar o ensaio de resposta em freqüência nestes equipamentos ou ter disponível dados de ensaios realizados por outras entidades. Neste sentido, como não foi possível realizar o ensaio de RF devido à falta de um laboratório específico, optou-se pela segunda possibilidade, conseguir dados de ensaios de RF realizados por empresas do setor ou pesquisadores da área de estudo. Como a FRA é uma metodologia ainda pouco difundida no meio e ainda não existe uma padronização para a obtenção e interpretação dos resultados, no Brasil, poucas empresas do setor elétrico realizam este ensaio em seu parque de transformadores, e consequentemente a obtenção dos dados de ensaios de RF analisados neste trabalho foi dificultosa.

## 5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

São listadas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros que podem ser considerados como continuação para o aprimoramento desta dissertação de mestrado.

- Modelagem de enrolamentos de transformadores de potência para diagnóstico de faltas com a Análise da Resposta em Freqüência.
- Estudo sobre aprimoramento das técnicas de medição da RF para que se possam realizar medições em freqüências superiores a 2 MHz sem interferências externas consideráveis.
- Estudo no domínio da freqüência de sinais transitórios medidos em subestações após manobras de chaveamentos com a finalidade de utilizar estes sinais como excitação para realizar um monitoramento on-line de transformadores de potência com a FRA.
- Estudo, implementação e comparação de outras técnicas de inteligência artificial e indicadores numéricos estatísticos para o auxílio ao diagnóstico de faltas em transformadores de potência com a FRA.

# **Apêndice A**

## **Aspectos Construtivos de Transformadores de Potência**

A seguir serão apresentados de forma resumida, aspectos construtivos das principais partes de transformadores de potência, visto que considera-se importante para um melhor entendimento do tema deste trabalho de dissertação. Desta forma, serão discutidas variações construtivas e materiais empregados na fabricação do núcleo, enrolamentos e buchas de um transformador de potência, os quais afetam o modelo do transformador e sua resposta em freqüência.

A figura A.1 apresenta as partes principais que constituem os transformadores de potência.

### **A.0.1 Núcleo do Transformador de Potência**

O núcleo, responsável pelo caminho para canalizar o fluxo magnético nos transformadores de potência, é construído a partir de chapas de aço silício empilhadas umas sobre as outras, de forma a obter-se uma figura geométrica final com a secção transversal de aspecto o mais circular possível, como mostrado em detalhe na figura A.2. Esta medida é adotada para evitar concentrações de campo magnético nas pontas e cantos do núcleo (DA SILVA, 2005). O aço do núcleo pode ser laminado a frio ou a quente, de grãos orientados ou não, com espessuras entre 0,23 mm e 0,36 mm. Para obter-se uma maior permeabilidade magnética, as chapas são laminadas a frio de forma a obter-se a orientação dos grãos de silício no sentido da passagem do campo magnético. Quando empilhadas, estas chapas são isoladas eletricamente entre si por meio de uma pintura de espessura mínima que reveste o corpo das mesmas para que não haja o contato entre as chapas e assim diminuir as perdas por correntes parasitas no núcleo (perdas Foucault) (HARLOW, 2004; DA SILVA, 2005). A figura A.3 (a) ilustra o núcleo

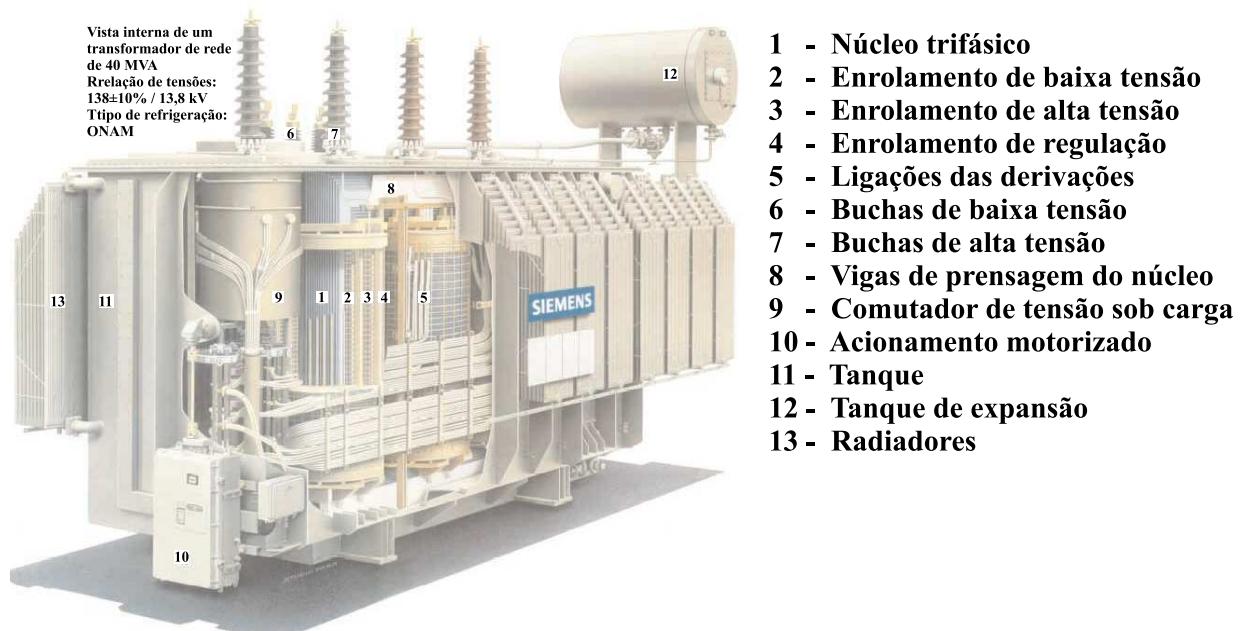


Figura A.1: Transformador de potência trifásico (CATÁLOGO: SIEMENS, 2006)

de um transformador trifásico de 135 MVA com construção especial para ruído abaixo de 55 dB e a figura A.3 (b) ilustra o núcleo de um autotransformador monofásico de 224 MVA.

O núcleo do transformador é aterrado em um único ponto, ou seja, uma única chapa, com o objetivo de dissipar energia eletrostática. O local do aterramento deve ser de fácil acesso e removível para finalidades de testes e ensaios. Múltiplos pontos aterrados do núcleo, que são pontos onde o núcleo entra em contato com partes do transformador que estão aterradas, podem prover um caminho para a circulação de correntes induzidas pelos fluxos magnético principal e de dispersão, criando concentração de perdas que podem resultar em aquecimento local (HARLOW, 2004).

Existem basicamente dois tipos de construção de núcleos usados em transformadores de potência: núcleo envolvido e núcleo envolvente. Em transformadores tipo núcleo envolvido, existe um único caminho magnético, indicado pelas setas na figura A.4 (a). Para aplicações monofásicas os enrolamentos são divididos nas duas pernas do núcleo conforme ilustrado na mesma figura. Para aplicações trifásicas, os enrolamentos de uma fase particular estão geralmente na mesma perna do núcleo como indicado na figura A.5. Os enrolamentos são construídos separadamente do núcleo e montados nas respectivas pernas durante a montagem do mesmo. Em transformadores tipo núcleo envolvente, o núcleo provê múltiplos caminhos para o fluxo magnético. A figura A.4 (b) ilustra o esquema construtivo de um transformador monofásico tipo núcleo envolvente, com os dois caminhos magnéticos ilustrados. Devido a vantagens no desempenho em curto-circuitos e transitórios de tensão, a construção tipo

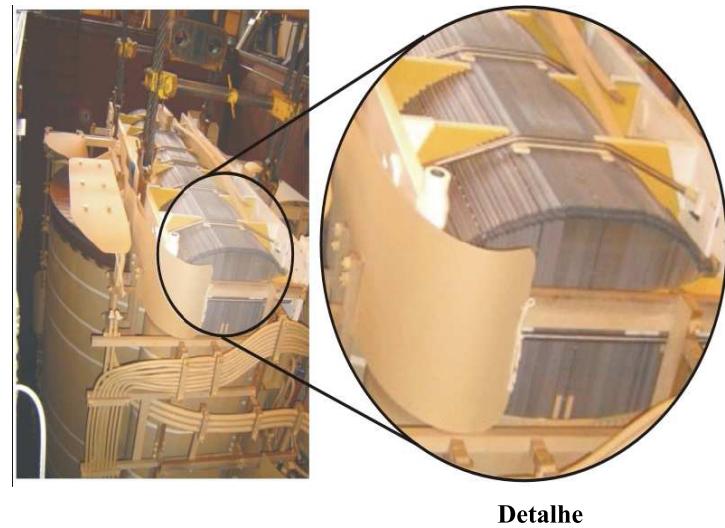


Figura A.2: Detalhe do empilhamento do núcleo (DA SILVA, 2005)

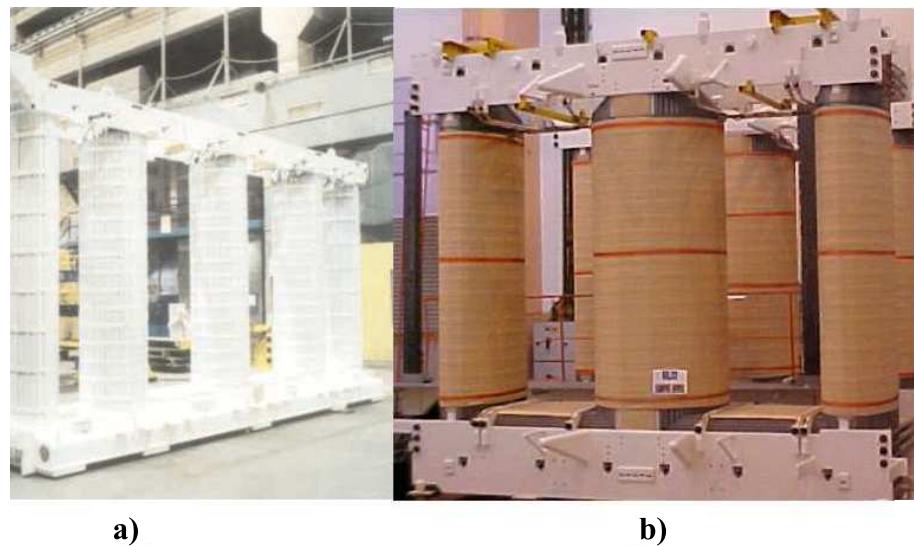


Figura A.3: a) Núcleo de transformador trifásico de 135 MVA com construção especial para baixo nível de ruído b) Núcleo de um autotransformador monofásico de 224 MVA

núcleo envolvente é freqüentemente usada em transformadores de grande porte, onde as condições de operação podem ser mais severas. Variações de transformadores trifásicos tipo núcleo envolvente incluem núcleos de 5 e 6 pernas, dependendo do tamanho e aplicação do equipamento (HARLOW, 2004).

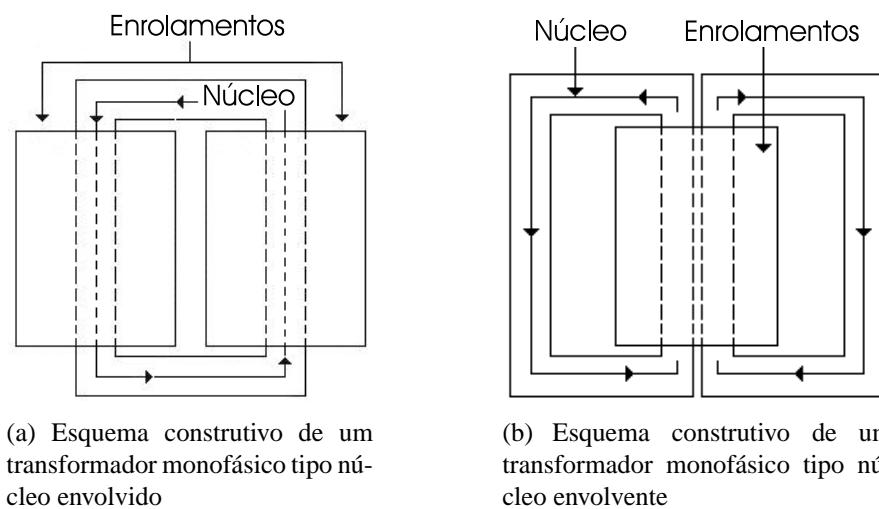


Figura A.4: Tipos de construção de núcleos de transformadores de potência

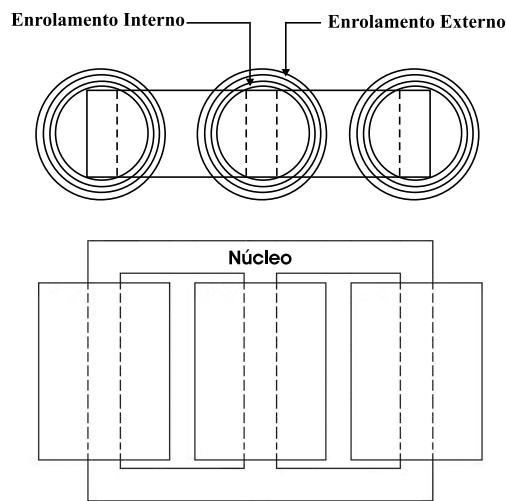


Figura A.5: Esquema construtivo de um transformador trifásico tipo núcleo envolvido (HARLOW, 2004)

### A.0.2 Enrolamentos de Alta e Baixa tensão

Cobre e alumínio são os materiais primários utilizados como condutores em enrolamentos de transformadores de potência. Enquanto que o alumínio é leve e geralmente mais barato que o cobre, para conduzir a mesma corrente, um condutor de alumínio com seção transversal maior que o condutor de cobre deve ser usado, além disso, a resistência mecânica do cobre é superior ao do alumínio, motivo pelo qual praticamente todos os enrolamentos de transformadores de potência são de cobre. Os condutores utilizados em transformadores de potência são tipicamente de seção transversal retangular, embora alguns transformadores de potências menores utilizem condutores tipo folha ou chapa. Múltiplos fios isolados podem ser enrolados em paralelo e unidos no final do enrolamento, mas neste caso é necessário transpor os fios em vários pontos ao longo do enrolamento para prevenir circulação de corrente ao redor da(s) volta(s) criada(s) pela união dos fios no final do enrolamento. Cada fio pode estar sujeito a diferentes intensidades de campo magnético devido a sua respectiva posição no enrolamento, o que levaria a diferenças de potencial entre os fios, produzindo circulação de correntes entre as voltas dos condutores. A transposição dos condutores do enrolamento cancela essas diferenças de potencial e elimina ou mitiga a circulação de correntes. A técnica envolvendo vários fios condutores retangulares combinados formando um cabo é denominada cabo com transposição contínua (CTC), e está ilustrada na figura A.6 (HARLOW, 2004).



Figura A.6: Cabo com transposição contínua

Em transformadores tipo núcleo envolvido, o arranjo dos enrolamentos é usualmente concêntrico ao redor da perna do núcleo (figura A.5). Em transformadores tipo núcleo envolvente, pode-se usar um arranjo concêntrico dos enrolamentos de AT e BT ao redor das pernas do núcleo ou intercalar os enrolamentos como ilustrado esquematicamente na figura A.7 e em uma fotografia na figura A.9. No arranjo com enrolamentos intercalados, cada enrolamento é empilhado e separado por barreiras isolantes e dutos de refrigeração. Conjuntos de enrolamentos são montados em grupos formando os enrolamentos primário e secundário (HARLOW, 2004).

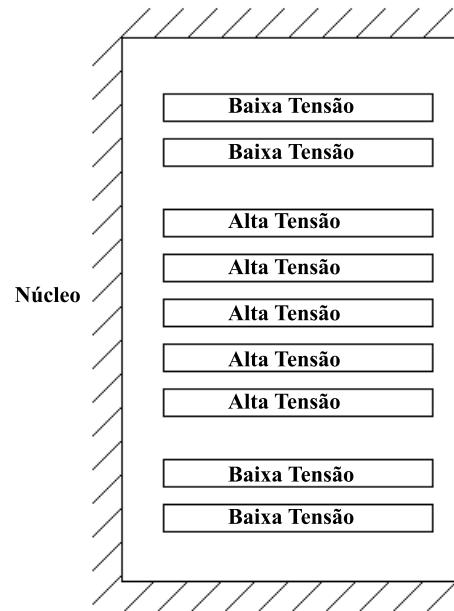


Figura A.7: Arranjo intercalado de enrolamentos

Diversos tipos de enrolamentos têm sido usados em transformadores de potência através dos anos. Os enrolamentos podem ser montados horizontalmente e ser erguidos posteriormente, ou já montados verticalmente, o que é necessário para enrolamentos maiores e mais pesados. O tipo do enrolamento depende da classe e potência do transformador e também do tipo de construção do núcleo. A figura A.8 mostra o processo de bobinagem de um enrolamento. Alguns dos tipos mais comuns de enrolamentos de transformadores de potência serão apresentados a seguir.

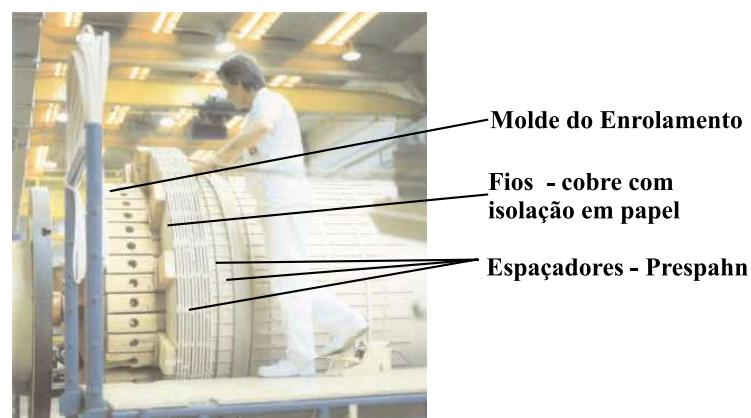


Figura A.8: Bobinagem de um enrolamento

### Enrolamentos tipo “Panqueca”

Vários tipos de enrolamentos são comumente referidos como enrolamentos tipo “panquecas” devido ao arranjo dos condutores em um disco. Entretanto, o termo é mais freqüentemente referido ao tipo de enrolamento que é usado quase exclusivamente em transformadores tipo núcleo envolvente. Os condutores são enrolados ao redor de uma forma retangular com a face mais larga do condutor orientado verticalmente ou horizontalmente. A figura A.9 mostra o empilhamento de enrolamentos tipo panqueca (HARLOW, 2004).

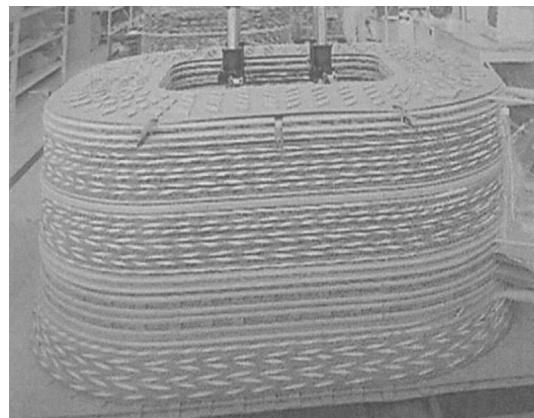


Figura A.9: Enrolamentos empilhados tipo panqueca

### Enrolamentos em Camadas

Os enrolamentos tipo camada se referem a condutores isolados enrolados diretamente ao redor do cilindro e espaçadores e próximos uns aos outros. Várias camadas podem ser enroladas umas encima de outras e ligadas em série, separadas por isoladores sólidos, dutos de refrigeração ou ambos. Vários fios podem ser enrolados em paralelo se a magnitude da corrente assim o requerer. Variações deste tipo de enrolamento são freqüentemente utilizados em aplicações como enrolamentos com “taps” utilizados em transformadores com comutação sob carga (OLTC’s) e para enrolamentos terciários (D’AJUZ, 1985; HARLOW, 2004). A figura A.10 mostra um enrolamento em camada durante a montagem.

### Enrolamentos Helicoidais

Enrolamentos helicoidais, também referidos como enrolamentos tipo parafuso ou espiral, consistem em vários fios condutores isolados enrolados em paralelo continuamente ao redor de um cilindro, com espaçadores inseridos entre as voltas adjacentes ou discos, com transposições incluídas para minimizar a circulação de correntes entre os condutores em paralelo.

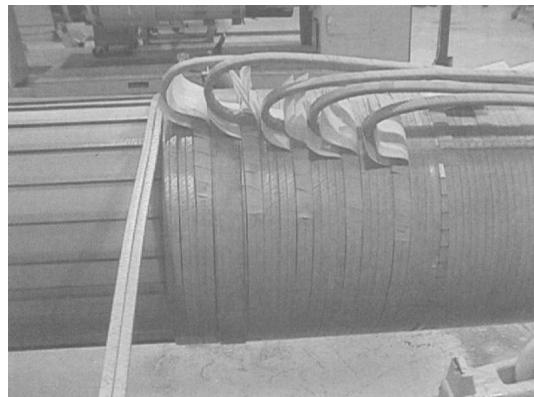


Figura A.10: Enrolamento em camadas (camada simples com dois condutores em paralelo)

A forma de construção do enrolamento lembra um saca-rolhas. A figura A.11 mostra um enrolamento helicoidal durante a montagem. Estes enrolamentos são utilizados para aplicações com altas correntes, freqüentemente encontradas em transformadores de baixa tensão (HARLOW, 2004).



Figura A.11: Enrolamento helicoidal durante a montagem

### Enrolamentos em Discos

Um disco de enrolamento pode envolver um único fio condutor ou vários fios de condutores isolados enrolados em discos ligados em série ou em paralelo com orientação horizontal. Cada disco inclui múltiplas voltas enroladas sobre outras voltas com cruzamentos interiores e exteriores. A figura A.12 esboça o conceito básico e a figura A.13 mostra cruzamentos típicos durante o processo de montagem do enrolamento em discos. A maioria dos enrolamentos da classe de 25 kV e superiores utilizados em transformadores tipo núcleo envolvido são em discos (HARLOW, 2004).

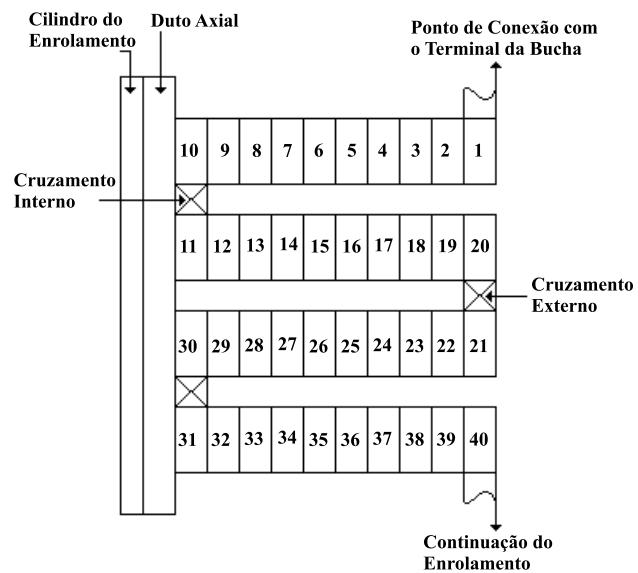


Figura A.12: Esquema do enrolamento tipo disco

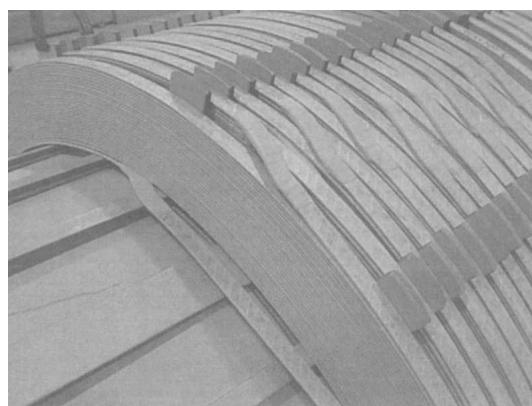


Figura A.13: Cruzamentos internos e externos no enrolamento em discos

### A.0.3 Buchas de Alta e Baixa Tensão

Uma bucha elétrica é uma peça ou estrutura de material isolante, que assegura a passagem isolada de um condutor através de uma parede não-isolante. De acordo com o tipo construtivo, as buchas podem ser classificadas em sólidas ou não capacitivas e buchas capacitivas.

#### Buchas Sólidas ou não Capacitivas

As buchas não capacitivas são geralmente compostas de um condutor central e isolador de porcelana ou epóxi sendo utilizadas principalmente em níveis de tensão até 25 kV. O espaço entre o condutor e o isolador pode consistir em ar ou óleo isolante dependendo do nível de tensão. O óleo isolante é mais utilizado por três razões: primeiro o resfriamento é melhor que com o ar, segundo a constante dielétrica do óleo é maior que a do ar, e por último o óleo possui maior resistência mecânica (HARLOW, 2004). Uma limitação da bucha sólida é a capacidade de suportar tensões a 60 Hz acima de 90 kV. Portanto, sua aplicabilidade se limita a níveis de tensão até 25 kV com uma tensão de teste de 70 kV.

Ainda existem buchas em que o material isolante é o gás SF6 (hexafluoreto de enxofre). Este tipo de bucha é utilizado em níveis de tensões superiores a 69 kV (DA SILVA, 2005).

A figura A.14 mostra o desenho de uma bucha não capacitiva e seus principais componentes (DA SILVA, 2005).

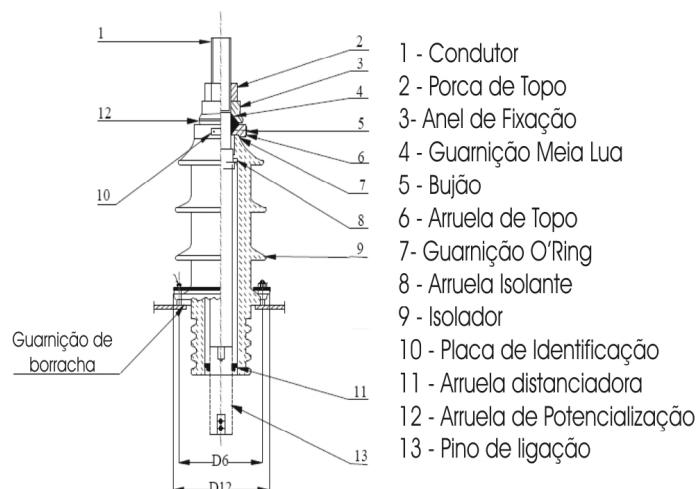


Figura A.14: Bucha não capacitativa

## Buchas Capacitivas

Uma bucha capacitiva é constituída basicamente por um condutor central que pode ser maciço ou em forma de tubo, envolto em um capacitor de papel impregnado em óleo. O capacitor é encapsulado com duas diferentes camadas de porcelana, uma para a parte externa ao transformador e uma para a parte interna, esta última imersa em óleo isolante (DA SILVA, 2005). Buchas capacitivas são geralmente utilizadas em sistemas de alta tensão, acima de 25 kV (HARLOW, 2004). A figura A.15(a) mostra a vista externa de uma bucha capacitiva e a figura A.15(b) mostra uma corte longitudinal com os principais componentes da bucha (DA SILVA, 2005).

Nas buchas capacitivas, são colocados cilindros condutores, concêntricos para formarem superfícies equipotenciais e assim ter-se uma melhor distribuição da tensão (D'AJUZ, 1985). A tensão de isolação da bucha depende diretamente do tamanho do capacitor formado em torno dela (DA SILVA, 2005). A figura A.16(a) ilustra a distribuição do campo elétrico em uma bucha capacitiva e (b) o detalhe do papel do capacitor impregnado em óleo do capacitor.

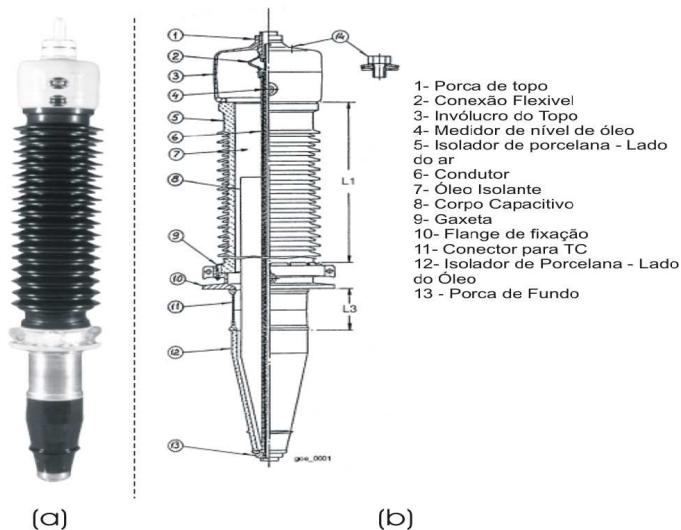


Figura A.15: Bucha capacitiva (a) aspecto (b) detalhes construtivos

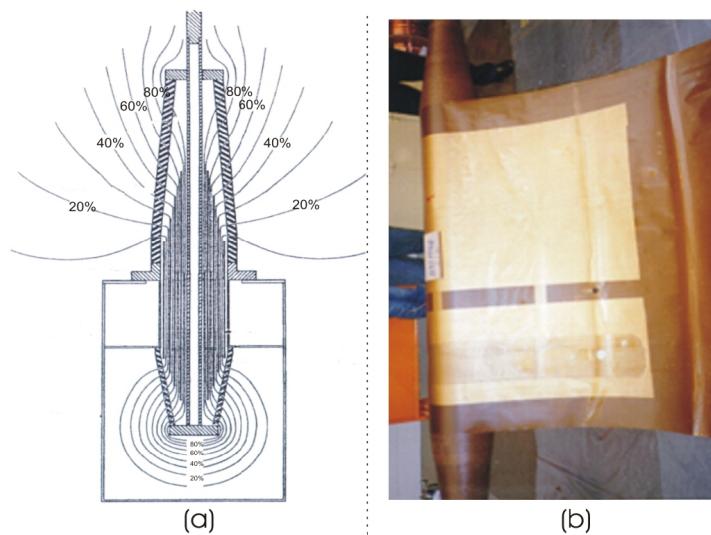


Figura A.16: Bucha capacitiva (a) distribuição do campo elétrico (b) detalhe do papel impregnado em óleo do capacitor

# Referências Bibliográficas

- ADIMARCO. *FRAnalyzer, Sweep Frequency Response Analysis*. Rio de Janeiro, Mai. 2006. Adimarc.
- BAK-JENSEN, J.; BAK-JENSEN, B.; MIKKELSEN, S. D. Detection of Faults and Ageing Phenomena in Transformers by Transfer Functions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, p. 308–314, 1995.
- BENGTSSON, C. Status and Trends in Transformer Monitoring. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 3, p. 1379–1384, July 1996.
- BRITTON, J. A. Transformer Maintenance and Diagnostics Using Frequency Response Analysis. *Electric Energy Magazine*. 2006. Disponível em: <<http://www.electricenergyonline.com>>. Acesso em: 12 mar. 2006.
- CARDOSO JR, G. *Estimação da Seção em Falta em Sistemas Elétricos de Potência via Redes Neurais e Sistemas Especialistas Realizada em Nível de Centro de Controle*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- CATÁLOGO: SIEMENS. Transformadores de força. 2006. Disponível em: <<http://mediaibox.siemens.com.br/upfiles/289.pdf>>. Acesso em: 7 mar. 2006.
- CHRISTIAN, J. et al. Diagnostics of Power Transformers by Using the Transfer Function Method. In: *IEE HIGH VOLTAGE ENGINEERING SYMPOSIUM*. [S.l.], 1999. v. 1, n. 467, p. 37–40.
- DA SILVA, J. R. *Modelagem Para Monitoramento Térmico de Transformadores em Operação e Avaliação do Envelhecimento em Função do Perfil de Carregamento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- D'AJUZ, A. *Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*. Rio de Janeiro: FURNAS, 1985.

- DE AGUIAR, R. *Teste de SFRA em Transformadores e Reatores de Potência. Experiência Prática da COPEL na Aplicação dos testes de SFRA*. Curitiba, 2005.
- DICK, E. P.; ERVEN, C. C. Transformer Diagnostic Testing by Frequency Response Analysis. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 1, n. 6, p. 2144–2153, 1978.
- DOBLE ENGINEERING. *SFRA M5100B User Guide*. Watertown, USA, June 2002.
- FAUSETT, L. *Fundamentals of Neural Networks*. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1994.
- GUUINIC, P.; AUBIN, J. CIGRE's Work on Power Transformers. In: IX EPRI - SUBSTATION EQUIPAMENT DIAGNOSTICS CONFERENCE. New Orleans, 2001.
- HARLOW, J. H. *Electric Power Transformer Engineering*. New York: CRC PRES, 2004.
- HAYKIN, S. *Redes Neurais: Princípios e Prática*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- HERSZTERG, K. S. *Desenvolvimento de um Modelo Matemático para Enrolamentos de Transformadores: Uma Abordagem Analítica da Resposta em Freqüência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- ISLAM, S. M. Detection of Shorted Turns and Winding Movements in Large Power Transformers Using Frequency Response Analysis. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING. [S.I.], 2000. v. 3, p. 2233–2238.
- KIM, J. W. et al. Fault Diagnosis of a Power Transformer Using an Improved Frequency Response Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 169–178, 2005.
- LAPWORTH, J.; MCGRAIL, T. Transformer Failure Modes and Planned Replacement. In: IEE COLLOQUIUM ON TRANSFORMER LIFE MANAGEMENT. London, 1998. p. 9/1–9/7.
- LAPWORTH, J. A.; JARMAN, P. N.; FUNNELL, I. R. Condition Assessment Techniques for Large Power Transformers. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE RELIABILITY OF TRANSMISSION AND DISTRIBUTION EQUIPMENT. Coventry, UK, 1995. p. 85–90.
- LEIBFRIED, T.; FESER, K. On-line Monitoring of Transformers by Means of the Transfer Function Method. In: CONFERENCE RECORD OF THE 1994 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION. [S.I.], 1994. p. 111–114.

- MIKKELSEN, S. D.; BAK-JENSEN, J.; BAK-JENSEN, B. Sensitivity of Identified Transfer Functions in Transformer Diagnosis. *The Institute of Energy Technology, Aalborg University*, 1993.
- MORAIS, D. R. *Acompanhamento de Transformadores em Serviço*. Relatório de Trabalho Orientado em Sistemas de Potência, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 1998.
- OPPENHEIM, A.; WILLSKY, A. *Signals and Systems*. 2. ed. N.J.: Prentice Hall, 1996.
- PLEITE, J. et al. Frequency Response Modeling for Device Analysis. In: IEEE 2002 28TH ANNUAL CONFERENCE OF THE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY. [S.I.], 2002. v. 2, p. 1457–1462.
- RAHIMPOUR, E. et al. Transfer Function Method to Diagnose Axial Displacement and Radial Deformation of Transformer Winding. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 2, p. 493–505, 2003.
- RYDER, S. Frequency Response Analysis for Diagnostic Testing of Power Transformers. *Electricity Today*, v. 13, n. 6, p. 14–19, 2001.
- RYDER, S. Methods for Comparing Frequency Response Analysis Measurements. In: CONFERENCE RECORD OF THE 2002 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION. Boston, USA, 2002. p. 187–190.
- RYDER, S. Transformer Diagnosis Using Frequency Response Analysis: Results From Fault Simulations. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 19, n. 2, p. 16–22, 2002.
- RYDER, S. Diagnosing Transformer Faults Using Frequency Response Analysis. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 19, n. 2, p. 16–22, 2003.
- SWEETSER, C.; MCGRAIL, T. Sweep Frequency Response Analysis Transformer Applications. Technical Paper from Doble Engineering. 2003. Disponível em: <<http://www.doble.com>>. Acesso em: 13 abr. 2005.
- SWEETSER, C.; MCGRAIL, T. Transformer Frequency Response Analysis. IEEE Draft FRA Specification. 2003. Disponível em: <<http://www.doble.com>>. Acesso em: 13 abr. 2005.
- TENBOHLEN, S.; RYDER, S. Making Frequency Response Analysis Measurements: A Comparison of the Swept Frequency and Low Voltage Impulse Methods. In: XIIIITH

- INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. Netherlands, 2003.
- VAESSEN, P. T. M.; HANIQUE, E. A New Frequency Response Analysis Method for Power Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 1, p. 384–390, 1992.
- WANG, M.; VANDEMAAR, A. J.; SRIVASTAVA, K. D. Transformer Winding Movement Monitoring in Service - Key Factors Affecting FRA Measurements. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 20, n. 5, p. 5–12, Sept./Oct. 2004.
- WANG, M.; VANDERMAAR, A. J.; SRIVASTAVA, K. D. Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 18, n. 6, p. 12–25, Nov./Dec. 2002.
- WANG, M.; VANDERMAAR, A. J.; SRIVASTAVA, K. D. Improved Detection of Power Transformer Winding Movement by Extending the FRA High Frequency Range. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 3, p. 1930–1938, July 2005.
- WENZEL, D.; BORSI, H.; GOCKENBACH, E. Analytical Computation of the Transfer Functions of Transformers. In: INTERNATIONAL SYSPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATING MATERIALS. Toyohashi, Japan, 1998. p. 787–790.
- XU, D. K.; FU, C. Z.; LI, Y. M. Application of Artificial Neural Network to the Detection of the Transformer Winding Deformation. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING. London, 1999. v. 5, n. 467, p. 220–223.