

**Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica**

Estudo de Metodologia e Técnicas para Execução de Ensaios de Resposta em Frequência em Transformadores de Potência

**Daniel Carrijo Polonio Araujo
Belo Horizonte – Julho – 2009**

Dissertação de Mestrado

Título: *Estudo de Metodologia e Técnicas para Execução de Ensaios de Resposta em Freqüência em Transformadores de Potência*

Área de Concentração: *Sinais e Sistemas*

Linha de Pesquisa: *Sistemas de Controle e Automação de Processos*

Mestrando: *Daniel Carrijo Polonio Araujo*

Orientador: *José Luiz Silvino*

Co-Orientador: *Peterson de Resende*

Data: *17 de Julho de 2009*

Daniel Carrijo Polonio Araujo – Mestrando

José Luis Silvino – Professor Orientador

Peterson de Resende – Professor Co-Orientador

Araújo, Daniel Carrijo Polonio

Estudo de Metodologia e Técnicas para Execução de Ensaios de Resposta em Frequência em Transformadores de Potência

Belo Horizonte, 07, 2009. 220 páginas.

Dissertação de mestrado submetido à Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais - PPGEE/UFMG, como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Estudo de Metodologia e Técnicas para Execução de Ensaios de Resposta em Frequência em Transformadores de Potência

Daniel Carrijo Polonio Araujo

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 17-07-2009 pelo Professor Orientador e Membros da Banca Examinadora.

Prof. Dr. José Luis Silvino – Professor Orientador

Prof. Dr. Peterson de Resende – Professor Co-Orientador

Prof^a. Dr^a. Maria Helena Murta Vale – LRC – UFMG

Prof. Dr. Porfírio Cabaleiro Cortizo – DELT – UFMG

Prof. Dr. Marcos Antônio Severo Mendes – DELT – UFMG

Dedico este trabalho ao meu pai já falecido, Marcos. Foi ele quem encravou em mim a idéia de que o conhecimento é a maior riqueza de um homem, um bem que nunca pode dele ser retirado ou cerceado. E que esta virtude deve ser usada para o benefício da humanidade, independente da sua área de conhecimento, religião ou alinhamento político.

A minha amada mãe Sidneya e ao meu padrasto Eustáquio, que sempre fizeram tudo para tornar possíveis os meus sonhos e desejos.

A minha querida namorada Natália, que sempre me acompanhou e auxiliou nos momentos de dificuldade, mesmo sendo freqüentemente privada de momentos ao meu lado.

A Dione, Manticore, Mynra e Mykaella por nunca terem me decepcionado, mesmo após longas horas de simulações e trabalhosos cálculos.

Ao Chico, pelas inesperadas e divertidas interrupções...

Ao meu valioso amigo Rodrigo, que não mais se encontra conosco, pelos bons e inesquecíveis momentos. Pelo carinho e apoio quando tive de afastar-me para dedicar aos estudos, pelo tempo que vivemos e passamos juntos!

Agradecimentos

Ao professor Silvino, pela criteriosa orientação, dedicação e estímulo durante todos estes anos.

Ao professor Peterson, ajuda imprescindível em todo o trabalho, principalmente na área de redes neurais.

Ao meu ex-chefe na Cemig, Alvaro, pela amizade, apoio, estímulo e orientação, além de seus preciosos conselhos, sobre a vida...

Ao meu ex-colega de trabalho, Marcelo, pelo apoio durante a parte prática do projeto. A sua experiência em ensaios de campo tornou o trabalho muito mais simples...

Ao Ezequiel, que cuidou desta pesquisa antes de mim, deixando um legado de conhecimento e oportunidades

Agradeço ao amigo Breno que, quando bolsista, e mesmo depois disto, me auxiliou em todos os aspectos deste trabalho. Foram horas infindáveis e memoráveis de discussões, análises, brigas, caracteres digitados, linhas de código, artigos lidos, escritos e muitos metros de cabos enrolados!

A todos os meus colegas da Treetech, que mantiveram a calma enquanto eu falava que não iria trabalhar durante o próximo mês, porque tinha que escrever mais 84 páginas da dissertação...

A todos os membros e funcionários do LRC, que me acolheram carinhosamente.

Enfim, a todos que contribuíram para o êxito do trabalho.

Apresentação

Esta dissertação de mestrado compõe-se de 10 capítulos, brevemente comentados a seguir.

O capítulo 1, que é a **Introdução**, mostra a relevância do estudo realizado, conectando o leitor no mundo da resposta em frequência aplicada a transformadores de potência.

O capítulo 2 é **A Análise da Resposta em Frequência**, do inglês *Frequency Response Analysis (FRA)*, que, diferentemente da Revisão Bibliográfica, contextualiza o leitor com o passado, o presente e o futuro da FRA. A Revisão Bibliográfica sobre o assunto será feita de forma implícita durante todo o texto da dissertação. Desta forma, dilui-se o intrincado conhecimento necessário a compreensão do tema, aplicando a ciência anterior diretamente onde será utilizada, assim facilitando a análise.

No capítulo 3, **Conhecendo o Transformador**, a teoria básica, o projeto, o funcionamento e aspectos relacionados à construção do transformador de potência e suas particularidades são expostos. Uma discussão do ponto de vista do funcionamento mecânico é realizada. Além disso, uma discussão a respeito do funcionamento do transformador de potência ao longo de uma larga faixa de frequências é feita, evidenciando as componentes parasitas que surgem em sua modelagem, com ênfase nas características comumente utilizadas pelo sFRA.

No capítulo 4, **Filosofias de Medição e Obtenção da Resposta em Frequência**, é mostrado como o ensaio de FRA é realizado, suas diversas vertentes, nuances, métodos e particularidades. É neste capítulo que se compreende como o ensaio é aplicado ao transformador e onde se vislumbram as primeiras dificuldades intrínsecas a cada método. Os detalhes do método sFRA serão apresentados através de resultados práticos e estudos de casos.

No capítulo 5, **Estudos de Procedimentos de Medição em FRA**, são explanados diversos experimentos e conclusões acerca do processo de aquisição das medições do sFRA. Neste capítulo é realizada uma padronização de métodos e realizações matemáticas para responder adequadamente a perguntas básicas. Os desafios de obter os dados, transportá-los e tratá-los, são apresentados e solucionados.

No capítulo 6, **Estudos de Caso**, são apresentados casos práticos de medições e avaliação dos resultados, incluindo um amplo estudo de simulações de faltas e sua correlação a parâmetros e defeitos típicos de transformadores.

No capítulo 7, **Conclusões**, são apresentadas as considerações finais e as conclusões obtidas desta pesquisa.

No capítulo 8, **Proposta de Trabalhos Futuros**, várias sugestões de melhorias e futuras pesquisas são apresentadas, na forma de guia prático.

No capítulo 9, temos as **Referências Bibliográficas**.

No **Apêndice A**, é apresentado o conceito de impedância e no **Apêndice B**, introduzir-se-á uma técnica bastante promissora para aumentar a velocidade e a qualidade dos ensaios de sFRA

Boa leitura!

Daniel Carrijo Polonio Araujo

"Que a inspiração chegue não depende de mim. A única coisa que posso fazer é garantir que ela me encontre trabalhando."

Pablo Picasso

Lista de Figuras

Figura 1: Exemplo de modelo em rede RLC para um enrolamento de transformador [7].....	10
Figura 2: Arranjo físico de um capacitor	11
Figura 3: Arranjo físico de um indutor	12
Figura 4: Exemplo de curva de Resposta em Freqüência	13
Figura 5: Processo de realização do ensaio de Resposta em Freqüência, FRA.....	16
Figura 6: Seqüência de passos para realização de <i>iFRA</i> (acima) e <i>sFRA</i> (abaixo)	22
Figura 7: O Sistema Elétrico de Potência	27
Figura 8: Diagrama das elevações e abaixamentos de tensão	28
Figura 9: Campo B envolvendo um condutor cilíndrico percorrido por uma corrente i , a uma distância r	32
Figura 10: Tensão induzida em um laço condutor que envolve um campo B.....	33
Figura 11: Transformador rudimentar	34
Figura 12: Representação do fenômeno da indução	35

Figura 13: Curva de histerese (Ciclo de histerese).....	39
Figura 14: Perdas resultantes da histerese	40
Figura 15: Tipos de Curvas de Histerese.....	41
Figura 16: A formação de harmônicos devido à histerese (curva BxH) .	43
Figura 17: Curvas BxH para várias tensões de excitação aplicadas em um transformador de 150 MVA 230 – 138 kV	44
Figura 18: Vista em corte de um transformador de potência típico[18]..	46
Figura 19: Esquema do funcionamento do radiador de um transformador de potência[18].....	49
Figura 20: Tipos construtivos de núcleo	50
Figura 21: Núcleo tipo envolvido.....	51
Figura 22: Núcleo tipo envolvente	51
Figura 23: Organização da parte ativa em um transformador de potência típico[18].....	53
Figura 24: Diagrama da interação entre dois condutores retilíneos percorridos por correntes	55
Figura 25: Disposição das linhas de campo gerado pela corrente em um condutor retilíneo.....	56

Figura 26: Esquema de como se processa a deformação axial de um enrolamento	58
Figura 27: Esquema de uma deformação radial em um enrolamento ...	59
Figura 28: Diagrama ilustrativo de um deslocamento de bobina em um transformador de potência [18].....	60
Figura 29: Diagrama ilustrativo da distribuição de capacitâncias internas	63
Figura 30: Curva típica de um ensaio de medição de impedância terminal	64
Figura 31: Representação do valor verdadeiro de um capacitor	68
Figura 32: Circuito equivalente considerando-se elementos parasitas ..	68
Figura 33: Composição de valor indicativo de um capacitor	69
Figura 34: Esquema do método de medição por ponte	70
Figura 35: Esquema do método ressonante de medição	72
Figura 36: Esquema típico de medição de impedância utilizando o método I-V.....	74
Figura 37: Esquema do método de Análise de Redes.....	76
Figura 38: Esquema do método de medição utilizando ponte auto balanceada.....	77

Figura 39: Uso de multiplicadores no método da ponte auto balanceada.	79
Figura 40: Descontinuidade na curva de FRA	80
Figura 41: Rede de impedâncias prática.	81
Figura 42: Medição de um elemento de impedância.	81
Figura 43: Ponte auto balanceada com terminal de guarda	82
Figura 44: Ilustração dos elementos que poderiam ser “guardados” em um ensaio.....	83
Figura 45: Esquema de medição de relação de transformação.....	84
Figura 46: Exemplo de determinação das tensões de base para normalização	86
Figura 47: Resultado típico de medição de relação de transformação ..	87
Figura 48: Testes com os cabos coaxiais.....	93
Figura 49: Desvio de impedância devido à falha na conexão.....	95
Figura 50: Medição sobre um resistor comercial de 27Ω utilizando-se cabos coaxiais longos para transmissão dos sinais	96
Figura 51: Medição sobre um resistor comercial de 27Ω utilizando-se cabos coaxiais curtos	97

Figura 52: Medição sobre um resistor comercial de 27Ω utilizando-se cabos coaxiais longos com casamento de impedâncias nas extremidades.....	98
Figura 53: Exemplo de medição de impedância terminal em laboratório sobre um transformador trifásico, utilizando-se cabos longos.....	99
Figura 54: Distribuição de pontos sugerida ao longo da faixa de frequências encontrada em algumas referências.....	102
Figura 55: Nova distribuição logarítmica de pontos sugerida.	103
Figura 56: Distribuição de 100 pontos de medição ao longo da faixa de frequências.....	105
Figura 57: Distribuição de 350 pontos de medição ao longo da faixa de frequências.....	105
Figura 58: Distribuição de 1000 pontos de medição ao longo da faixa de frequências.....	106
Figura 59: Ensaio de medição de impedância terminal em laboratório.	116
Figura 60: Medição de impedância terminal em laboratório.	116
Figura 61: Resultado comparativo de relação de transformação para um ensaio de indução de faltas.....	118
Figura 62: Mesmo resultado da figura anterior	118

Figura 63: Comparativo entre ensaios de caracterização com e sem cabos terminais no secundário.....	120
Figura 64: Fotografia mostrando o esquema de ligação dos cabos terminais de conexão.	121
Figura 65: Ensaio de resposta em freqüência sobre o equipamento de FRA.....	124
Figura 66: Ensaio de resposta em freqüência sobre o equipamento de FRA – sem cabos.....	124
Figura 67: Comparativo de módulo e ângulo para varreduras crescente e decrescente de freqüências.	127
Figura 68: Comparativo de módulo e ângulo para ensaios normal e temporizado.....	129
Figura 69: Diagrama esquemático da ponta ativa projetada e sua resposta em freqüência simulada.....	131
Figura 70: Resposta em freqüência do par conversor com fibra.	134
Figura 71: Transformador utilizado nos ensaios de indução de faltas.	138
Figura 72: Curto-circuito entre várias espiras da bobina A.	141
Figura 73: Comparativo de Impedância – Curto entre 3 espiras da bobina B – Terminal de medição: Secundário B - Neutro	142

Figura 74: Comparativo de Impedância – Curto entre 8 espiras da bobina B – Terminal de medição: Secundário B - Neutro	142
Figura 75: Comparativo de Impedância – Curto entre várias espiras da bobina A – Terminal de medição: Secundário A - Neutro	142
Figura 76: Comparativo de relação de transformação – Curto entre 3 espiras da bobina B.....	144
Figura 77: Comparativo de relação de transformação – Curto entre 8 espiras da bobina B.....	144
Figura 78: Comparativo de relação de transformação – Curto entre várias espiras da bobina A	144
Figura 79: Processo de afastamento das placas do núcleo do transformador.....	146
Figura 80: Detalhe das laminas do núcleo.....	146
Figura 81: Resultados da medição de impedância terminal sem os parafusos de sustentação das placas	147
Figura 82: Resultados da medição de relação de transformação sem os parafusos de sustentação das placas	147
Figura 83: Medição de impedância para núcleo muito deslocado – Módulo	148

Figura 84: Medição de impedância para núcleo muito deslocado – Fase	148
Figura 85: Medição de relação de transformação para núcleo muito deslocado.....	148
Figura 86: Resultados da medição de impedância terminal com o transformador remontado.....	149
Figura 87: Impedância em suas partes real e imaginária.	171
Figura 88: Representação de uma impedância indutiva.....	173
Figura 89: Representação de uma impedância capacitiva.	173
Figura 90: Representação de uma admitância indutiva.....	173
Figura 91: Representação de uma admitância capacitiva.	173
Figura 92: Curva ROC para toda a base de dados.....	180
Figura 93: Curva ROC para toda a base de dados, menos o transformador de 25 MVA.	180
Figura 94: Curva ROC para toda a base de dados, menos o transformador de 25 MVA e o de 15MVA.....	181
Figura 95: Curva ROC para o transformador de 3 kVA.	182

Lista de Tabelas

Tabela 1: Uso típico dos métodos	6
Tabela 2: Comparativo dos tempos de teste e processamento	6
Tabela 3: Tensões típicas do sistema elétrico	28
Tabela 4: Classificação dos níveis de tensão	28
Tabela 5: Classificação básica dos transformadores.....	30
Tabela 6: Permeabilidade relativa de diversas substâncias	37
Tabela 7: Conteúdo harmônico percentual da corrente de excitação	43
Tabela 8: Comparativo entre métodos de medição de impedância	83
Tabela 9: Exemplo de correspondência entre enrolamentos Δ -Y	85
Tabela 10: Distribuição sugerida de pontos por década para ensaios de FRA.....	107
Tabela 11: Dados técnicos do transformador utilizado nos ensaios....	138
Tabela 12: Correspondências entre enrolamentos.....	138
Tabela 13: Distribuição de pontos por década de freqüência.....	139
Tabela 14: Regime de trocas de resistores de shunt para primário e secundário.....	139

Tabela 15: Base de dados utilizada na LS-SVM..... 178

Lista de Equações

$$V = \int_0^d E dz = \int_0^d \frac{\rho}{\varepsilon} dz = \frac{\rho d}{\varepsilon} = \frac{Qd}{\varepsilon A} \quad (\text{Equação 1}) \dots\dots\dots 11$$

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (\text{Equação 2}) \dots\dots\dots 11$$

$$C = \frac{Q}{V} \quad (\text{Equação 3}) \dots\dots\dots 11$$

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (\text{Equação 4}) \dots\dots\dots 12$$

$$\int B \cdot dl = i \times \mu_0 \quad (\text{Equação 5}) \dots\dots\dots 31$$

$$\int B \cdot dl = B \times 2\pi r \quad (\text{Equação 6}) \dots\dots\dots 32$$

$$B = i \times \frac{\mu_0}{2\pi r} \quad (\text{Equação 7}) \dots\dots\dots 32$$

$$\phi = \int B \cdot dA \quad (\text{Equação 8}) \dots\dots\dots 32$$

$$E = -\frac{d\phi}{dt} \quad (\text{Equação 9}) \dots\dots\dots 33$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{B}{H} \quad (\text{Equação 10}) \dots\dots\dots 36$$

$$B = \frac{\mu_r \mu_0 i}{2\pi r} \quad (\text{Equação 11}) \dots\dots\dots 56$$

$$Z_x = \frac{Z_1 Z_3}{Z_2} \quad (\text{Equação 12}) \dots\dots\dots 70$$

$$K = 20 \log \left(\frac{|V_o|}{|V_i|} \right) [dB] \quad (\text{Equação 13}) \dots\dots\dots 74$$

$$\theta = \angle V_o, V_i [^\circ]$$

$$\frac{|V_o|}{|V_i|} = \frac{R_o}{R_o + Z} \Rightarrow Z = R_o \cdot \frac{|V_i|}{|V_o|} - R_o [\Omega] \quad (\text{Equação 14}) \dots\dots\dots 75$$

$$V_o = -R_1 \cdot I \quad (\text{Equação 15}) \dots\dots\dots 78$$

$$Z = \frac{V_i}{I} \Rightarrow Z = \frac{V_i}{-V_o} \Rightarrow Z = -R_1 \cdot \frac{V_i}{V_o} \quad (\text{Equação 16}) \dots\dots\dots 78$$

$$V_{XBASE} = \frac{V_{Xnom}}{\sqrt{3}} \quad \text{e} \quad V_{HBASE} = V_{Hnom} \quad (\text{Equação 17}) \dots\dots\dots 86$$

$$V_{X/H}(p.u.) = \frac{V_{Xmedida} / V_{Haplicada}}{V_{XBASE} / V_{HBASE}} \quad (\text{Equação 18}) \dots\dots\dots 86$$

$$V_{H/X}(p.u.) = \frac{V_{Hmedida} / V_{Xaplicada}}{V_{HBASE} / V_{XBASE}} \quad (\text{Equação 19}) \dots\dots\dots 87$$

$$\begin{aligned}Z &= R \pm jX = |Z| \angle \pm \theta \\R &= |Z| \cos \theta \\X &= |Z| \sin \theta \\Z &= \sqrt{R^2 + X^2} \\ \theta &= \arctg\left(\frac{X}{R}\right)\end{aligned} \quad \text{(Equação 20) 171}$$

$$Q = \frac{X}{R}; Q = \frac{B}{G} \quad \text{(Equação 21) 172}$$

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS.....	3
1.3	METODOLOGIA	4
1.4	JUSTIFICATIVA.....	4
1.5	O TEMA EM INVESTIGAÇÃO: sFRA	5
2	A ANÁLISE DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA NO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA 8	
2.1	O QUE É FRA.....	8
2.2	HISTÓRICO DOS ENSAIOS DE FRA.....	16
2.3	TÉCNICAS OFFLINE E ONLINE.....	18
2.3.1	<i>O método sFRA</i>	<i>18</i>
2.3.2	<i>O método iFRA.....</i>	<i>20</i>
2.4	DESAFIOS PRÁTICOS E TEÓRICOS IDENTIFICADOS	22
3	CONHECENDO O TRANSFORMADOR.....	25
3.1	INTRODUÇÃO.....	25
3.2	A DEFINIÇÃO DO TRANSFORMADOR.....	29
3.2.1	<i>A classificação do transformador</i>	<i>29</i>
3.3	O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO TRANSFORMADOR	31
3.3.1	<i>A indução eletromagnética.....</i>	<i>31</i>
3.3.2	<i>A curva de histerese e a formação de harmônicos.....</i>	<i>42</i>
3.4	O TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA.....	45
3.4.1	<i>Aspectos construtivos do Transformador de Potência</i>	<i>47</i>
3.4.1.1	<i>Elementos Estruturais</i>	<i>47</i>
3.4.1.2	<i>Núcleo.....</i>	<i>50</i>

3.4.1.3	A Parte Ativa	52
3.4.1.4	Buchas.....	53
3.5	FALTAS MECÂNICAS.....	54
3.5.1	<i>Origem dos Esforços Mecânicos</i>	55
3.5.2	<i>Deformações nos Enrolamentos, Núcleo, e Faltas Mecânicas</i>	57
3.6	CARACTERIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	62
4	FILOSOFIAS DE MEDIÇÃO E OBTENÇÃO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA	
	66	
4.1	INTRODUÇÃO.....	66
4.1.1	<i>Medição de impedância: Efeitos parasitas</i>	67
4.1.2	<i>Valores Verdadeiro, Efetivo e Indicativo</i>	68
4.2	MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA TERMINAL POR VARREDURA DE FREQUÊNCIA	69
4.2.1	<i>Método da Ponte</i>	70
4.2.2	<i>Método Ressonante</i>	71
4.2.3	<i>Método I-V</i>	72
4.2.4	<i>Método da Análise de redes</i>	75
4.2.5	<i>Método da ponte auto balanceada</i>	76
4.2.5.1	Uso de multiplicadores.....	78
4.2.5.2	O terminal de guarda.....	80
4.2.6	<i>Medição das Relações de Transformação entre Enrolamentos</i>	83
5	ESTUDOS DE PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO EM FRA.....	90
5.1	INTRODUÇÃO.....	90
5.2	IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE FATORES CRÍTICOS AO SISTEMA DE MEDIÇÃO	91
5.2.1	<i>Os cabos de conexão</i>	92
5.2.2	<i>Investigação das frequências de interesse nos ensaios de FRA</i>	100
5.2.2.1	A distribuição de pontos	101
5.2.2.2	O número de pontos por década.....	104
5.2.2.3	Criação dinâmica adaptativa do vetor de frequências	107
5.2.2.3.1	A Motivação para a criação dinâmica do vetor de frequências	108

5.2.2.3.2	A proposta.....	109
5.2.2.3.3	A Estrutura Básica.....	110
5.2.2.3.4	Potencialidades da Técnica dos Vetores Dinâmicos	111
5.2.3	<i>Escolha dos resistores de shunt</i>	112
5.2.4	<i>A escolha da escala de apresentação de curvas de medição</i>	114
5.2.5	<i>A preparação do transformador para ensaio</i>	119
5.3	OUTROS ENSAIOS COMPLEMENTARES	121
5.3.1	<i>Ensaio sobre o equipamento de aquisição de FRA</i>	121
5.3.2	<i>Varredura crescente ou decrescente de frequências</i>	126
5.3.3	<i>Necessidade de temporização nos ensaios de FRA</i>	128
5.3.4	<i>Emprego de pontas ativas de medição</i>	130
5.3.5	<i>Uso de fibras ópticas</i>	133
6	ESTUDOS DE CASO	137
6.1	INTRODUÇÃO	137
6.2	ENSAIOS DE INDUÇÃO DE CURTO-CIRCUITO ENTRE ESPIRAS	140
6.3	ENSAIOS DE DESLOCAMENTO DE NÚCLEO	145
7	CONCLUSÕES	152
8	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	155
8.1	INTRODUÇÃO	155
8.2	PESQUISA EM METODOLOGIA E TÉCNICAS ONLINE DE FRA.....	156
8.3	APERFEIÇOAMENTO NA METODOLOGIA DA ANÁLISE	157
8.3.1	<i>Uso de inteligência computacional</i>	157
8.3.2	<i>Metodologia estatística</i>	158
8.3.3	<i>Estudos classificatórios das falhas</i>	158
8.4	APERFEIÇOAMENTO NA METODOLOGIA DO ENSAIO	158
8.4.1	<i>Ensaio de relação de transformação</i>	158
8.4.2	<i>Experimentação em campo</i>	158
8.4.3	<i>Testes de Compatibilidade Eletromagnética (EMC)</i>	159

8.5	APERFEIÇOAMENTO DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO	159
8.5.1	<i>Módulo para o ensaio de relação de transformação</i>	160
8.5.2	<i>Sistema de cabos utilizados no ensaio</i>	160
8.5.3	<i>Acoplamento do terminal de guarda</i>	160
8.5.4	<i>Estudo de novos conectores</i>	161
8.5.5	<i>Mudança na tensão de ensaio</i>	161
8.5.6	<i>Aprimoramento do projeto e dos circuitos eletrônicos do sistema de medição</i> .	162
8.5.7	<i>Melhorias no gerador de sinais e no osciloscópio</i>	162
8.6	APERFEIÇOAMENTO DO SOFTWARE DE MEDIÇÃO	163
8.6.1	<i>Interface</i>	163
8.6.2	<i>Adição do controle e tratamento do ensaio de relação de transformação</i>	163
8.6.3	<i>Introdução de todos os aperfeiçoamentos pesquisados</i>	163
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	164
10	APÊNDICE A	170
10.1	O CONCEITO DE IMPEDÂNCIA	170
11	APÊNDICE B	174
11.1	A CLASSIFICAÇÃO DOS RESULTADOS UTILIZANDO MÁQUINAS VETOR SUPORTE....	174
11.2	DIFICULDADES DE SE OBTEREM DIAGNÓSTICOS	175
11.2.1	<i>A Máquina Vetor Suporte (SVM)</i>	176
11.2.2	<i>O método LS-SVM</i>	176
11.3	APLICAÇÃO DA LS-SVM AO DIAGNÓSTICO ATRAVÉS DO ENSAIO DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA	178
11.3.1	<i>Avaliação dos resultados</i>	179

Resumo

Devido à importância do transformador de potência no sistema elétrico, a detecção de faltas incipientes e a capacidade de se avaliar o estado atual do equipamento se tornam indispensáveis, evitando assim prejuízos decorrentes de sua indisponibilidade. Neste contexto, as técnicas não invasivas de diagnóstico são bastante atrativas, pois contribuem para a redução do tempo gasto nas manutenções.

O método de diagnóstico de faltas em transformadores via Análise da Resposta em Frequência é um ensaio não invasivo de grande potencial de uso, mas que ainda necessita de um maior detalhamento acerca dos procedimentos de medição e análise dos resultados. O presente trabalho explora de forma crítica aspectos teóricos e práticos relacionados à aplicação do método, e identifica características e comportamentos essenciais para o sucesso do ensaio.

Partindo de estudos teóricos e experimentais, é proposta uma metodologia consistente e robusta, incorporando certo grau de imunidade a fatores espúrios de medição e oferecendo suporte para a correta interpretação dos resultados. A sensibilidade dos ensaios utilizando a metodologia é avaliada a partir de experimentos de falhas induzidas em laboratório. As soluções propostas suportam ensaios futuros através de uma padronização, possibilitando altos níveis de repetição nos resultados.

A contribuição final desta dissertação é propor uma técnica de ensaio de Resposta em Frequência que ofereça medições confiáveis para a etapa de elaboração dos diagnósticos e prognósticos.

Abstract

Due to the importance of the power transformer in the electrical system, the detection of incipient faults and the ability to assess the current state of equipment become necessary, thereby avoiding losses from its unavailability. In this context, the non-invasive diagnostic techniques are very attractive because it helps to reduce the maintenance time.

Faults diagnosis method in transformers by Frequency Response Analysis is a non-invasive test of great potential for use but it still needs more detail about procedures of results measurement and analysis. This dissertation presents a critical approach about theoretical and practical aspects related to the method application, and identifies characteristics and behaviors essential to the success of the test.

Starting from theoretical and experimental researches, a consistent and robust methodology is proposed, incorporating some degree of immunity to spurious measurement factors and providing support for the correct interpretation of results. The sensitivity of tests using the methodology is evaluated from experiments of laboratory induced failures. The proposed solutions support future tests by standardization, enabling high levels of repetition in the results.

This dissertation's final contribution is to propose a Frequency Response test technique which provides reliable measurements for the diagnoses and prognoses elaboration stage.

Resumen

Debido a la importancia del transformador de potencia en el sistema eléctrico, la detección de fallas incipientes y la capacidad de evaluar el estado actual del equipo se vuelven indispensables, evitando así las pérdidas de su indisponibilidad. En este contexto, las técnicas no invasivas de diagnóstico son muy atractivas, pues ayudan a reducir el tiempo utilizado en mantenimiento.

El método de diagnóstico de fallas en los transformadores a través de la Análisis de la Respuesta en Frecuencia es una prueba no invasiva de gran potencial de uso, pero aún necesita un mayor detalle sobre los procedimientos de medición y análisis de los resultados. Esta disertación presenta un enfoque crítico a respecto de los aspectos teóricos y prácticos relacionados con el método, e identifica características y conductas esenciales para el éxito de la prueba.

A partir de estudios teóricos y experimentales, se propone una metodología consistente y robusta, que incorpora un cierto grado de inmunidad a los factores espurios de medición y presta apoyo para la correcta interpretación de los resultados. La sensibilidad de las pruebas que utilizan la metodología es evaluada a partir de experimentos de fallas inducidas en laboratorio. Las soluciones soportan pruebas futuras a través de una normalización, que permite altos niveles de repetición en los resultados.

La última aportación de esta disertación es proponer una técnica de prueba de Respuesta en Frecuencia que ofrezca mediciones fiables en la fase de elaboración de diagnósticos y pronósticos.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A sociedade moderna está estruturada de tal forma que a necessidade de utilização de energia na forma elétrica passou a constituir fator decisivo para o desenvolvimento. A maior parte dos equipamentos industriais, residenciais e até mesmo agrícolas está baseada direta ou indiretamente no uso de energia elétrica, e isto motiva grandes esforços por parte das concessionárias em fornecer energia elétrica de forma contínua e dentro de padrões de qualidade.

Ao mesmo tempo, em um mercado tão competitivo, existe uma exigência muito grande de reestruturação por parte das companhias elétricas brasileiras no sentido de maximizar receitas ao mesmo passo em que reduz custos, com uma gerência muito cuidadosa dos ativos do sistema e da manutenção a ser realizada.

Anualmente as concessionárias de energia reservam boa parte de seus recursos em investimentos de manutenção visando atender a necessidade de prolongamento de vida útil dos equipamentos disponíveis e a manutenção dos índices de qualidade da energia fornecida, evitando multas por parte dos

agentes reguladores. Neste contexto, o desenvolvimento de novas técnicas de manutenção, em especial preditiva, torna-se de grande relevância, pois melhor se ajusta a tal filosofia à medida que ajuda a evitar que equipamentos sofram falhas catastróficas.

Os transformadores de potência são peças chave nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, pois são responsáveis pela conversão de grandes blocos de energia. São os elementos centrais das subestações de energia e em geral são também os elementos mais caros. Faltas em transformadores de potência com sua retirada de operação representam um enorme problema, pois podem provocar grandes desligamentos, eventualmente de grande duração. Além disso, os custos associados à sua manutenção corretiva são em geral elevados.

Os aspectos construtivos de transformadores de potência são dimensionados de forma a garantir uma proteção com relação às condições de operação em subestação, e com isso sua parte ativa (núcleo e enrolamentos) fica protegida por um tanque metálico de alta resistência, o que dificulta os processos de manutenção. Nesse contexto, as técnicas de manutenção preditiva baseadas em medições indiretas são de grande interesse.

A técnica de diagnóstico de faltas mecânicas em transformadores de potência via resposta em frequência, *FRA* (*Frequency Response Analysis*), em suas variantes *iFRA* (onde o método *FRA* é aplicado a partir da utilização de um impulso de tensão) ou *sFRA* (em que o método de *FRA* é baseado na varredura de frequências), ocupa um potencial lugar de destaque dentre as

técnicas de diagnóstico existentes por permitir a avaliação da condição mecânica operativa do transformador. Com ela seria possível detectar deslocamentos de bobinas e núcleo que representariam potenciais fragilidades a surtos de tensão e diminuição da suportabilidade a curtos-circuitos externos.

A técnica de resposta em frequência já é amplamente utilizada em microeletrônica para avaliação das condições operacionais em circuitos, mas, devido a dificuldades particulares, ainda não está completamente desenvolvida para utilização em transformadores de potência de subestações. Apesar de ser um método antigo, com a primeira publicação que retrata a potencial aplicação em transformadores de potência datar da década de 70 [1], muitos avanços ainda precisam ser feitos no sentido de se desenvolver tanto uma metodologia de ensaio quanto uma metodologia de diagnóstico, aliadas a um sistema automatizado, capazes de fornecerem resultados práticos confiáveis. A pesquisa realizada neste trabalho e descrita no decorrer deste texto se enquadra neste contexto e busca promover um avanço no estudo da metodologia relacionada ao processo de medição e aquisição de sinais de FRA.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e a consolidação de uma metodologia de ensaio em resposta em frequência, com a identificação de fatores de ordem prática que possam ter influência expressiva sobre os resultados de medições em FRA.

Espera-se com isso poder amparar a definição, projeto e construção de um sistema automatizado de realização de FRA no futuro, aliado a um estudo de desenvolvimento de uma metodologia de diagnóstico de faltas via FRA.

1.3 Metodologia

Uma discussão acerca das topologias de medição existentes é feita neste trabalho e a escolha do método mais apropriado para aquisição de sinais de FRA levou em consideração fatores de ordem prática, tais como facilidade de implementação em laboratório, faixas de passagem, amplitudes de tensão relacionadas, interferências de ruídos, dentre outros.

A metodologia de ensaio com os procedimentos de medição foi definida ao longo do texto, baseada na topologia de medição escolhida.

1.4 Justificativa

A definição precisa de uma metodologia de ensaio em FRA é fundamental para a continuidade das pesquisas nesta área, pois ampara conclusões futuras. A identificação de fatores críticos ao sistema de medição, numa perspectiva prática, contribui para a consolidação da metodologia de ensaio.

Para que uma metodologia de diagnóstico confiável seja desenvolvida, além de um eventual sistema automatizado de aquisição e análise em FRA, é necessária uma etapa prévia que consiste na elaboração de uma metodologia de ensaio, tratada neste trabalho.

1.5 O Tema em Investigação: sFRA

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e os resultados das pesquisas acerca da técnica de diagnóstico e prognóstico de transformadores de potência conhecida como Análise da Resposta em Frequência, ou *FRA* acrônimo que em inglês significa *Frequency Response Analysis*. O *FRA* é um teste elétrico que, primariamente, fornece informação a respeito da integridade mecânica do transformador.

A técnica possui duas vertentes a *sFRA* – *Sweep Frequency Response Analysis* e a *iFRA* – *Impulse Frequency Response Analysis*. Cada uma destas vertentes possui características que lhe conferem algumas vantagens e desvantagens. Ambas serão analisadas neste trabalho.

Estas duas vertentes são utilizadas de modos distintos. A primeira forma é utilizada como um ensaio tradicional no transformador, ou seja, com o equipamento desligado e desconectado de seu barramento. A segunda forma é a sua utilização como uma forma de monitoração, sendo a sua aplicação realizada com o equipamento energizado, conectado em seu barramento e em operação normal.

Devido a seu amplo espectro de frequência, excelente resolução e repetição, a técnica *sFRA* tem se mostrado mais eficaz e precisa ao realizar diagnósticos. Já a técnica de *iFRA* ressurgiu do esquecimento há pouco tempo, tendo seu uso associado a aplicações de monitoração online.

A ênfase deste estudo será na técnica *sFRA*. Mas, como o conhecimento real do método e suas possibilidades passa pelo estudo de todos as possíveis formas de aplicação e teste, o estudo da *iFRA* se mostrou tanto prazeroso quanto recompensador, somando uma nova visão do mesmo fenômeno.

Uma comparação rápida das duas técnicas pode ser realizada através de uma simples explicação: A técnica *sFRA* é baseada em uma análise no domínio da frequência e a *iFRA* é baseada em uma análise no domínio do tempo, que posteriormente pode ser transformada em parâmetros de frequência através de um tratamento baseado na Transformada de Fourier conforme mostra a Tabela 1

Tabela 1: Uso típico dos métodos

Técnica	Domínio	Uso Típico
<i>iFRA</i>	Tempo	Online
<i>sFRA</i>	Frequência	Offline

Portanto, a *sFRA* é uma técnica de ensaio cuja medição é direta, não necessitando de um pós-processamento, ao contrário da *iFRA*, que tem como grande apelo a possibilidade de aplicação online.

A Tabela 2 exemplifica tempos médios de testes para cada uma das técnicas

Tabela 2: Comparativo dos tempos de teste e processamento

Técnica	Tempo médio de teste	Tempo médio de processamento
<i>iFRA</i>	microssegundos	segundos
<i>sFRA</i>	minutos	microssegundos

Durante toda esta dissertação serão tratadas dificuldades e particularidades de cada uma destas técnicas, especialmente da *sFRA*.

No capítulo 2, A Análise da Resposta em Frequência, serão tratados mais a fundo estes conceitos, que brevemente foram aqui apresentados.

2

A ANÁLISE DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA NO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

2.1 O que é FRA

A Análise da Resposta em Frequência representa um conjunto relativamente amplo de métodos e aplicações que buscam descrever o comportamento de transformadores de potência no domínio da frequência. É reconhecida como uma ferramenta poderosa, útil e ao mesmo tempo promissora para a detecção de faltas específicas já ocorridas ou ainda incipientes.

Tais faltas incluem deslocamentos em enrolamentos devido ao transporte, forças magnéticas oriundas da circulação de correntes de curto-circuito ou ainda a perda ou afrouxamento das estruturas de sustentação e isolamento. Incluem ainda faltas elétricas, como curto-circuito entre espiras, perdas na isolamento ou falhas de contato, além de deslocamentos mecânicos de

núcleo [2]. Atualmente, com o aumento da sensibilidade dos ensaios e, principalmente, com a extensão do limite de medição em altas freqüências [3], temos estudos que mostram a possibilidade de detecção de outros tipos de variáveis do transformador, como a umidade do papel isolante [4], avaliação do estado geral da isolação [5], diagnósticos muito precisos de problemas no núcleo, como deslocamentos mecânicos dos enrolamentos e deformidades geométricas do pacote magnético [6].

A teoria na qual se baseiam os ensaios de FRA é fundamentada no fato de que a impedância de qualquer rede complexa RLC, ou inversamente, sua admitância, é variante com a freqüência de excitação. Além disso, mudanças ocorridas em elementos dessa rede refletem mudanças nas respostas obtidas para as mais diferentes freqüências.

Qualquer transformador de potência pode ser representado por seu circuito equivalente na forma de uma rede complexa de impedâncias, constituída de resistências, capacitâncias e indutâncias em série e paralelo, ou seja, uma rede RLC. Tal modelagem tem a vantagem de permitir a associação de parâmetros elétricos a grandezas físicas do transformador, como por exemplo, capacitâncias e espaçamento entre condutores [7] [8]. A Figura 1 ilustra um exemplo de modelagem de enrolamentos através de uma rede RLC, onde se podem observar os vários elementos constituintes, entre resistores ideais, indutores e capacitores, formando um modelo bastante realista:

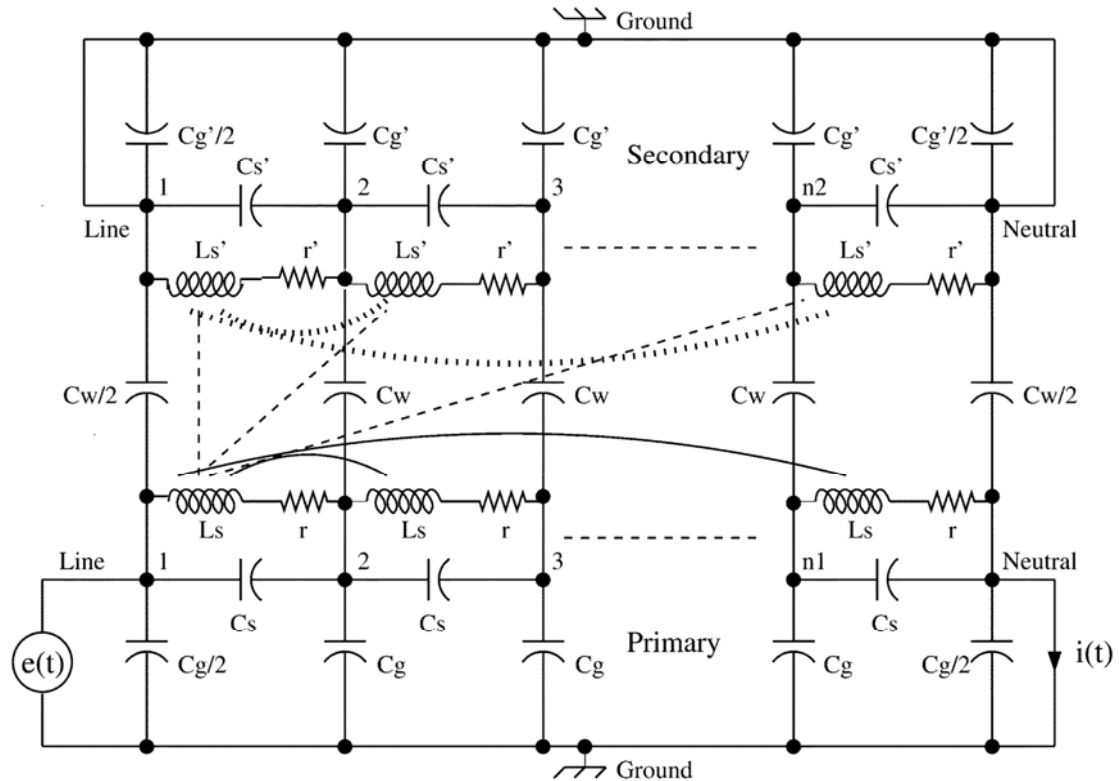


Figura 1: Exemplo de modelo em rede RLC para um enrolamento de transformador [7]

Os valores dos componentes que constituem o modelo do transformador são funções da geometria e de parâmetros elétricos de funcionamento, além de propriedades elétricas do sistema de isolamento. Toda mudança em tais valores pode ser passível de detecção através de desvios nas curvas de resposta em frequência.

Esta detecção é feita baseada no fato de que tanto o capacitor quanto o indutor têm seus valores de capacitância e indutância proporcionais a certas dimensões físicas.

No caso do capacitor temos que, conforme a Figura 2, a capacitância (C) é dependente da área das placas condutoras (A), da distância entre elas (d) e do meio dielétrico que preenche esta distância (ϵ), situando-se entre as duas placas.

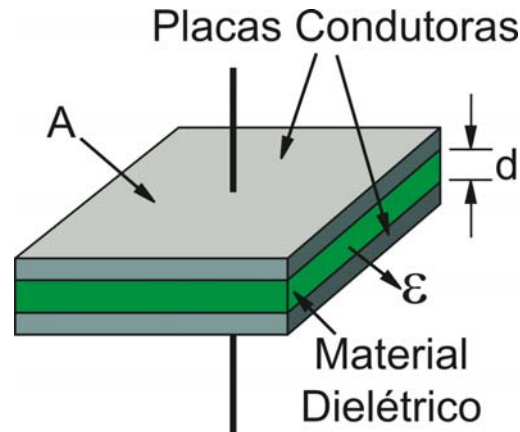


Figura 2: Arranjo físico de um capacitor

Matematicamente estas grandezas se relacionam conforme descrito abaixo, onde Q é a carga acumulada nas placas do capacitor, \mathcal{E} é o campo elétrico entre as placas (infinitas), V é a tensão observada nestas placas, ρ é a densidade superficial de carga e z é a superfície integrada.:

$$V = \int_0^d \mathcal{E} dz = \int_0^d \frac{\rho}{\epsilon} dz = \frac{\rho d}{\epsilon} = \frac{Qd}{\epsilon A} \quad \text{(Equação 1)}$$

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad \text{(Equação 2)}$$

$$C = \frac{Q}{V} \quad \text{(Equação 3)}$$

Já no caso do indutor, conforme nos mostra a Figura 3, a indutância é diretamente relacionada ao número de espiras, a área da secção transversal desta espira¹, o comprimento do conjunto de espiras que é percorrida pela mesma corrente e também pela permeabilidade magnética do meio que envolve o indutor.

¹ A rigor, esta área é a área que o fluxo magnético gerado pelo indutor concatena.

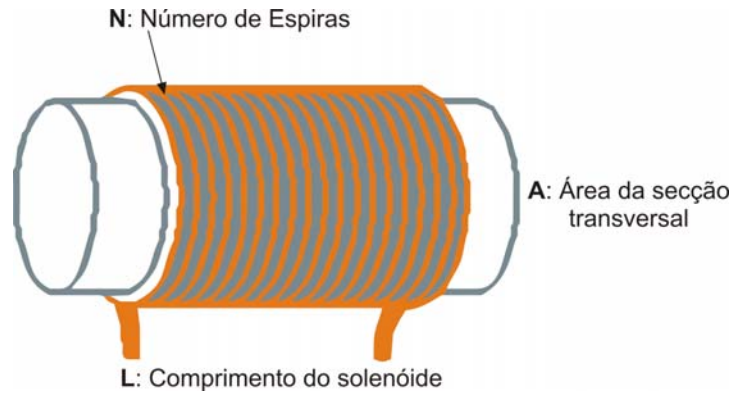


Figura 3: Arranjo físico de um indutor

A equação da indutância de um indutor cilíndrico é dada pela equação abaixo, onde L é a indutância, N é o número de espiras, μ é a permeabilidade magnética, A é a área transversal e l é o comprimento da bobina:

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad \text{(Equação 4)}$$

A resposta em freqüência é uma função complexa composta de módulo e ângulo de fase para cada freqüência. Um exemplo de resposta em freqüência para um enrolamento de um transformador trifásico de potência 3kVA é mostrado na Figura 4, resultado de ensaios realizados em laboratório ao longo da pesquisa. Nesta figura, percebe-se a presença de vários picos de ressonância em diferentes freqüências.

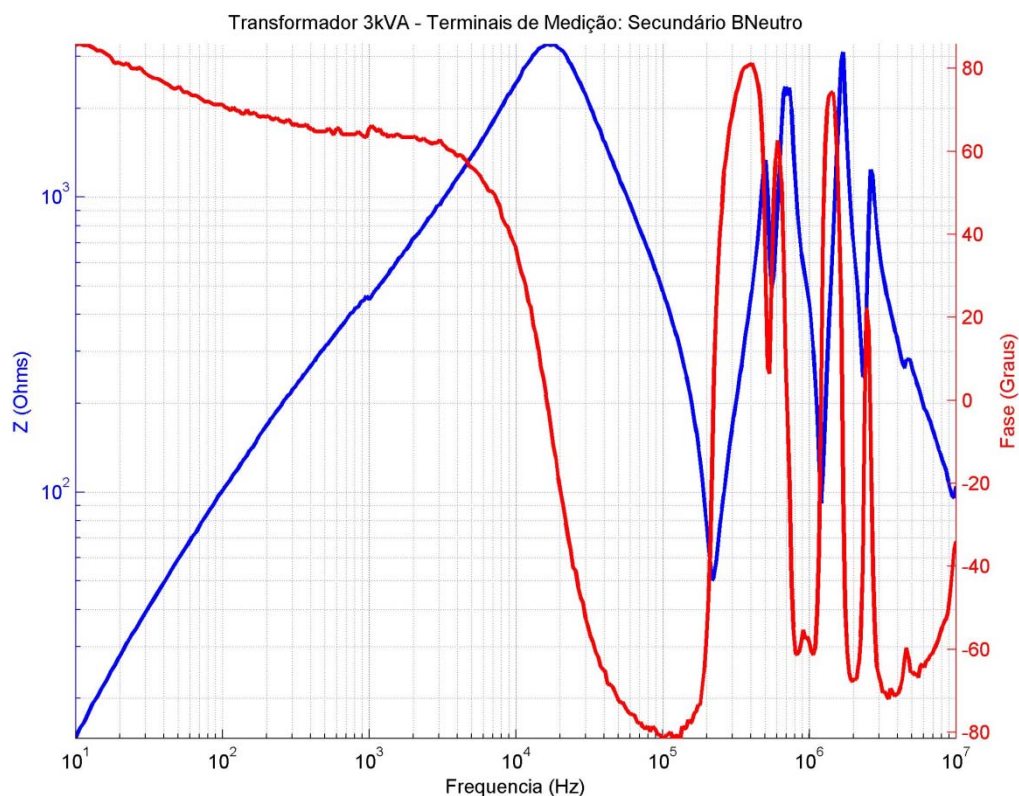


Figura 4: Exemplo de curva de Resposta em Freqüência

Deslocamentos de núcleo ou enrolamentos dentro do transformador resultarão em mudanças nos valores de indutâncias e capacitâncias do circuito equivalente, conforme visto anteriormente, correspondendo a deslocamentos nas curvas de resposta em freqüência [9].

Os picos da curva de resposta em freqüência mostrados na Figura 4 representam freqüências de ressonância internas ao enrolamento e podem, dependendo da severidade das alterações mecânicas sofridas pelo enrolamento, variar sua freqüência, amplitude ou mesmo surgirem ou desaparecerem. Mesmo mudanças sutis podem ter um impacto expressivo sobre as curvas de medição, especialmente em freqüências superiores, já que

esta técnica age como uma “lupa”, acentuando as características dos parâmetros RLC do transformador.

Baseando-se em tais considerações fundamentais de ordem física, além de experiências práticas de campo, um ensaio de FRA, realizado criteriosamente e segundo metodologias consolidadas, pode ser considerado como a ferramenta mais sensível até o momento para a detecção de deslocamentos mecânicos de núcleo ou enrolamentos em transformadores de potência [9]. Novas aplicações têm surgido, em pesquisas recentes [4].

Assim como em todo diagnóstico, a escolha da técnica correta de teste é talvez a parte mais importante na elaboração de um plano eficaz de ensaio. Isto significa que, às vezes, o emprego do FRA sozinho pode não ser a melhor estratégia. Os diagnósticos mais eficazes geralmente são aqueles onde o especialista faz uso de toda a informação disponível para reconhecer um valor, padrão ou tendência, buscando identificar um possível problema em comum que seja consistente com resultados obtidos por diferentes ensaios.

Graças à sua boa sensibilidade a pequenas mudanças que ocorrem no transformador, FRA pode ser o primeiro ensaio utilizado para identificar de imediato que alguma coisa mudou no transformador, mesmo que resultados obtidos através de outros métodos, a princípio, tenham se mostrados inalterados. Uma vez que os ensaios de FRA indicam para o especialista qual é o potencial problema, outros testes podem ser aplicados com mais cuidado, para dar suporte a um diagnóstico específico. Nesse ponto, os resultados de FRA podem ser combinados a análises provenientes de resultados históricos

de ensaios de gás dissolvido (DGA), fator de perdas, capacitância, resistência de enrolamento, tanto em corrente contínua (cc) quanto a 60 Hz, elevação de temperatura, rigidez dielétrica, descargas parciais, corrente de excitação e relação de espiras (posição do comutador). Na ausência de outros dados de ensaio, uma inspeção visual pode ser feita na tentativa de se visualizar deslocamentos de espiras ou núcleo, de estruturas de isolamento e sustentação, ou ainda vestígios de danos causados por arcos elétricos internos.

Generalizando, o método de diagnóstico baseado em FRA é uma técnica fundamentada na comparação das medições atuais com resultados obtidos no passado. Os desvios identificados são sempre tomados em relação a um resultado tido como referência. Esta referência pode também ser obtida através da comparação com enrolamentos de mesmas características elétricas e mecânicas no mesmo transformador, ou ainda por comparação entre enrolamentos distintos de transformadores irmãos (mesmo modelo) [10]. Tais resultados de comparação podem revelar desvios significativos indicativos de falta, o que é feito levando-se em conta os prováveis erros de medição e as técnicas de análise disponíveis (índices numéricos ou avaliação de um especialista). A Figura 5 ilustra de forma esquemática o processo de realização de um ensaio em FRA incluindo as etapas de análise e diagnóstico.

O processo consiste de um teste, seguido da comparação analítica entre o teste atual e ensaios anteriores, caso existam. O especialista então emite um diagnóstico, onde o transformador pode ser considerado sem danos ou sugerir a realização de outros ensaios que corroborem uma suspeita vista pelo FRA.

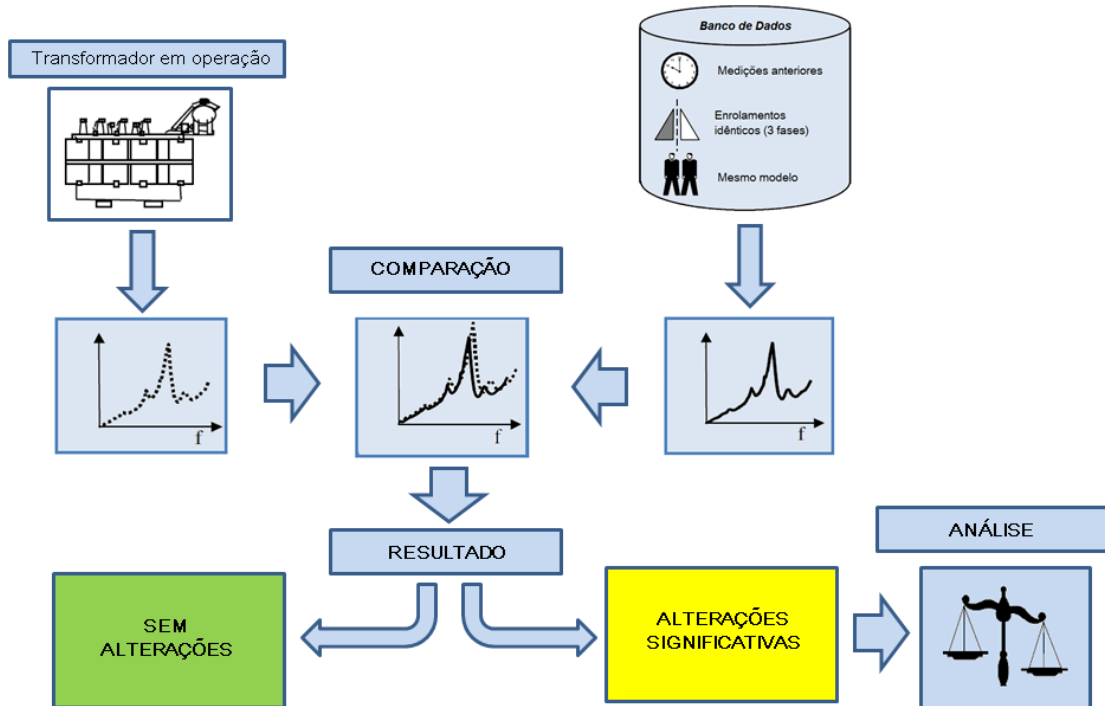


Figura 5: Processo de realização do ensaio de Resposta em Frequência, FRA

2.2 Histórico dos ensaios de FRA

A idéia de se usar a resposta em frequência para a avaliação do estado operativo de transformadores de potência críticos aos sistemas de transmissão e distribuição não é algo novo [1]. O conhecimento de que a impedância (ou admitância) de qualquer rede RLC é dependente da frequência e de seus parâmetros é algo antigo na área de engenharia elétrica de potência. Contudo, a observação de que o comportamento de tal impedância ou admitância no domínio da frequência, para certos equipamentos do setor elétrico de potência, poderia ser usado como ferramenta de avaliação e diagnóstico de condições elétricas, mecânicas e até químicas, é algo mais recente.

Ao longo dos últimos 30 anos muito trabalho foi desenvolvido no campo de FRA na tentativa de primeiro compreender e, posteriormente, utilizar de forma prática o enorme potencial das informações contidas nas curvas de resposta em freqüência de transformadores. Infelizmente, as grandes dimensões físicas dos sistemas envolvidos e do circuito de ensaio em si representam, até hoje, um desafio técnico de grande complexidade na obtenção de resultados com boa repetibilidade, especialmente para altas freqüências.

Medições de Resposta em Freqüência aplicadas a transformadores de potência foram investigadas pela primeira vez com maior detalhamento por *Dick e Erven* no Canadá nos anos 70 [1]. Por razões diversas, seus trabalhos não foram continuados de forma intensiva nos anos que se seguiram.

Nos anos 80, a Central Electricity Generating Board (CEGB), no Reino Unido, se baseou na técnica de diagnóstico via FRA e aplicaram o método em transformadores de transmissão. Na França, simultaneamente foram observados avanços na aplicação da técnica. Tal tendência se espalhou ao longo dos anos 80.

Dos anos 90 em diante, os trabalhos envolvendo a aplicação do método de ensaio em FRA têm ganhado cada vez mais a atenção dos especialistas e companhias do setor e têm se difundido de forma promissora [11] [12] [13] [14].

Diversos avanços, tanto técnicos² quanto teóricos³ foram observados recentemente. Contudo, uma metodologia abrangente, consolidada e padronizada de ensaio e diagnóstico em FRA ainda não foi desenvolvida para a aplicação em sistemas de potência.

2.3 Técnicas Offline e Online

Existem basicamente duas formas distintas de se obter a resposta em freqüência de um transformador. A primeira delas utiliza-se de uma varredura de freqüências, dentro de um intervalo, para medir a resposta do enrolamento no domínio da freqüência, também conhecida como Método de Varredura em freqüência, *sFRA* (do inglês, *Sweep Frequency Response Analysis*). Outra forma de se obter tal caracterização é através da utilização da Transformada Rápida de Fourier (FFT), onde as medições são feitas no domínio do tempo e depois convertidas para o domínio da freqüência. Esta técnica é também conhecida como Método do Impulso, ou *iFRA* (do inglês, *Impulse Frequency Response Analysis*).

2.3.1 O método sFRA

O método de Varredura, ou *sFRA*, realiza medições de módulo e ângulo de fase da impedância para cada freqüência de interesse. O gerador de sinais fornece um sinal senoidal de amplitude constante para uma mesma freqüência, que é aplicado ao enrolamento sob ensaio, no qual são medidas tensões e

² Quanto a técnicos, o termo refere-se a equipamentos de aquisição e metodologia de ensaio.

³ Quanto a teóricos, o termo relaciona-se à metodologia de diagnóstico

correntes. Em geral a amplitude dos sinais aplicados não excede a 15Vpp, indiferentemente da potência nominal do transformador sob teste.

A necessidade de digitalização de sinais a cada freqüência de interesse aplicada é uma característica que faz do ensaio de *sFRA* um pouco mais demorado em relação ao *iFRA*, devido ao próprio tempo de digitalização necessário dos equipamentos de medição. Um ensaio de *sFRA* pode levar até dezenas de minutos para se completar, dependendo de seus parâmetros de configuração, como número de pontos de medição e intervalo de freqüências. O ensaio se executará mais rapidamente em freqüências mais altas, e terá uma lentidão maior para o início do intervalo de medição.

A técnica de *sFRA* possui uma característica que se bem utilizada favorece muito a sua imunidade a ruídos. Esta característica é a possibilidade de estabelecer-se faixas de passagem para a medição. A faixa de passagem é definida como sendo a freqüência aplicada, mais ou menos uma tolerância, compondo assim uma janela de medição em freqüência, atuando como um filtro passa-faixas que previne a medição de demais freqüências e também de ruído.

Se realizado utilizando-se a característica de “janelas de medição”, os ensaios de *sFRA* obtém uma imunidade a ruídos muitas vezes maior do que o *iFRA*.

2.3.2 O método iFRA

O teste de impulso é realizado através da aplicação de um sinal de impulso com tempos de subida e descida predeterminados. Um impulso típico pode ter um pico de amplitude de 200 ~ 300 v com um tempo de subida menor que 200 ns e uma duração de menos de 20 us. Ambos os sinais de entrada e saída são registrados, e a FFT é então aplicada a ambos os resultados e as componentes discretas de freqüência são extraídas e comparadas. As relações de amplitude e fase são determinadas para cada ponto de comparação.

A principal vantagem do método de medição em iFRA é o tempo necessário para a aquisição e processamento dos sinais envolvidos. O processo de aquisição pode levar menos de 100ms para se completar e o processamento através da FFT pode ser extremamente rápido nos processadores atuais [15].

Limitações quanto à taxa de amostragem são um ponto negativo desta técnica. Uma taxa de amostragem fixa permite que as amostras fiquem igualmente espaçadas no tempo. Entretanto, no domínio da freqüência isso faz com que as freqüências menores à taxa de amostragem fiquem super amostradas e as maiores fiquem sub-amostradas. Como a faixa de medição é extensa, a escolha de uma freqüência única é impraticável, e ao mesmo tempo uma taxa dinâmica de amostragem é inviável devido a curta duração do sinal aplicado. Além disso, a limitação da sensibilidade do conversor A/D para a faixa de valores possíveis de impedância (de miliohms a quiloohms) torna o resultado impreciso para determinados valores medidos.

Temos também os problemas relacionados a ruídos que são mais freqüentes nesta técnica que no *sFRA*, uma vez que se é impossível realizar a filtragem do sinal medido, já que o ruído possui as mesmas características do sinal aplicado no domínio da freqüência

As altas taxas de variação de tensão inerentes ao ensaio são também responsáveis pelo estabelecimento de tensões potencialmente elevadas no decorrer do ensaio, o que pode configurar uma condição de risco à integridade física dos executores do procedimento, aumentando a classe de risco do ensaio.

A distinção entre as técnicas de *sFRA* e *iFRA*, além de suas características fundamentais citadas, é feita também pela filosofia de ensaio. Enquanto o *sFRA* é uma técnica de medição offline, necessitando que o transformador sob ensaio seja completamente desconectado do sistema e preparado para teste, o *iFRA* é uma técnica que permite sua realização online, isto é, com o equipamento energizado. Tal aplicação constitui o principal interesse no método, uma vez que reduz os custos associados ao ensaio. Contudo, assim como no caso do *sFRA*, diversos avanços ainda devem ser feitos para que o método seja aplicável e seus problemas de aplicação resolvidos.

Embora haja a distinção dos termos *sFRA* e *iFRA* em Resposta em Freqüência, é comum se observar na literatura o uso do termo *FRA* para designar a aplicação do Método da Varredura, ou *sFRA*. Isso será feito ao

longo deste texto, e o termo *sFRA* será empregado somente nos casos em que existir a necessidade de distinção.

A Figura 6 ilustra, de forma comparativa, os processos de obtenção da resposta em frequência de transformadores através de *sFRA* e de *iFRA*.

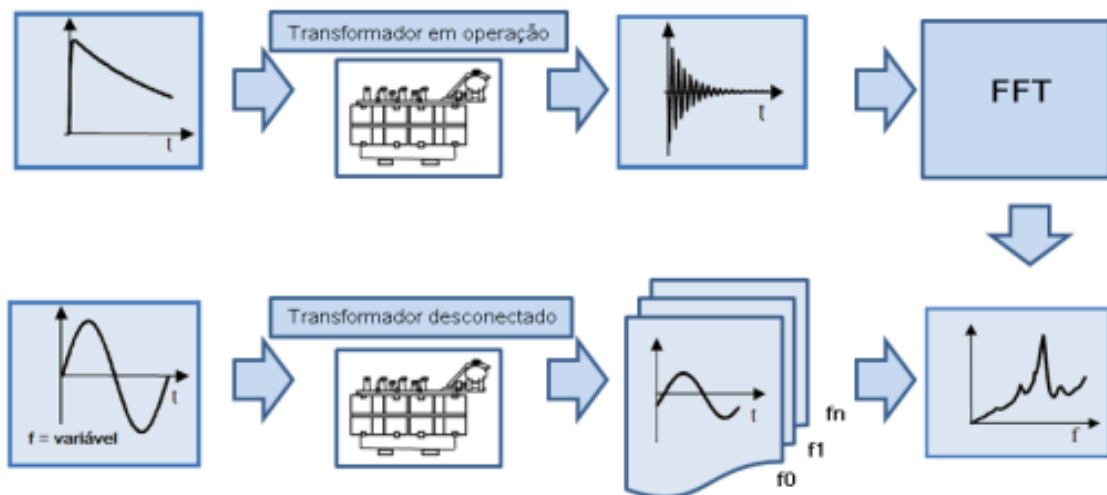


Figura 6: Sequência de passos para realização de *iFRA* (acima) e *sFRA* (abaixo)

2.4 Desafios práticos e teóricos identificados

Conforme discutido nos itens precedentes, o método de diagnóstico de transformadores via FRA é ainda alvo de muitas investigações por parte de pesquisadores e profissionais do setor elétrico do mundo todo. Apesar existir há mais de 30 anos, diversas questões de ordem prática e teórica influenciam a aplicabilidade do método de forma generalizada e prática, tal que possa ser utilizado em campo.

Tais desafios são, de certa maneira, inerentes ao método. Por exemplo, a necessidade de uma análise visual e subjetiva das curvas resultantes da

medição é ainda um fator importante no modo de diagnóstico. Apesar de alguns índices numéricos terem sido sugeridos para utilização nos resultados de ensaios de FRA, nota-se ainda que o papel do especialista seja decisivo na análise. Além disso, dificuldades referentes à repetibilidade dos resultados tornam o método difícil de ser aplicado fora do laboratório, principalmente devido a interferências externas.

A bibliografia atual sobre o assunto fornece, em sua maioria, pouco detalhamento acerca de questões de ordem prática que podem ter impacto relevante sobre os resultados de medição, tais como a forma de distribuição e o número de pontos amostrados durante os ensaios de *sFRA*. Além disso, nota-se a necessidade de um projeto cuidadoso dos sistemas de medição e aquisição para que possam trabalhar em altas freqüências sem distorções na forma de onda, ou aberrações de amplitude ou fase, ou seja, sem que interfiram nas medições.

Tais cuidados incluem o correto projeto dos sistemas de conexão entre os instrumentos e o transformador, uma vez que em freqüências elevadas, os cabos de ligação podem ter influência significativa sobre os resultados. Além disso, a determinação da melhor topologia de medição, incluindo os circuitos de aquisição de sinais, representa papel decisivo tanto na sensibilidade quanto na exatidão do equipamento de *sFRA*, e merece atenção especial.

Ao longo do Capítulo 5 – Estudos de Procedimentos de Medição em FRA, diversas questões de ordem prática acerca dos procedimentos de medição em FRA serão abordadas e seus efeitos discutidos, na tentativa de se

estabelecer uma metodologia de ensaio única e consolidada, tal que possa suportar ensaios práticos como os que são desenvolvidos no Capítulo 6 – Estudos de Caso.

Este capítulo buscou fornecer um panorama geral sobre o que é o ensaio de FRA, suas potencialidades e dificuldades, além de terem sido apresentadas as versões *offline* e *online* de aplicação do método. Adicionalmente, um breve histórico sobre o tema foi apresentado.

No próximo capítulo serão apresentados os aspectos construtivos relacionados aos transformadores de potência, além de características físicas e elétricas de operação, cuja análise se mostra interessante para fins de aplicação do método de diagnóstico via FRA.

3

CONHECENDO O TRANSFORMADOR

3.1 Introdução

O transformador forma a base de todo o sistema de geração, transmissão e distribuição de energia em corrente alternada. Ele nos torna capazes de utilizar diferentes níveis de tensão ao longo do sistema. Desta forma podemos optar pela tensão mais viável técnica e economicamente. Os transformadores são empregados para as mais variadas aplicações, desde simples alterações na amplitude da tensão até a complexa regulação do ângulo de fase.

A geração de energia nos geradores síncronos é normalmente realizada em tensões abaixo dos 34,5 kV. A razão disto é que para máquinas girantes, níveis de tensão mais elevados resultariam em um custo alto de engenharia e materiais. Mas estas tensões não são adequadas para transmitir grandes quantidades de energia. Elevar a tensão gerada nos geradores para alta, extra-alta ou até mesmo para ultra-alta tensão é a maneira de atender aos requisitos básicos de transmissão, que são a diminuição das perdas e o aumento da capacidade das linhas. Na Figura 7: O Sistema Elétrico de Potência Figura 7 é

mostrado um sistema elétrico de potência modelo, onde as diversas relações de geração, transmissão e consumo são apresentadas.

Podemos notar que a tensão de saída do gerador é de 13,8 kV. Então ela é elevada para 500 kV e depois transmitida em longas distâncias. Esta energia é levada até as subestações de transmissão e distribuição onde começa a ser distribuída. A tensão é abaixada para 138 kV para suprir quantidades menores e mais localizadas de carga. Posteriormente é rebaixada para 13,8 kV que é o nível de distribuição primário e então, mais perto do consumidor final, é abaixada para níveis secundários de distribuição

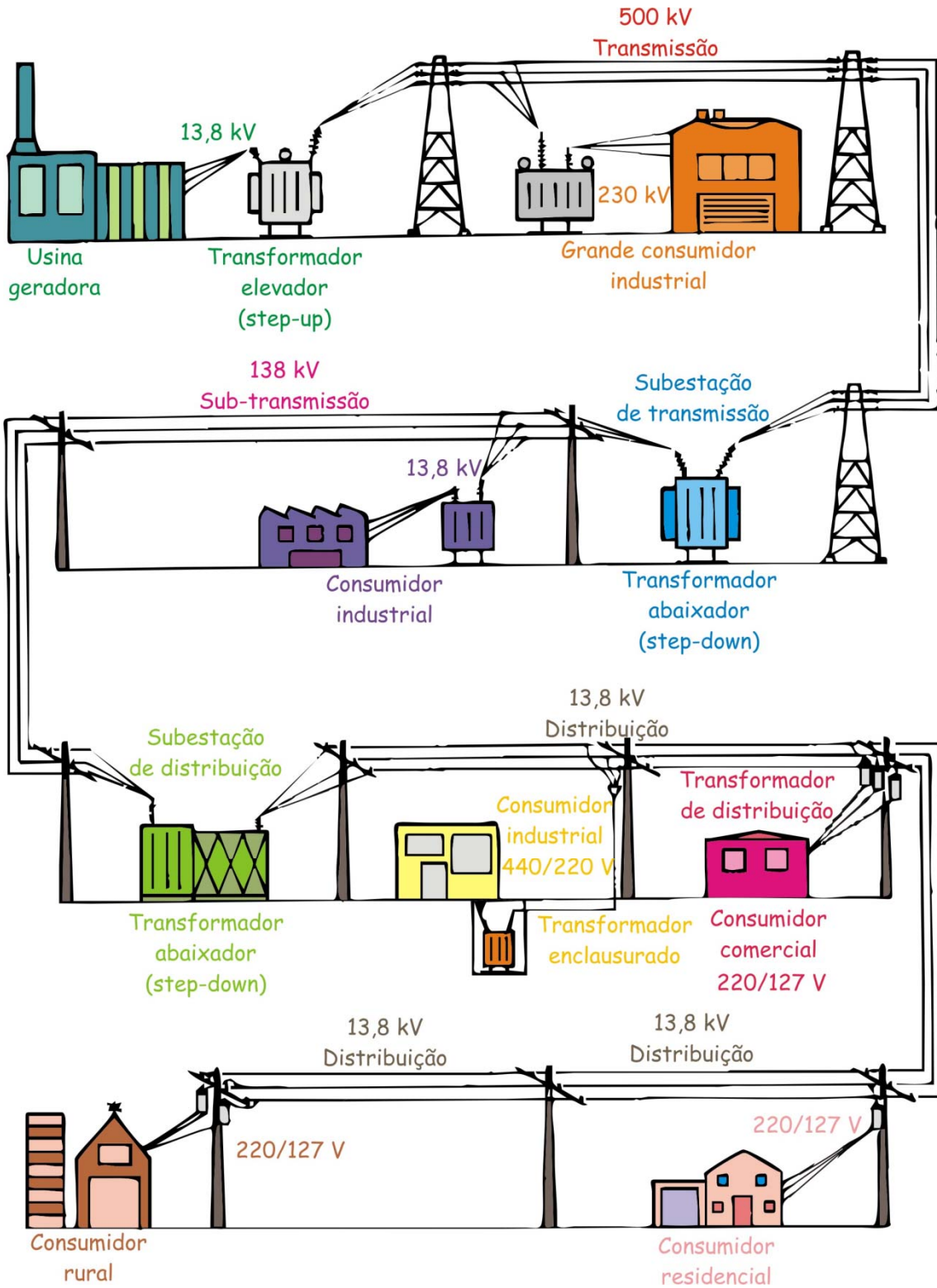


Figura 7: O Sistema Elétrico de Potência

Na Figura 8 é mostrado um diagrama em escada que sintetiza as elevações e abaixamentos de tensão que a energia sofre ao longo de todo o processo.

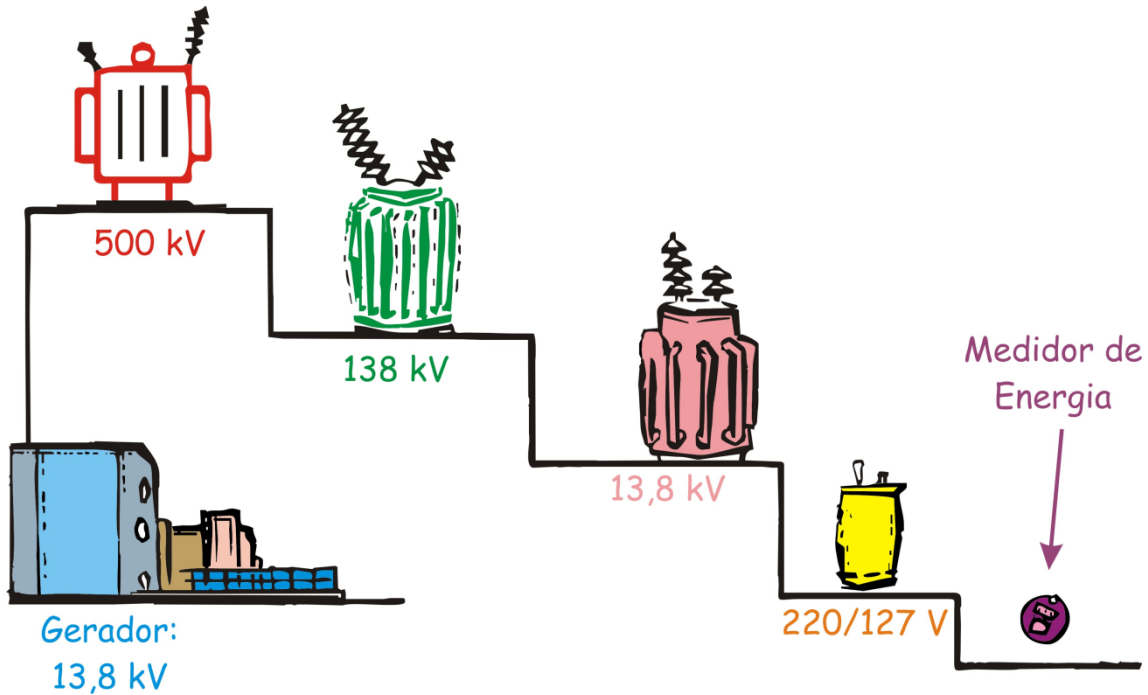


Figura 8: Diagrama das elevações e abaixamentos de tensão

Os níveis típicos de tensão dos sistemas de geração, transmissão, sub-transmissão, distribuição primária e secundária são apresentados na Tabela 3. A Tabela 4 apresenta a classificação dos níveis de tensão.

Tabela 3: Tensões típicas do sistema elétrico

Categorias	Tensões
Geração	440 V; 2,3 kV; 4,4 kV; 6,9 kV; 12 kV; 13,8 kV; 24 kV
Transmissão	138 kV; 169 kV; 230 kV; 345 kV; 440 kV; 500 kV; 765 kV; 1100 kV; 600 kV
Sub-Transmissão	34,5 kV; 69 kV; 88 kV; 138 kV; 169 kV; 230 kV
Distribuição Primária	6,9 kV; 11,9 kV; 13,8 kV; 23,1 kV; 34,5 kV
Distribuição Secundária	110 V; 127 V; 220 V; 380 V; 440 V; 2,3 kV; 4,4 kV; 6,9 kV

Tabela 4: Classificação dos níveis de tensão

Baixa Tensão	Média Tensão	Alta Tensão	Extra Alta Tensão	Ultra Alta Tensão
$V < 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V < 36 \text{ kV}$	$36 \text{ kV} < V < 345 \text{ kV}$	$345 \text{ kV} < V < 1,1 \text{ MV}$	$1,1 \text{ MV} < V$

3.2 A definição do transformador

Definido de uma maneira simples, o transformador é um dispositivo que une magneticamente dois ou mais circuitos onde a corrente e a tensão variam no tempo. Sua forma de ligação apresenta algumas vantagens como:

- Isolamento cc entre os circuitos;
- Compatibilizar a capacidade de tensão e corrente entre a fonte e a carga;
- Alterar a magnitude e a fase da tensão e da corrente entre os circuitos.

O transformador é formalmente definido como *"Um dispositivo estático consistindo de um ou mais enrolamentos, com ou sem um núcleo magnético, com o objetivo de induzir um acoplamento entre diferentes circuitos. Transformadores são exclusivamente utilizados em um sistema elétrico para transferir potência pelo princípio da indução eletromagnética entre circuitos operando a uma mesma frequência, usualmente alterando as grandezas tensão e corrente entre seus enrolamentos."*¹

3.2.1 A classificação do transformador

Os transformadores podem ser classificados em diversos tipos, conforme descrito na Tabela 5.

¹ Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, IEEE Std. 100-1972

Tabela 5: Classificação básica dos transformadores

Tipo de Transformador	Descrição
Transformadores de potência (Força)	Transformadores utilizados entre os circuitos de geração e distribuição e tem potência normalmente superior a 500 kVA [16].
Transformadores de distribuição	Transformadores utilizados nos circuitos de distribuição, tendo normalmente potência de até 5 MVA.
Transformadores defasadores	Transformadores que alteram a fase da onda de tensão ou corrente entre os seus enrolamentos. São prioritariamente utilizados para controlar o fluxo de potência ativa entre dois sistemas.
Transformadores conversores² (retificadores e inversores)	Transformador que tenha um de seus enrolamentos diretamente conectado a um circuito conversor seja ele retificador ou inversor, de forma dedicada.
Transformadores secos	Transformadores que tem como meio isolante entre seus enrolamentos uma substância sólida ou gasosa.
Transformadores de instrumentos	Transformadores utilizados para adequar ou isolar sinais de um circuito primário para um circuito de medição e controle.
Transformadores reguladores	Transformadores cujo principal objetivo é regular a tensão entre seus enrolamentos primários e secundários. Sua relação de transformação é unitária e sua regulação é uma porcentagem acima e abaixo desde valor unitário.
Transformadores de tensão constante (Transformadores Ferro-Ressonantes)	Transformadores utilizados como isoladores de ruídos e contra oscilações transitórias de tensão
Reatores	Transformadores especiais, cujo único objetivo é o fornecimento de reatância indutiva ao sistema.
Transformadores para eletrônica	Transformadores utilizados para aplicações eletrônicas de baixa potência, onde podem trabalhar tanto a altas frequências como também casadores de impedância.
Transformadores Isoladores	Transformadores prioritariamente para aplicações de baixa potência como isoladores de circuitos.
Transformadores elevadores	Transformadores dedicados a elevar a tensão de saída dos geradores das usinas. São conectados diretamente as máquinas, sendo projetados para suportar ciclo de carga constante muito próximo a sua potência nominal.
Transformadores de Tração	Transformadores utilizados em locomotivas. São projetados para suportar muitos impactos mecânicos, serem leves e suportarem uma alta incidência de harmônicos.
Autotransformador	Tipo especial de transformador onde o enrolamento primário tem uma conexão elétrica com o secundário, ou seja, os enrolamentos não são isolados eletricamente.

No âmbito dos sistemas elétricos de potência, os transformadores mais utilizados são os de potência, de distribuição, elevadores, conversores, defasadores e reatores.

Um transformador comercial típico tem uma expectativa de vida variando entre 20 e 40 anos Transformadores baseados em novas tecnologias, como o óleo vegetal e o papel de fibra de aramida apresentam uma expectativa de vida útil superior [17].

² O IEEE se refere a este tipo de transformador como transformador retificador e o IEC como transformador conversor. Adotar-se-á a nomenclatura IEC por ser mais abrangente.

3.3 O princípio de funcionamento do Transformador

Para o correto entendimento do funcionamento das técnicas *FRA*, precisamos conhecer quais fenômenos ocorrem dentro do transformador, maneira como ele é construído e as particularidades de seus arranjos internos.

Os princípios básicos de operação dos transformadores são profundamente enraizados na teoria eletromagnética, independente de ele possuir ou não um núcleo magnético.

Como o objetivo desta dissertação não é discorrer profundamente a respeito destes princípios eletromagnéticos, serão revisados apenas os conceitos relevantes para a compreensão do *FRA*, sendo que os outros deverão ser de prévio conhecimento do leitor.

3.3.1 A indução eletromagnética

Considere um condutor com o tamanho infinitesimal dl , na direção do campo magnético. A densidade de fluxo B é função da corrente no condutor, de acordo com a equação abaixo:

$$\int B \cdot dl = i \times \mu_0 \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde μ_0 é a permeabilidade do vácuo, que é igual a $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}$.

Para um condutor infinitesimal, o caminho de B ao redor do condutor é sempre circular, então à distância r do centro do condutor a integral anterior é reduzida para:

$$\int B \cdot dl = B \times 2\pi r \quad \text{(Equação 6)}$$

A Figura 9 mostra este fenômeno de forma esquemática:

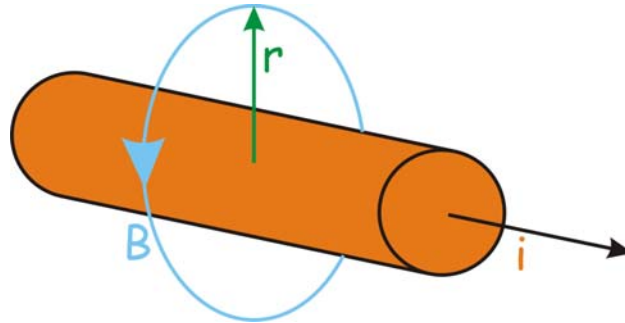


Figura 9: Campo B envolvendo um condutor cilíndrico percorrido por uma corrente i , a uma distância r

No entanto, a intensidade do campo magnético é inversamente proporcional à distância do centro do condutor, da seguinte forma:

$$B = i \times \frac{\mu_0}{2\pi r} \quad \text{(Equação 7)}$$

Para um caminho fechado no campo magnético, o fluxo total ϕ é encontrado pela integração da superfície incremental de área dA vezes a componente normal unitária à intensidade do campo magnético B na superfície criada pelo caminho fechado.

$$\phi = \int B \cdot dA \quad \text{(Equação 8)}$$

Chegamos ao primeiro princípio do transformador. Se o fluxo magnético total está variando no tempo, existirá uma tensão induzida E entre duas extremidades do caminho fechado atravessado pelo fluxo variante. O valor de E em volts é igual a:

$$E = -\frac{d\phi}{dt} \quad \text{(Equação 9)}$$

Onde a direção de E segue a regra da mão direita.

A Figura 10 ilustra este princípio da indução eletromagnética. Se a magnitude de B está decrescendo, $\frac{d\phi}{dt}$ será no sentido decrescente e E estará no sentido horário na regra da mão direita no caminho fechado que engloba ϕ .

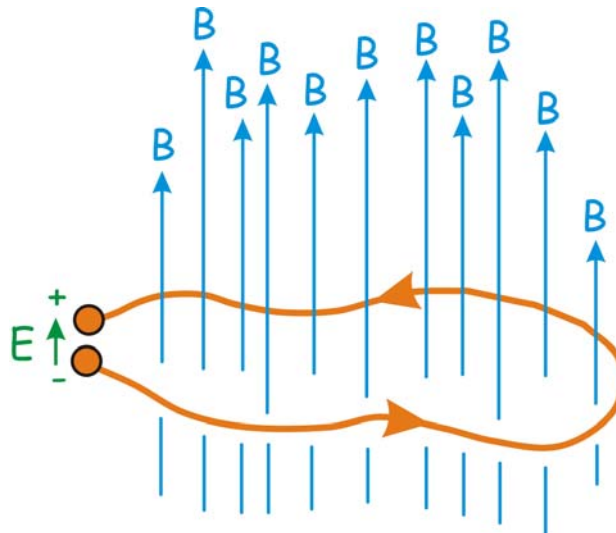


Figura 10: Tensão induzida em um laço condutor que envolve um campo B

Tendo como base os aspectos da indução eletromagnética anteriormente discutidos, não é difícil extrapolar e imaginar um transformador rudimentar, conforme mostrado na Figura 11.

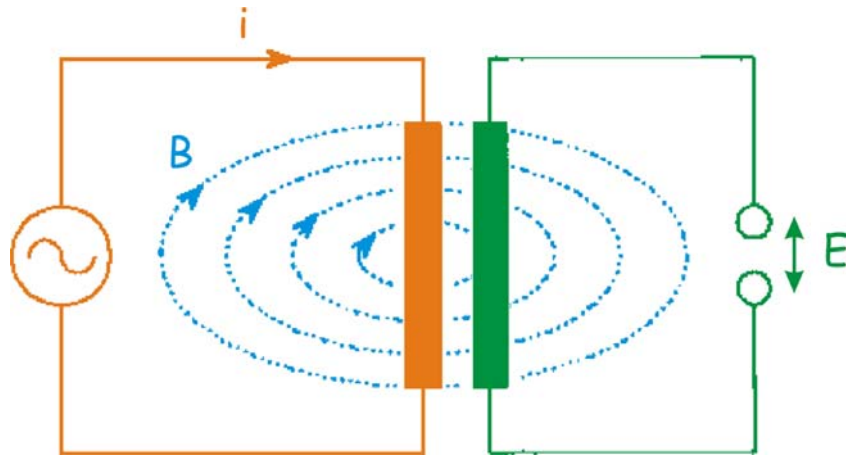


Figura 11: Transformador rudimentar

Se um condutor carregando uma corrente variável no tempo e colocado próximo de um segundo condutor, logo o campo variante originado do primeiro atravessará a superfície delimitada pelo segundo e uma tensão será induzida neste.

Michael Faraday habilmente demonstrou, através de seu conceito de linhas de força descrevendo a intensidade e a direção do campo magnético, que linhas de força são geradas por uma bobina. A densidade destas linhas é proporcional ao número de voltas - espiras - da bobina. Quando uma segunda bobina é colocada na área de influência do campo gerado pela primeira bobina uma tensão é induzida nela. O valor da tensão induzida é proporcional à taxa de variação e à densidade de fluxo do campo indutor que atravessa a bobina e também é proporcional ao número de espiras da bobina que são atravessadas por ele, como representado na Figura 12.

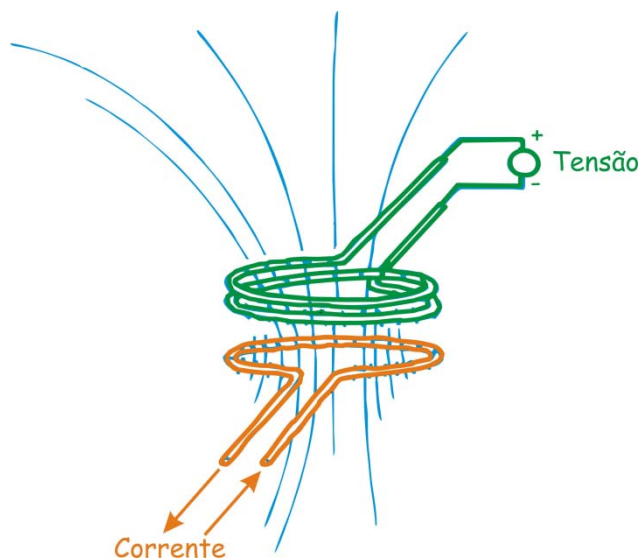


Figura 12: Representação do fenômeno da indução

Os fenômenos simultâneos da indução mútua entre bobinas e da auto-indução em cada bobina formam a base desta ação transformadora.

Auto-indução: *Ocorre quando uma corrente num condutor, variável no tempo, induz uma tensão no próprio condutor, que se opõe à tensão externa que provoca a corrente original.*

Indução mútua: *Ocorre quando se induz uma tensão em um condutor pela ação de um fluxo magnético variável originário de um condutor diferente.*

Para um transformador funcionar de forma eficiente, ele deve ter uma forte indução mútua ou acoplamento entre os enrolamentos e uma grande auto-indução. Desta forma estamos assegurando que todas as linhas de força envolvidas pelo primário serão também envolvidas pelo secundário e o número de linhas de força produzidas por certa taxa de variação de corrente na mesma bobina é elevado.

Temos que duas bobinas acopladas magneticamente e tendo o ar como meio físico entre as duas são muito ineficientes porque o fluxo resultante da primeira bobina que atravessa a segunda é somente uma pequena fração do original. Existe uma grande dispersão do fluxo magnético.

Uma importante propriedade física dos materiais é a sua permeabilidade magnética μ . A permeabilidade magnética do vácuo é chamada de μ_0 .

A permeabilidade relativa do meio é a razão entre a permeabilidade do meio dividida pela permeabilidade do vácuo. A razão entre a densidade de fluxo B e a intensidade de campo H é igual à permeabilidade do meio.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{B}{H} \quad \text{(Equação 10)}$$

Para aumentar a indução mútua e a auto-indução das bobinas, o campo magnético precisa ser canalizado para que a maioria do fluxo produzido no primário seja concatenada pelo secundário. Isso seria possível somente se as duas bobinas com um material que tivesse o maior μ_r possível. Daí surgiu o núcleo de material ferromagnético. Adicionando um material ferromagnético essencialmente todo o fluxo magnético produzido no primário é concatenado no secundário. Então, a eficiência do transformador é aumentada. Temos na Tabela 6 exemplos de μ_r de vários materiais.

Tabela 6: Permeabilidade relativa de diversas substâncias

Material	Elementos	$\mu_r(\max)$	Uso Típico
Ferrite U 60	Fe Cerâmico	8	Antenas UHF
Nickel (99%)	Ni	600	Diversos
Ferrite M33	Fe Cerâmico	750	Circuitos eletrônicos ressonantes, pequenos transformadores, Antenas de AM e FM
Ferrite N41	Fe Cerâmico	3000	Núcleo de indutores de média potência.
Ferro (99.8%)	Fe	5000	Diversos
Permendur	Fe, Co	6000	Núcleos Magnéticos
Ferrite T38	Fe Cerâmico	10000	Transformadores de amplo espectro.
Hiperco	Fe, Co, Cr	10000	Núcleos de motores, geradores, pólos magnéticos, relés e cabeças magnéticas
Ferro-Silício	Fe, Si	40000	Dínamos, Transformadores de potência, Blindagens magnéticas
Supermendur	Fe, Co, V	60000	Núcleo de Transformadores de Potencia e distribuição, Blindagens magnéticas.
Hipernik	Ni, Fe	70000	Núcleos magnéticos laminados para transformadores de potência.
Mu metal	Ni, Fe, Cu, Cr	100000	Cabeças magnéticas de gravação. Núcleos magnéticos de alta eficiência. Blindagens Magnéticas
79 Permaloy	Ni, Fe, Mo	200000	Cabeças magnéticas de gravação. Núcleos magnéticos de alta eficiência. Blindagens Magnéticas
Supermalloy	Ni, Fe, Mo	1000000	Cabeças magnéticas de gravação. Núcleos magnéticos de alta eficiência. Blindagens Magnéticas

Até este ponto, assumimos que a permeabilidade do núcleo é constante, ou seja, $B = \mu \times H$ para quaisquer valores de intensidade de campo e densidade de fluxo. Mas os materiais têm um comportamento muito mais complicado que este.

A curva $B \times H$ é uma curva fechada, que tem sua direção positiva no sentido anti-horário em cada ciclo. Para um fluxo variante no tempo, a curva $B \times H$ depende da magnitude da densidade de fluxo e da frequência de variação.

Se uma corrente alternada é imposta ao elemento ferromagnético, o comportamento da sua magnetização $B \times H$ pode ser representado por uma curva chamada curva de histerese. O espaço entre os traços de magnetização causados pela corrente alternada é chamado histerese, e está relacionado com a existência de domínios magnéticos no material. Uma vez que estes domínios estejam orientados, eles consomem alguma energia para serem reorientados.

Esta propriedade é útil em memórias magnéticas, mas é extremamente indesejável nos transformadores de potência.

O mecanismo da histerese é mostrado na Figura 13. É válido lembrar que o tempo é uma variável implícita neste processo, de forma similar à frequência em uma representação fasorial. Antes de explicar a figura, introduzir-se-ão os conceitos de *Remanescência* e *Coercitividade*.

Densidade de fluxo residual (B_R): *É a densidade de fluxo que permanece, mesmo após H ter sido retirado, ou seja, $H = 0$. Este ponto pode ser chamado de Remanescência somente se o campo de magnetização saturante foi atingido. Sua unidade é o Tesla (T).*

Força Coercitiva (H_C): *Representa a intensidade de campo magnético necessário para se obter $B = 0$ (ou seja, eliminar o campo remanente). Pode ser chamado de Coercitividade se o campo de magnetização saturante foi atingido. Sua unidade é o ampere por metro ($\frac{A}{m}$).*

O estado inicial de análise da Figura 13 é com um material sem nenhum tipo de magnetização, a partir da origem, onde tanto a intensidade de campo quanto a densidade de fluxo são zero. Aumentando-se H positivamente temos um aumento de B , representado pela parte vermelha da curva até o ponto A. Este caminho é chamado de *curva inicial de magnetização*. Acima do joelho da curva o fluxo se aproxima da saturação e um pequeno aumento de B demanda um grande aumento de H .

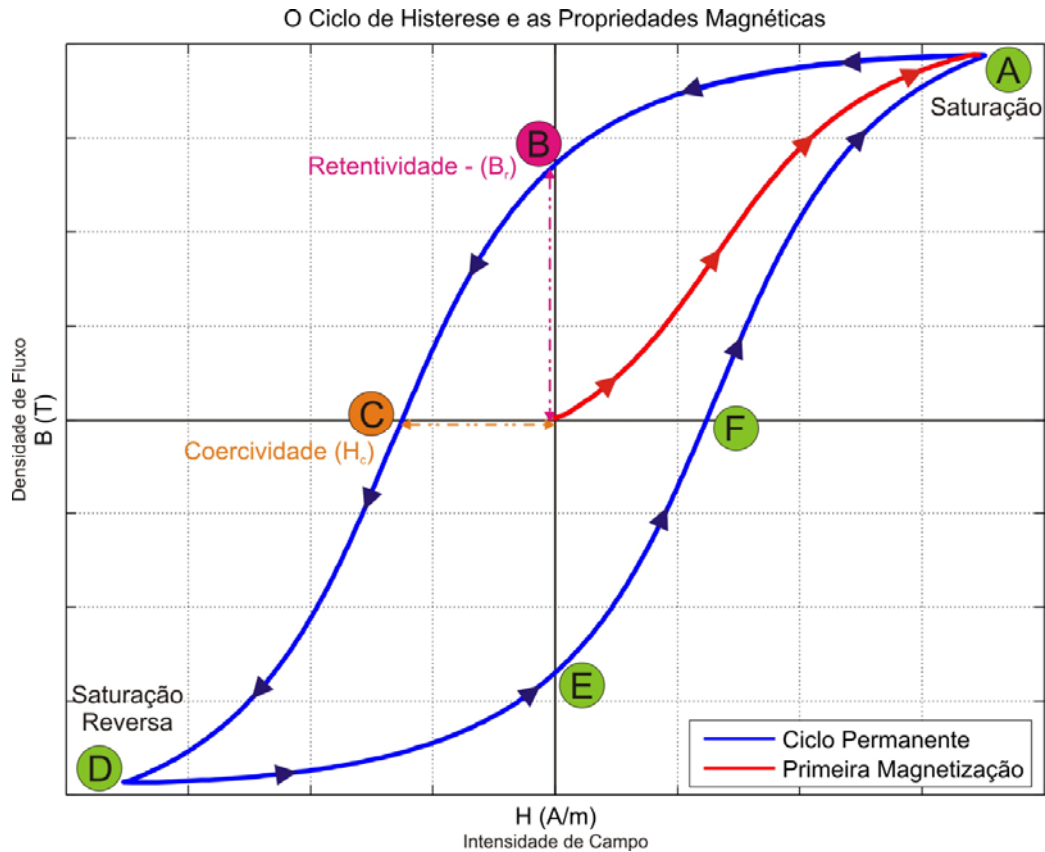


Figura 13: Curva de histerese (Ciclo de histerese)

Quando o núcleo ferromagnético satura, seu comportamento magnético é muito parecido com o núcleo de ar. Em seguida, conforme H decresce até zero, um comportamento curioso ocorre. Ao invés de percorrer o mesmo caminho da curva inicial o fluxo diminui mais lentamente. Quando o campo aplicado chega a zero, ainda existe um fluxo remanescente no ponto B. Este fenômeno é o que torna a magnetização possível. Para forçar o fluxo voltar a zero temos que inverter o campo aplicado até o valor representado por C. Este valor de campo é chamado de coercitivo. Conforme este campo cresce negativamente, o mesmo fenômeno de saturação ocorre. Na medida em que H aumenta retornando a zero, forma o laço de histerese. A área deste laço representa a perda de energia resultante do fenômeno da histerese no núcleo.

Melhoramentos na química, fundição e manufatura do aço resulta em uma área menor do laço de histerese e um Joelho menos pontiagudo se forma. Desta maneira temos uma diminuição da área onde a característica de $B \times H$ se torna não linear e se aproxima do estado saturado. A Figura 14 mostra o comportamento não conservativo deste fenômeno, que mostra claramente este tipo de perda no núcleo.

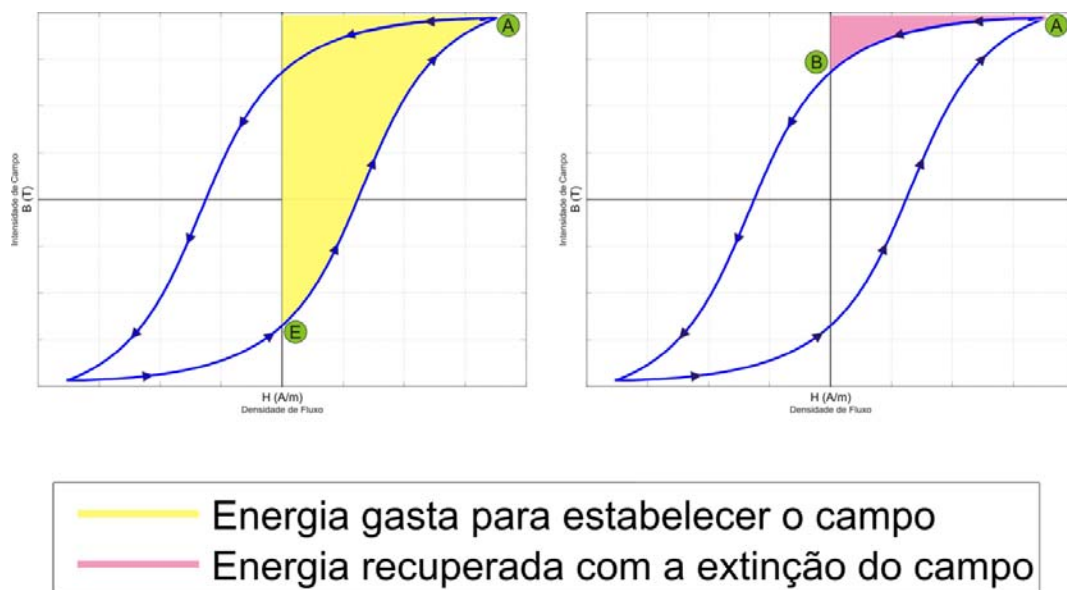


Figura 14: Perdas resultantes da histerese

Podemos observar que a energia necessária para magnetizar o núcleo do ponto E para o ponto A é maior que a energia que é devolvida quando ele retorna do ponto A para o ponto B. Temos então um comportamento não conservativo.

A partir do conceito da histerese, os materiais magnéticos podem ser classificados como materiais magnéticos duros ou macios.

- Macios: *Apresentam um ciclo de histerese estreito (fácil magnetização).*

- Duros: *Apresentam ciclos de histerese largos (difícil magnetização).*

Isso é importante porque a histerese de um material afeta fortemente sua aplicabilidade em uma aplicação em particular. A Figura 15 mostra exemplos destes materiais.

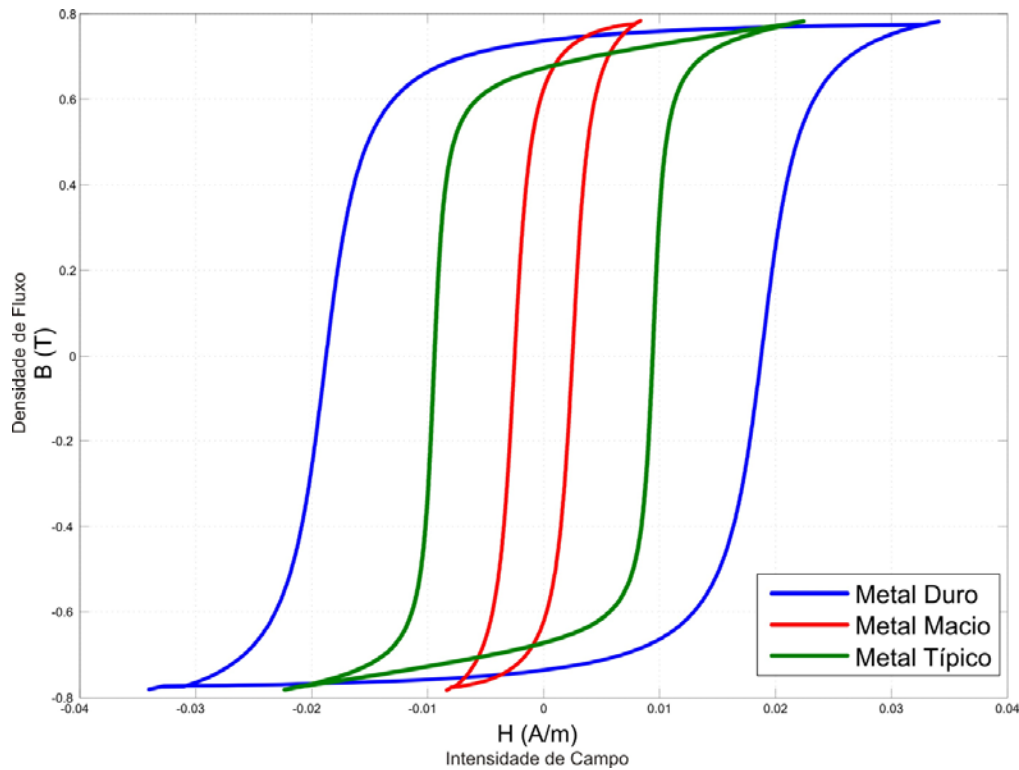


Figura 15: Tipos de Curvas de Histerese

A curva vermelha mostra um material magnético macio, como por exemplo, o ferro silício. A área da sua curva de histerese é pequena, o que o torna ideal para transformadores. A adição de 3% de silício ao ferro reduz das perdas por histerese para um campo aplicado de 1 T de $250 \frac{J}{m^3}$ para 163

$\frac{J}{m^3}$. A curva em azul mostra um material magnético duro, como o *Alnico*, utilizado para magnetos permanentes.³

3.3.2 A curva de histerese e a formação de harmônicos

A curva $B \times H$ pode também ser utilizada para a construção da forma de onda da corrente de magnetização a partir da forma de onda da tensão de excitação. A Figura 16 ilustra graficamente este processo. Como temos uma função linear projetada sobre uma função não linear, temos um resultado não linear. A corrente de magnetização é uma corrente não senoidal.

A análise de Fourier da corrente de magnetização nos mostra a presença de uma frequência fundamental de 60 Hz e seus harmônicos ímpares. Generalizando, temos que o conteúdo harmônico da corrente de magnetização aumenta conforme a excitação aumenta, especialmente se o núcleo está saturado.

³ Uma advertência a respeito dos termos “duro” e “macio”: Muitos autores os usam para denotar apenas que o valor da força coerciva é alto ou baixo. Outros os usam para dizer que o laço de histerese é “largo” ou “estreito”. Isto é ambíguo. Devemos nos referir a H_c ou a razão de $\frac{H_c}{B_R}$? Outros autores dizem que os termos “duro” e “macio” significam que a área do laço de histerese é “grande” ou “pequena”, enquanto outros usam para denotar o valor do campo remanescente. Na prática, altos valores de H_c sempre vem juntos de altos B_R . Então, pensemos sempre em termos de H_c . “Duro” significa H_c acima de $10 \frac{kA}{m}$. “Macio” significa H_c menor que $1 \frac{kA}{m}$.

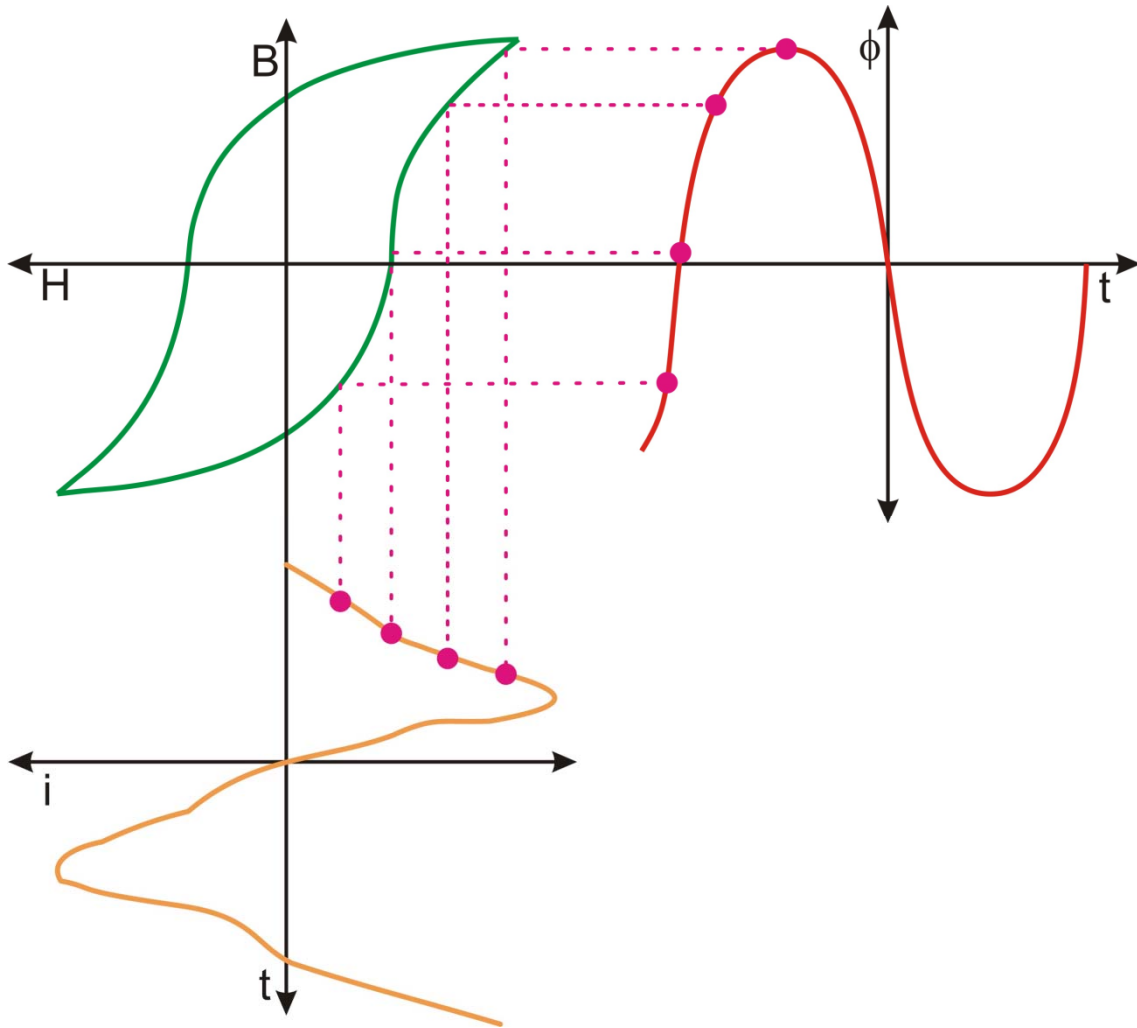


Figura 16: A formação de harmônicos devido à histerese (curva BxH)

A Tabela 7 mostra o conteúdo harmônico percentual para um nível médio de excitação ($1,2 \frac{Wb}{m^2}$).

Tabela 7: Conteúdo harmônico percentual da corrente de excitação

Harmônico	Terceiro	Quinto	Sétimo	Nono	Décimo Primeiro
Conteúdo (%)	20,0	6,0	2,0	0,70	0,30

A harmônica predominante é a terceira (180 Hz). A presença deste terceiro harmônico é extremamente prejudicial ao sistema elétrico de potência

pela distorção de tensão que ele causa e também pelo sobre aquecimento que produz nos equipamentos.

A Figura 17 apresenta curvas $B \times H$ de um transformador de 150 MVA 230 – 138 kV. Podemos observar que tanto a sobre quanto a sub-excitação causam uma deformação da curva projetada e, no caso da sobre-excitação, aumentam o nível de perdas e de sub-excitação que desequilibram a relação de tensão.

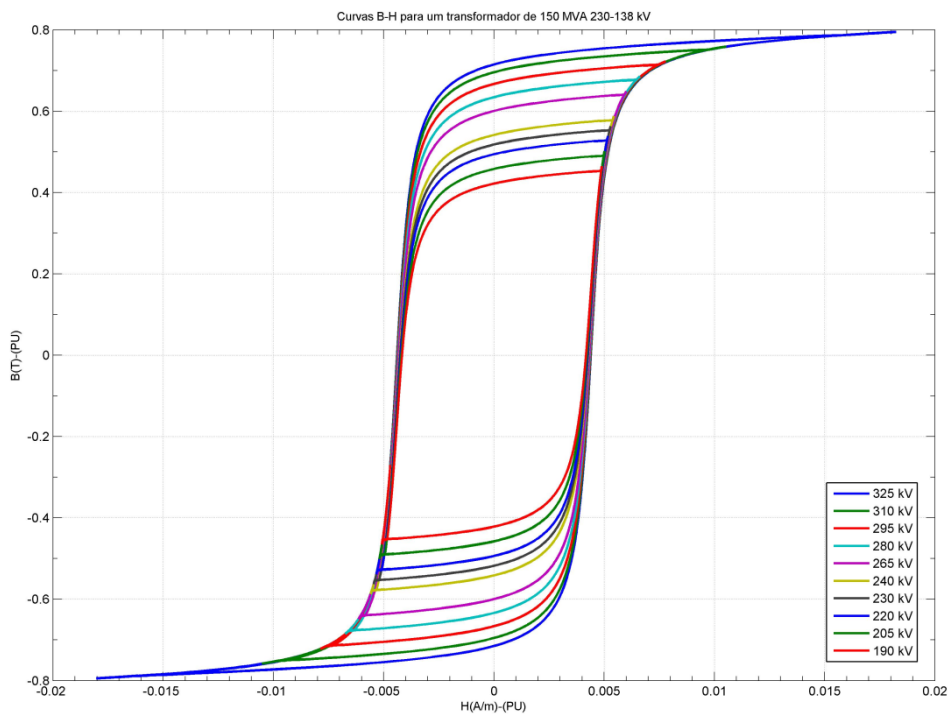


Figura 17: Curvas BxH para várias tensões de excitação aplicadas em um transformador de 150 MVA 230 – 138 kV

Apesar de o aqui exposto representar uma pequena parte da teoria do magnetismo do núcleo e seus comportamentos não lineares, isso é tudo o que precisamos saber para compreender adequadamente seus efeitos no ensaio de resposta em frequência.

3.4 O Transformador de Potência

Uma classe muito especial de transformadores que operam no sistema elétrico compreende o que se chama de Transformador de Potência. Trata-se de um equipamento destinado à conversão de grandes blocos de energia e que opera em níveis elevados de tensão, usualmente acima dos 138 kV, e que possui interessantes particularidades referentes ao seu funcionamento e construção.

Ele deve ser capaz de transformar tensões e correntes alternadas de forma eficiente e confiável. Devido à relação proporcional entre o produto da tensão e da corrente entre enrolamentos do transformador, altas tensões somente podem existir com baixos níveis de corrente e vice-versa.

Durante a operação normal, o transformador de potência é submetido a esforços eletromecânicos causados pela corrente elétrica que circula por ele. Se o transformador é submetido a correntes elevadas provocadas por curto-circuito, os esforços eletromecânicos internos podem provocar alterações geométricas nos enrolamentos como deformações e deslocamentos. Essas deformações são prejudiciais, pois diminuem a capacidade do transformador de suportar curto-circuito, diminuem a sua vida útil e precipitam falhas que podem tirá-lo de operação.

Não obstante, por funcionarem em alta tensão, com valores elevados de corrente e permanecerem cada vez mais por longos períodos em carga máxima, são construídos de forma a levar em consideração diversos aspectos

que visam dar ao equipamento robustez para suportar tais condições severas. Não basta apenas o emprego de materiais isolantes de boa qualidade e de alta rigidez dielétrica. Um estudo de uniformização da distribuição do campo elétrico interno ao equipamento na etapa de projeto é importante para um funcionamento adequado. O dimensionamento dos condutores deve ser feito de forma cuidadosa para suportar com segurança altos níveis de corrente. A Figura 18 mostra um transformador de potência típico em corte, evidenciando diversos elementos característicos de sua construção.

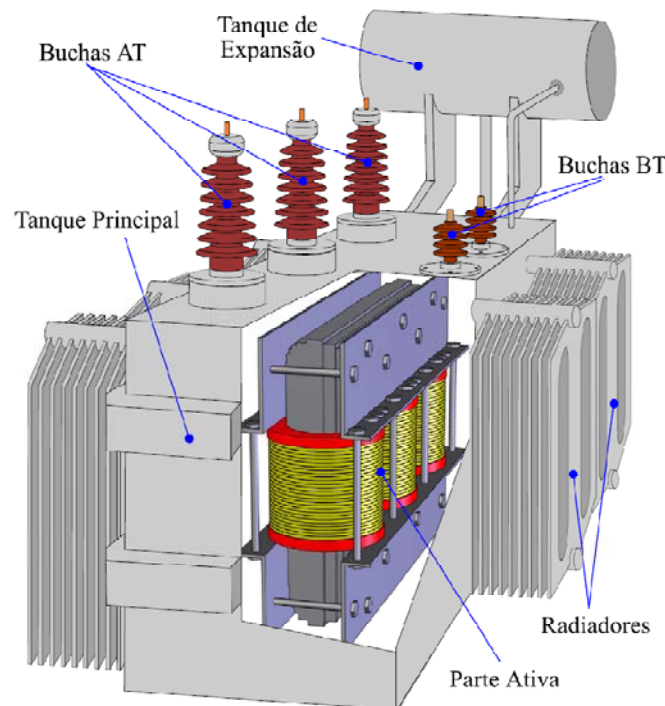


Figura 18: Vista em corte de um transformador de potência típico[18]

Uma vez que os níveis de potência em que trabalha são altos, mesmo com alta eficiência nota-se que os transformadores de potência precisam contar com um sistema de resfriamento para garantir o funcionamento em temperatura adequada. Para isto, grandes volumes de óleo isolante e grandes radiadores, aliados ao projeto do tanque principal são em geral empregados e

freqüentemente sistemas de ventilação forçada nos radiadores são disponibilizados pelos fabricantes. O limite térmico de funcionamento é o fator limitante na capacidade de transferência de potência em transformadores deste tipo.

Os transformadores de potência são os equipamentos mais caros e de maior importância para os sistemas elétricos de transmissão e distribuição em qualquer nível de tensão. A ocorrência de falhas nesses equipamentos, acompanhadas de retirada de operação, implicam prejuízos devido ao custo de manutenção do equipamento em si e às conseqüências operacionais, como a posição estratégica do transformador e a interrupção no fornecimento de energia. É por isso que os transformadores de potência são alvo de diversas aplicações que visam estender a monitoração e o diagnóstico para todos os tipos de faltas possíveis e, desse modo, prever com antecipação a retirada de operação e evitar desligamentos indesejáveis.

3.4.1 Aspectos construtivos do Transformador de Potência

3.4.1.1 Elementos Estruturais

Na construção de um transformador de potência verifica-se a existência de elementos estruturais responsáveis por garantir a rigidez mecânica do conjunto em funcionamento e de componentes responsáveis por promover isolamento elétrica e resfriamento.

O tanque principal é a estrutura que confina a parte ativa do transformador, imersa em óleo isolante. É responsável pela sustentação do

transformador e por sua resistência mecânica, além da proteção dos elementos internos. Em geral o tanque principal é selado para evitar a contaminação do óleo por agentes externos. Além deste, existe ainda o tanque de expansão, localizado usualmente na parte mais superior do transformador, que é responsável por fornecer um espaço extra destinado às variações de volume de óleo isolante em função da temperatura.

Os radiadores são placas metálicas dispostas verticalmente na parte exterior do transformador de potência. São percorridas pelo óleo isolante presente no tanque principal, seja por meio de correntes de convecção naturais ou por bombeamento forçado, e têm como função o aumento da área de troca de calor com o ambiente.

Eventualmente os radiadores contam ainda com elementos de ventilação forçada.

A Figura 19 ilustra a atuação dos radiadores na promoção do resfriamento do transformador.

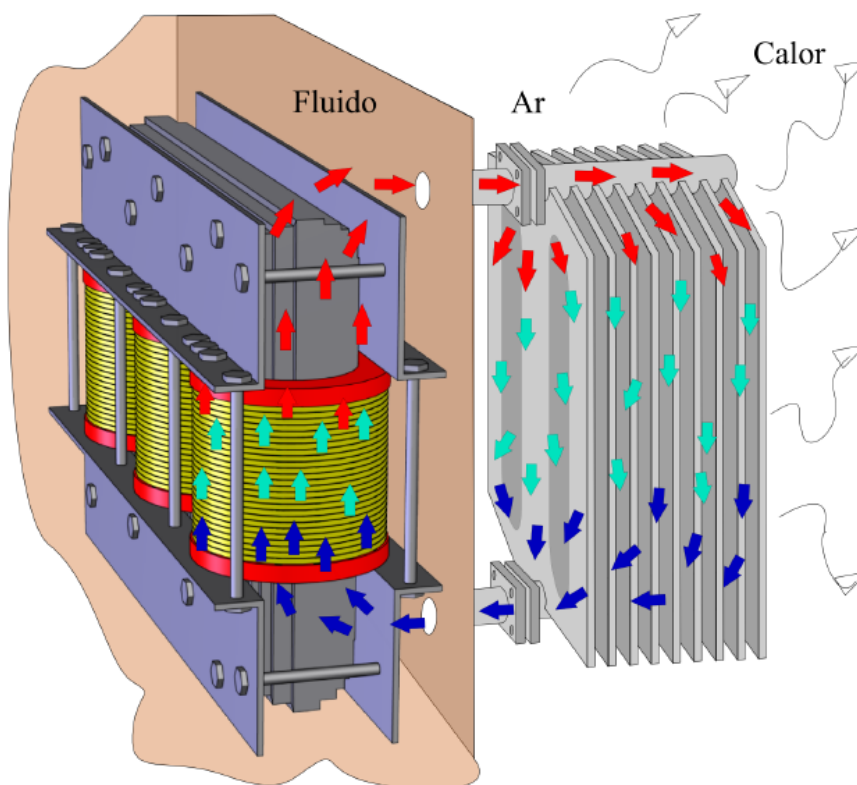


Figura 19: Esquema do funcionamento do radiador de um transformador de potência[18]

Os espaçadores entre as espiras dos enrolamentos caracterizam elementos estruturais de fundamental importância, pois são responsáveis pela manutenção da distância mínima entre condutores e assim permitir a manutenção de condição nominais de gradiente de campo no interior do transformador. Uma degradação da capacidade de tais espaçadores em suportar esforços mecânicos representa um grave problema, pois pode facilitar a ocorrência de curto-circuito interno entre espiras ou entre espiras e núcleo. Além disso, o projeto dos espaçadores deve levar em consideração a ocorrência de curtos-circuitos externos, pois em tais condições a circulação da corrente de curto pode submeter as bobinas do transformador a esforços mecânicos ainda maiores.

3.4.1.2 Núcleo

Os transformadores podem ser construídos de duas formas:

- Núcleo envolvente (*Shell Type*): O enrolamento é completamente envolvido pelo núcleo. Nesta disposição o tamanho médio do enrolamento é longo, enquanto o tamanho médio do circuito magnético é curto.
- Núcleo envolvido (*Core Type*): O núcleo é completamente envolvido pelo enrolamento. Nesta disposição o tamanho médio do circuito magnético é longo, enquanto o tamanho médio do enrolamento é curto.

Transformadores com múltiplos enrolamentos e polifásicos podem ser construídos de ambas as formas. A Figura 20 exemplifica de maneira didática estes tipos de núcleo.

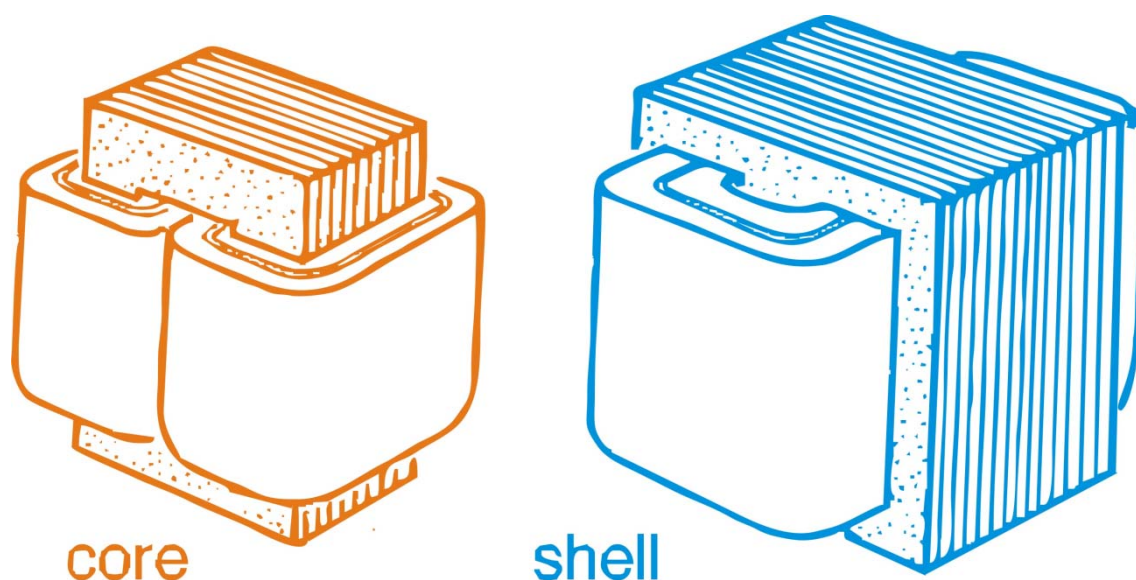


Figura 20: Tipos construtivos de núcleo

A Figura 21 apresenta o detalhe de um núcleo tipo envolvido e a Figura 22 o detalhe de um núcleo tipo envolvente.

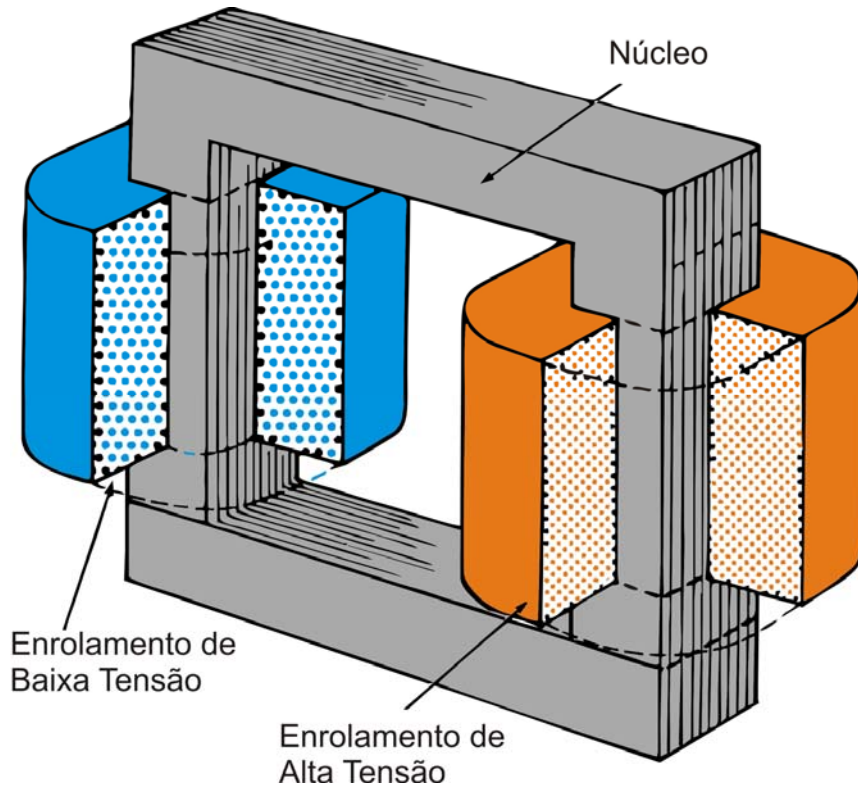


Figura 21: Núcleo tipo envolvido

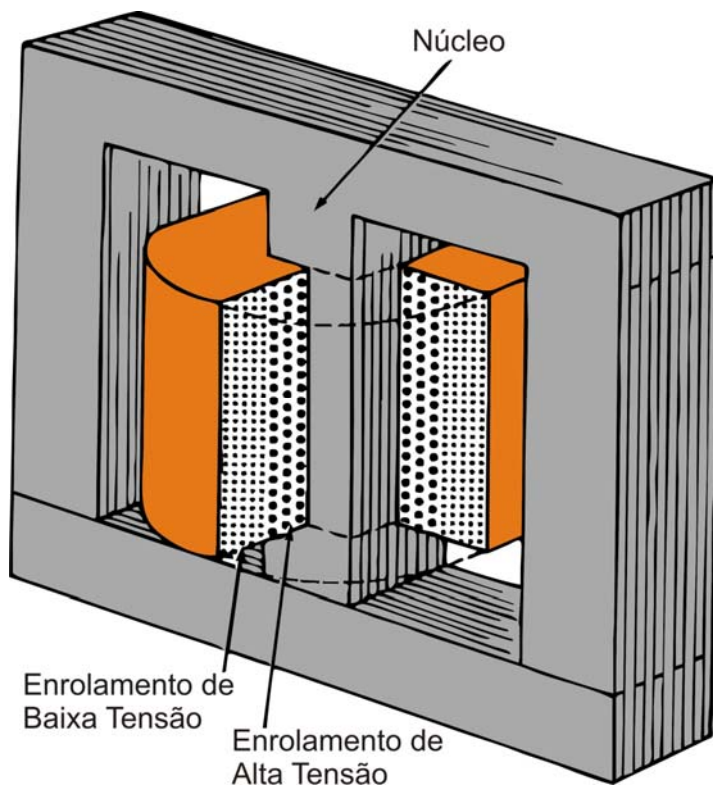


Figura 22: Núcleo tipo envolvente

3.4.1.3 A Parte Ativa

A parte ativa de um transformador consiste basicamente de enrolamentos de fios condutores, formando circuitos separados isolados galvanicamente entre si, e do núcleo magnético. A transferência de energia entre os enrolamentos se dá pelo campo magnético mútuo, estabelecido principalmente através do núcleo.

Os enrolamentos de um transformador de potência são constituídos de condutores de cobre isolados com papel.

Os enrolamentos do transformador podem ser feitos de qualquer tipo de condutor, sendo que normalmente o cobre e o alumínio são os mais utilizados. Geralmente os condutores têm uma forma cilíndrica, mas no caso de grandes seções transversais condutores em formato retangular proporcionam um uso mais eficiente do espaço reservado ao enrolamento.

Em geral a seção reta desses condutores tem um perfil retangular para facilitar a construção dos enrolamentos. Eles são montados em torno de um núcleo de material ferromagnético laminado, constituído em geral de chapas de aço-silício de grãos orientados que tem a função de concentrar o campo magnético criado pelos enrolamentos e assim aumentar a eficiência do equipamento. O enrolamento primário e secundário são geralmente montados um sobre o outro para obter melhor acoplamento magnético. A Figura 23 mostra um esquema de como a parte ativa é em geral organizada.

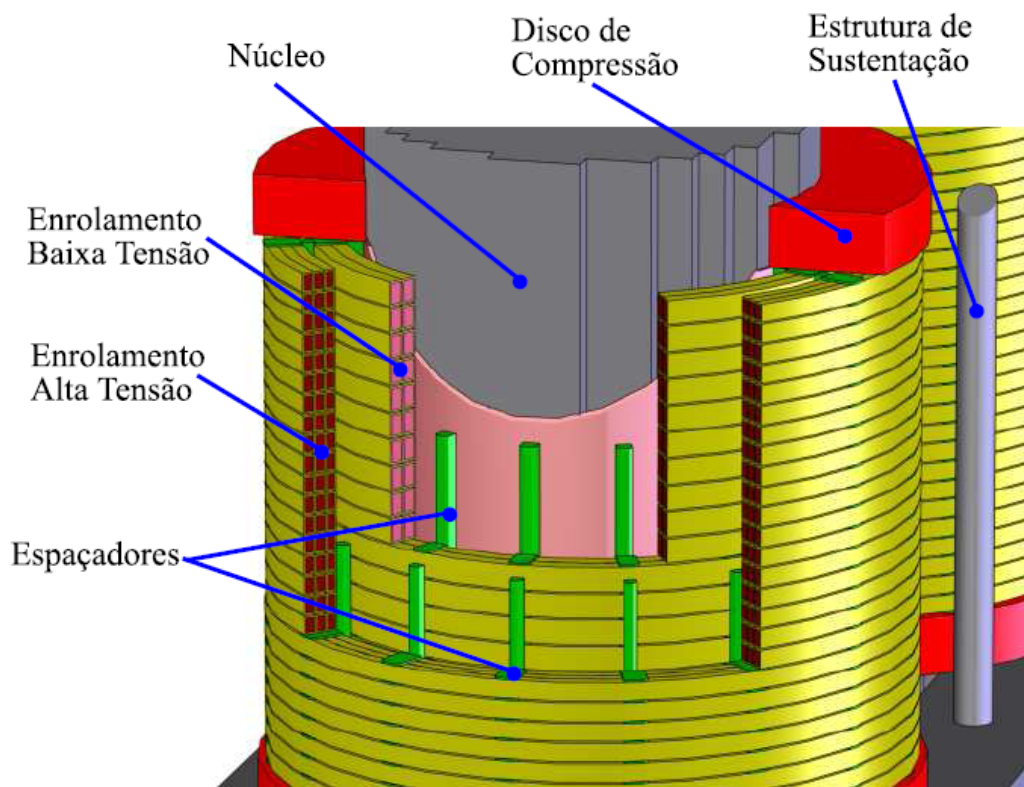


Figura 23: Organização da parte ativa em um transformador de potência típico[18]

3.4.1.4 Buchas

Para que se possa ter acesso aos terminais dos enrolamentos de um transformador é necessária a utilização de componentes capazes de realizar o contato elétrico mantendo o selamento do tanque do transformador ao mesmo tempo em que mantém a isolação elétrica. A esses componentes de transformadores denominam-se buchas. Basicamente existem dois tipos de buchas de transformadores: as de alta e as de baixa tensão. Seus detalhes construtivos variam de forma a se adaptar ao nível de tensão de trabalho.

As buchas de baixa tensão são projetadas para suportarem níveis de tensão em regime em geral até 15 kV. Sua construção é mais simplificada, sendo composta de uma barra condutora, que conecta os terminais dos

enrolamentos ao meio externo, e um corpo isolante (porcelana, vidro, ou material polimérico). Sua superfície externa é construída com abas em formato de cone para que haja um aumento da superfície exposta (caminho superficial), diminuindo o risco de ruptura, ao mesmo tempo em que dificulta a formação de filetes de água da chuva.

Para suportar os elevados gradientes de campo elétrico em aplicações de alta tensão, as buchas de alta tensão empregam, além do material isolante externo utilizado nas buchas de baixa tensão, várias camadas de papel impregnado em óleo isolante, em geral mineral. Tais camadas de papel são dispostas de forma a manter o campo elétrico distribuído através das várias camadas igualmente, buscando a minimização dos esforços elétricos. A bucha de alta tensão contém óleo isolante ao longo de toda a sua extensão, em geral o mesmo tipo de óleo utilizado no tanque principal. Devido a seus aspectos construtivos, as buchas de alta tensão são também conhecidas como buchas capacitivas.

3.5 Faltas Mecânicas

São conhecidas como faltas mecânicas as alterações geométricas ocorridas no interior do transformador, compreendendo os deslocamentos de bobinas e núcleo. Tais alterações são causadas pela ação de forças de grande magnitude, em decorrência de condições elétricas ou ação de agentes externos. Sua ocorrência pode ocasionar degradação de características fundamentais para o funcionamento do transformador, como a distância mínima entre espiras ou a distância de isolamento para o núcleo. Processos

disruptivos podem ter início a partir disto, e a suportabilidade a surtos de tensão também pode ficar comprometida.

3.5.1 Origem dos Esforços Mecânicos

Os esforços mecânicos que atuam no transformador de potência podem ter duas origens distintas: fenômenos elétricos ou agentes externos.

Para dar início à compreensão da origem dos esforços mecânicos relacionados às grandezas elétricas que atuam no transformador pode-se recorrer à análise simplificada da força magnética atuante entre dois condutores percorridos por uma corrente elétrica i .

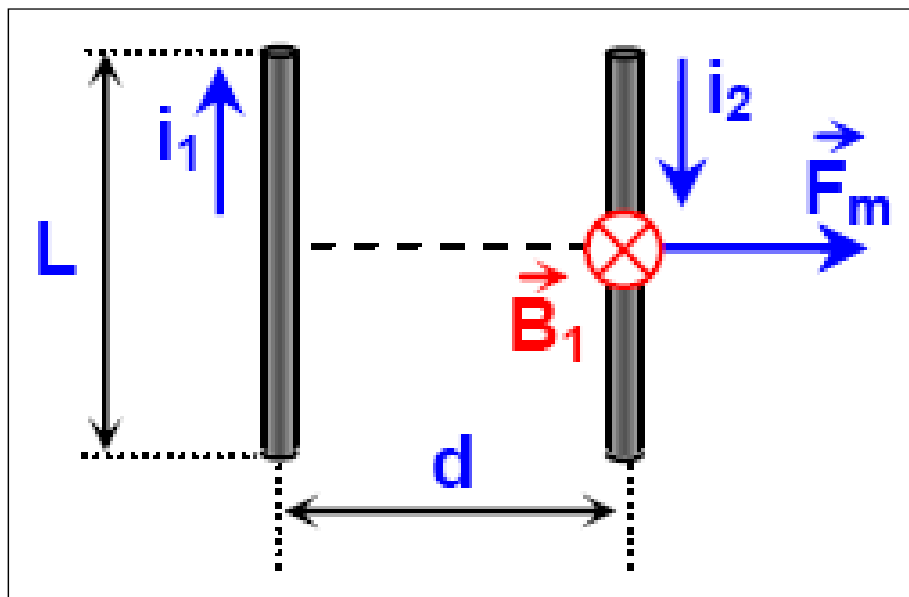


Figura 24: Diagrama da interação entre dois condutores retilíneos percorridos por correntes

A Figura 24 ilustra um experimento simplificado: dois condutores são dispostos paralelamente e são percorridos por correntes i_1 e i_2 . Sabe-se, pela lei de Ampère, que o campo produzido por um condutor retilíneo percorrido por uma corrente i tem sua intensidade dada por:

$$B = \frac{\mu_r \mu_0 i}{2\pi r} \quad \text{(Equação 11)}$$

Este campo aponta na direção indicada pela Figura 25, segundo a regra da mão direita em que r é à distância do condutor ao ponto de medição.

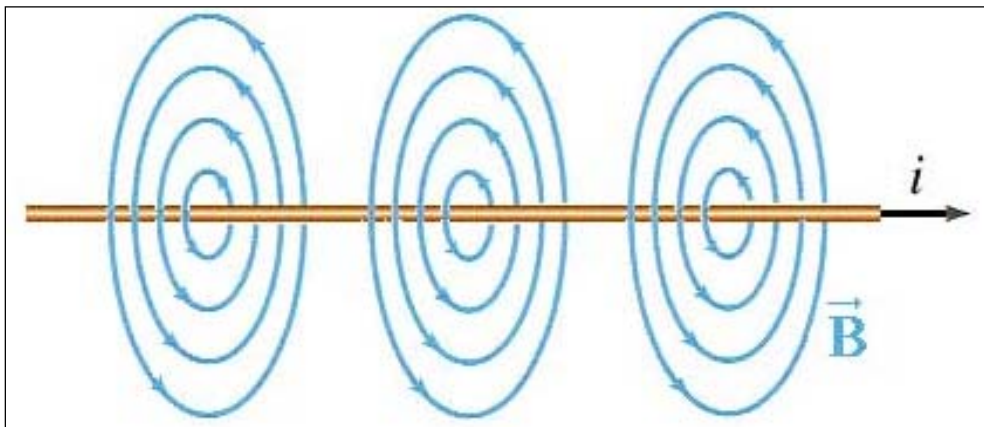


Figura 25: Disposição das linhas de campo gerado pela corrente em um condutor retilíneo

Além disso, sabe-se que num condutor, imerso numa região de campo magnético B e percorrido por uma corrente i , atua uma força dada por:

$$\vec{F} = i\vec{l} \times \vec{B}$$

Onde l é o comprimento do condutor. Logo, para o arranjo mostrado na Figura 24 pode-se concluir que o condutor 2 será submetido a uma força magnética oriunda a partir da interação do campo magnético gerado pela corrente i_1 , dada por:

$$\vec{F}_m = i_2 \vec{L} \times \vec{B}_1$$

Onde B_1 é a intensidade de campo magnético gerado pela corrente i_1 medido a uma distância d . Logo, uma força provocada pela interação com o campo magnético gerado pela corrente i_1 . O raciocínio é análogo para a força

atuante sobre o condutor 1. Em um transformador de potência tais forças aparecem entre espiras de um mesmo enrolamento e entre espiras de enrolamentos distintos.

Num transformador real tem-se, em geral e por aspectos construtivos e de eficiência, o enrolamento de alta tensão sobreposto ao enrolamento de baixa tensão. Com isso, a proximidade que tem por objetivo um melhor acoplamento magnético submete também os enrolamentos a forças magnéticas, uma vez que a corrente em cada enrolamento circula numa região do espaço onde se verifica a existência de um campo magnético gerado pelo outro enrolamento.

Se os enrolamentos são cilíndricos e concêntricos, dependendo do sentido de circulação das correntes, observa-se que as forças são repulsivas e no sentido de comprimir o enrolamento interno em direção ao núcleo ao mesmo tempo em que afasta o enrolamento externo em direção ao tanque (forças radiais). Se os centros magnéticos das forças resultantes não coincidem, podem surgir ainda forças axiais de magnitude expressiva, no sentido de afastar ou aproximar espiras, ou no deslocamento da bobina como um todo.

3.5.2 Deformações nos Enrolamentos, Núcleo, e Faltas Mecânicas

As alterações geométricas que podem ser comumente observadas nos enrolamentos em decorrência dos esforços mecânicos descritos anteriormente são as deformações radiais, axiais e os deslocamentos. Embora não causem, em geral, diretamente uma falta que possa retirar o transformador de operação,

tais deslocamentos contribuem para a degradação de características de projeto responsáveis pelo funcionamento seguro em condições de regime.

A deformação axial é um deslocamento que se manifesta no sentido de se afastar ou comprimir as espiras entre si, no mesmo sentido do eixo do enrolamento. Pode provocar a torção dos condutores das bobinas o que degrada o papel isolante em sua superfície, além de comprometer os espaçadores e demais elementos de sustentação do enrolamento, por esmagamento. A diminuição da rigidez mecânica do conjunto tem o efeito de permitir o deslocamento do enrolamento, vibrações e fadiga de conexões, reduzindo a capacidade do transformador em suportar correntes de curtos-circuitos e surtos de tensão. A Figura 26 ilustra como se processa esse tipo de deformação.

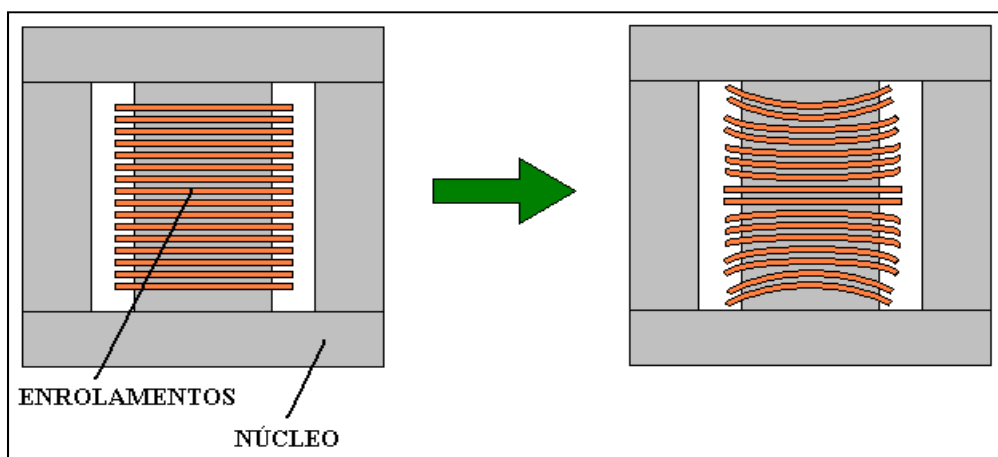


Figura 26: Esquema de como se processa a deformação axial de um enrolamento

A deformação radial é aquela que se processa no sentido de se afastar os condutores externo e interno dos enrolamentos de alta e baixa tensão na direção radial. Quando o transformador é construído com os enrolamentos de alta e baixa sobrepostos, a tendência é a compressão do enrolamento interno

em direção ao núcleo e a expansão do enrolamento externo em direção ao tanque. Nesse tipo de deformação, observa-se o estiramento do papel isolante da superfície dos condutores em função da distensão, o que degrada a isolação e reduz a suportabilidade a surtos de tensão.

Além disso, a redução da distância entre o enrolamento interno e o núcleo reduz os níveis de isolação e altera a distribuição de campo elétrico interno, o que pode aumentar o estresse em pontos específicos do isolamento. Esta deformação contribui também para o afrouxamento das amarrações, com a diminuição da rigidez mecânica do conjunto e fadiga de conexões e partes de sustentação. A Figura 27 ilustra como se processa a deformação radial em um enrolamento.

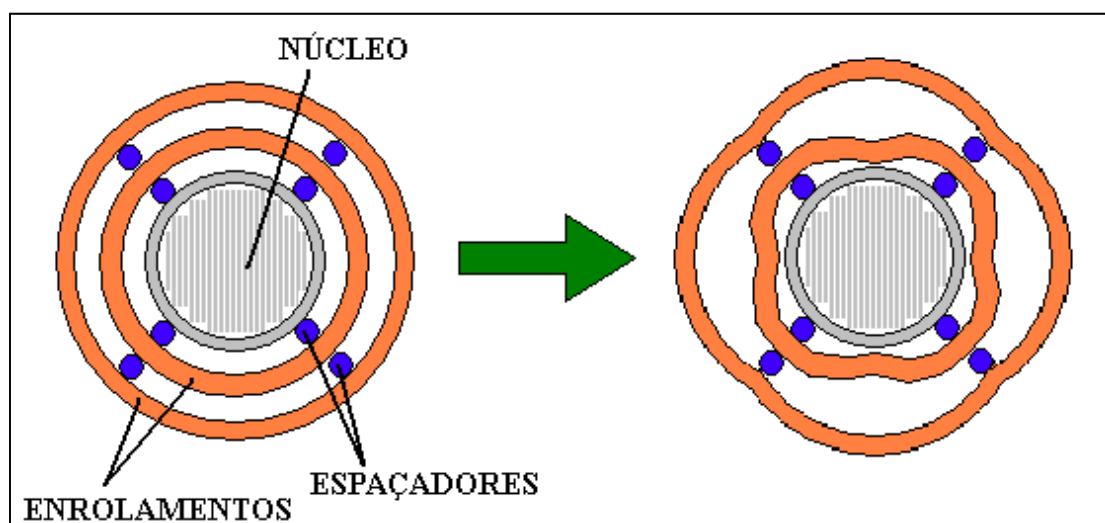


Figura 27: Esquema de uma deformação radial em um enrolamento

Em situações onde as estruturas de sustentação e fixação já estão fatigadas o suficiente, as forças mecânicas às quais os enrolamentos estão expostos podem ser suficientes para provocar a movimentação do conjunto de espiras como um todo configurando um deslocamento. Nesses casos observa-

se que o enrolamento se encontra fora de seu eixo. As conseqüências deste tipo de alteração geométrica são as mesmas citadas para os outros tipos de deslocamentos, como as reduções das distâncias mínimas de isolamento e a geração de vibrações. A Figura 28 ilustra como um deslocamento de bobina se processa.

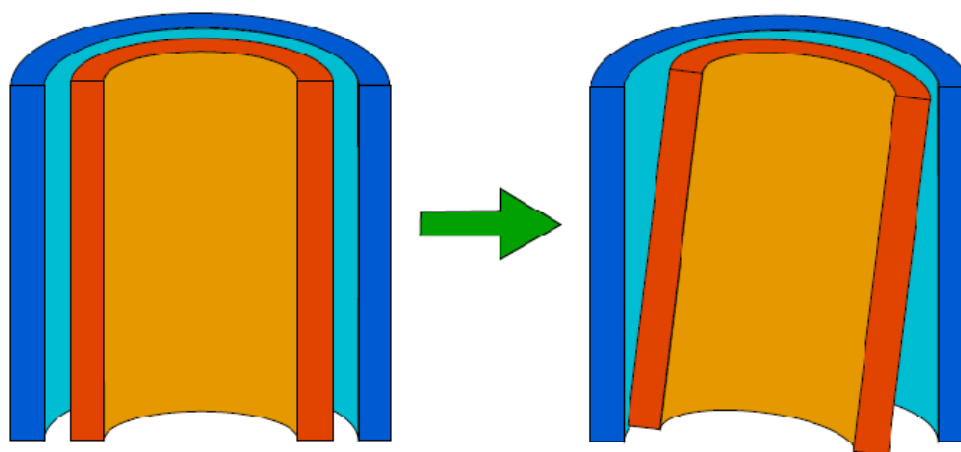


Figura 28: Diagrama ilustrativo de um deslocamento de bobina em um transformador de potência [18]

Além dos deslocamentos de enrolamentos submetidos às forças mecânicas, pode-se observar, com menos freqüência, os deslocamentos de partes do núcleo magnético. Devido à alta robustez mecânica, os esforços em geral observados sobre o núcleo do transformador em decorrência de esforços elétricos não são capazes de provocar alterações visíveis. Contudo, impactos mecânicos em decorrência do transporte podem provocar alterações na geometria do núcleo do transformador que podem se traduzir em estresses da isolação e estruturas de fixação, permitindo vibrações e a redução da vida útil do transformador à medida que facilitam outros processos degenerativos, como os próprios deslocamentos de enrolamentos.

O transformador de potência é projetado de forma que o conjunto seja capaz de suportar as forças mecânicas decorrentes do funcionamento nominal em segurança. Contudo, alguns esforços elétricos em funcionamento podem ultrapassar o limite máximo de suportabilidade ou gerar fadiga. Dentre tais esforços estão, principalmente, as correntes de curto-circuito e energizações. Um outro tipo de esforço que pode resultar num deslocamento ou falta mecânica são os acidentes em transporte.

As correntes de curto-circuito são as principais responsáveis por deslocamentos mecânicos de origem elétrica, devido à alta intensidade das correntes envolvidas. Como a impedância de curto pode ser muito baixa, a corrente de curto que circula pelos enrolamentos do transformador pode atingir níveis elevadíssimos, de dezenas de vezes a corrente nominal. Embora a duração de tais correntes seja, em geral, baixa, devido à atuação das proteções do sistema, a alta amplitude da corrente pode ocasionar a ação de forças magnéticas de alta intensidade e curta duração, o suficiente para fatigar as estruturas de sustentação, ou até mesmo provocar um deslocamento em si.

Além dessas, existem as correntes de energização, durante operações de manobra, também conhecidas como correntes de *inrush*. Podem ser geradas no momento da energização do transformador quando a tensão aplicada não está em fase com a tensão induzida, o que gera a circulação de correntes elevadas em decorrência da saturação do material ferromagnético do núcleo. Tais correntes têm duração relativamente curta e sua amplitude não ultrapassa, em geral, cerca de oito vezes a corrente nominal, mas são

responsáveis por grande parte da fadiga mecânica do material de sustentação e fixação em virtude da sua frequência elevada de ocorrência ao longo da vida útil do transformador.

Os impactos mecânicos ocorridos no transformador durante o transporte são outro tipo de causa de alterações mecânicas que podem ser citadas. Devido às suas dimensões elevadas e seu peso, as dificuldades inerentes ao seu transporte da fábrica até a subestação podem submeter o transformador a impactos que podem ser suficientes para deslocar enrolamentos ou deformar o núcleo do transformador.

3.6 Caracterização do Transformador no Domínio da Frequência

A associação das capacitâncias e indutâncias internas do transformador forma uma complexa rede de impedâncias. Essas grandezas (capacitâncias e indutâncias) são fortemente dependentes da geometria do enrolamento e das constantes dielétricas e magnéticas dos materiais usados na construção do equipamento. A Figura 29 ilustra a identificação das capacitâncias parasitas que surgem da construção dos transformadores de potência.

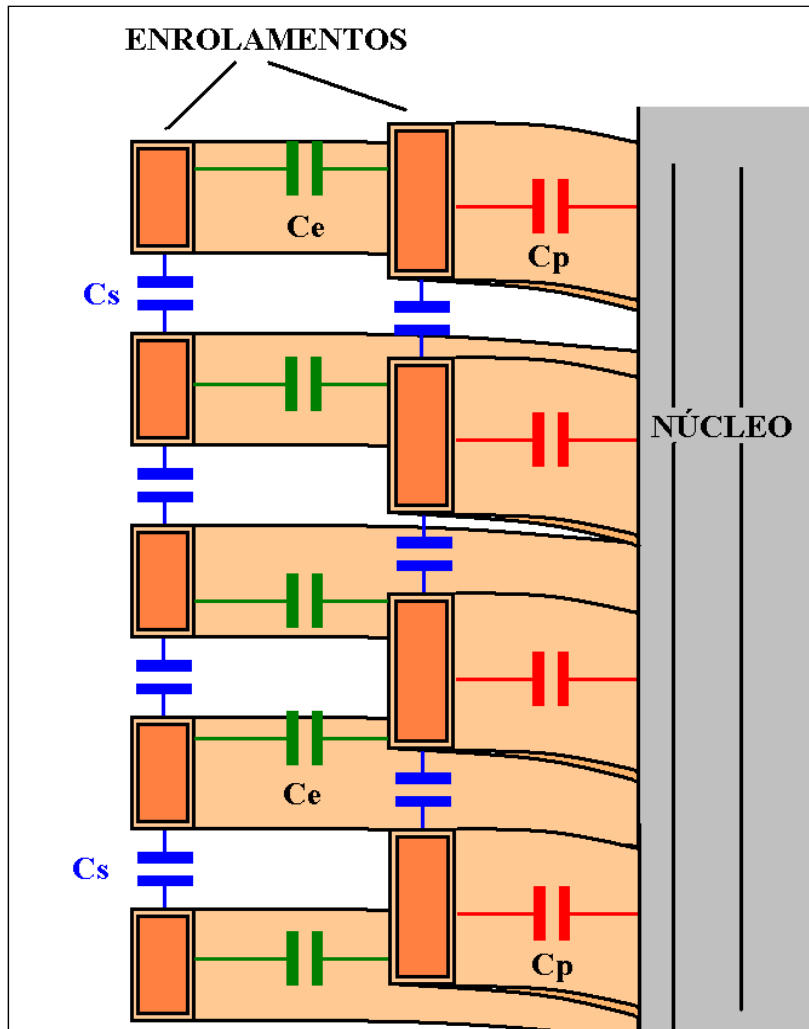


Figura 29: Diagrama ilustrativo da distribuição de capacitâncias internas

Em uma larga faixa de frequências pode-se verificar que o comportamento da impedância resultante é tipicamente não-linear, e que os efeitos capacitivos podem se tornar mais expressivos que os efeitos indutivos em determinadas frequências de ressonância. Na Figura 30 pode ser observado um comportamento típico da impedância terminal de um enrolamento de um transformador de potência ao longo de uma larga faixa de frequências.

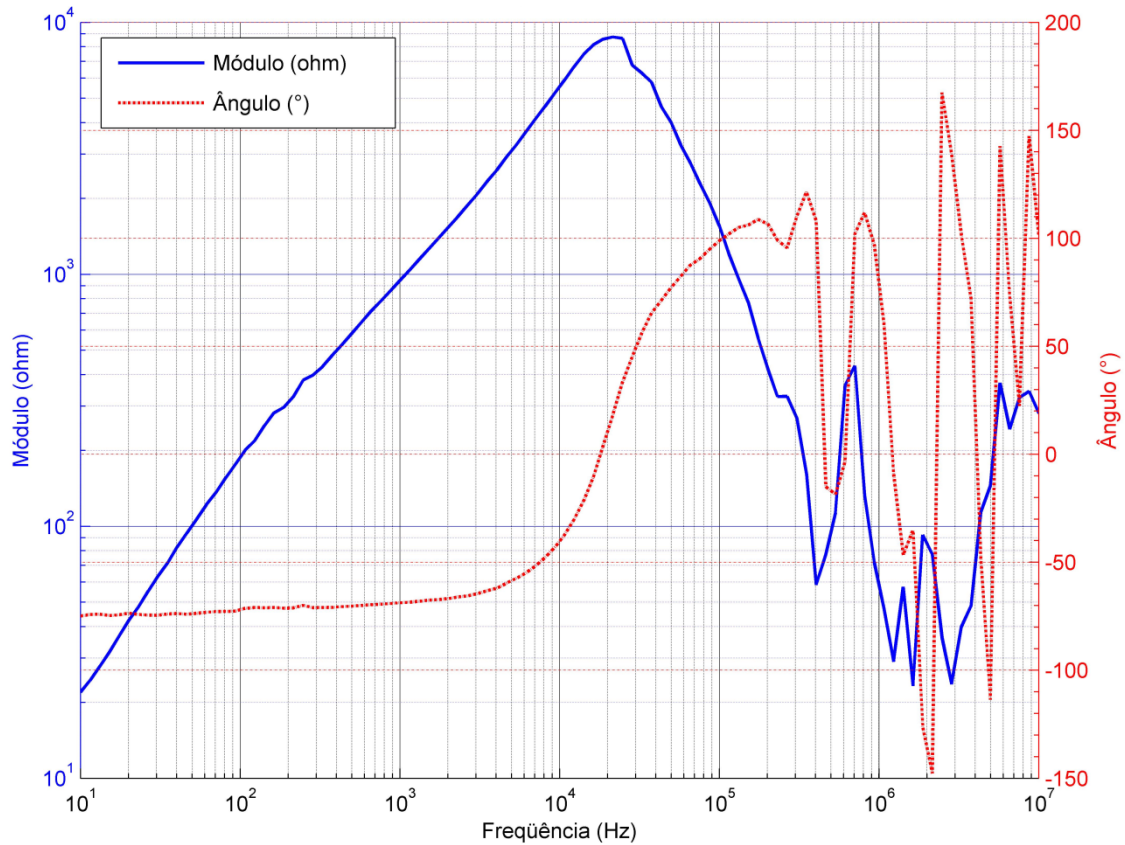


Figura 30: Curva típica de um ensaio de medição de impedância terminal

Esse comportamento deve ser levado em consideração no estudo de fenômenos transitórios e descargas de impulsos atmosféricos que podem atuar sobre o sistema, pois estes geram distúrbios com tensões elevadas em largas faixas de frequências. Quando há ocorrência de faltas mecânicas no interior do transformador há uma alteração na geometria dos enrolamentos e conseqüentemente uma alteração na distribuição das capacitâncias e indutâncias internas. Em decorrência dessas alterações, espera-se observar também uma alteração significativa nas curvas de impedância terminal e relação de transformação para os enrolamentos do transformador no domínio da frequência, princípio em que se baseiam os estudos que visam a obtenção de uma metodologia de diagnóstico de faltas mecânicas em transformadores de potência via FRA.

Este capítulo abordou os aspectos relacionados à construção do transformador de potência e suas particularidades. Seus detalhes construtivos foram expostos e uma discussão do ponto de vista do funcionamento mecânico foi feita. Foram ressaltadas as condições que podem ocasionar deslocamentos mecânicos precursores de faltas, bem como suas conseqüências. Além disso, uma discussão a respeito do funcionamento do transformador de potência ao longo de uma larga faixa de freqüências foi feita, evidenciando as componentes parasitas que surgem em sua modelagem e que são responsáveis pela motivação dos estudos de FRA.

No próximo capítulo será feita uma discussão a respeito das principais filosofias de obtenção da resposta em freqüência de transformadores, suas características, vantagens e desvantagens, de forma prática e sucinta. Esta discussão poderá orientar a escolha da melhor topologia de um sistema de aquisição de dados em FRA de acordo com a aplicação.

4

FILOSOFIAS DE MEDIÇÃO E OBTENÇÃO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

4.1 Introdução

Existem basicamente duas filosofias de obtenção da resposta em frequência de um transformador: a medição da impedância terminal de um enrolamento e a medição da relação de transformação entre enrolamentos. Os ensaios de relação de transformação precisam ser um pouco mais criteriosos para serem executados, pois podem gerar tensões relativamente altas no decorrer do ensaio.

Do ponto de vista de sistemática de diagnóstico, aparentemente os resultados de medição de impedância terminal guardam informações suficientes. Contudo, a utilização das duas filosofias de medição em FRA em modo de complementaridade parece ser uma excelente alternativa. Ao longo

dos próximos itens serão discutidas as características de cada filosofia de medição.

4.1.1 Medição de impedância: Efeitos parasitas

Nenhum circuito ou componente real é puramente resistivo ou reativo, é na verdade uma combinação destes elementos. O resultado é que todos os componentes do mundo real têm a influência de efeitos parasitas: resistores apresentam indutâncias e capacitâncias, indutores apresentam resistência e capacitância, e capacitores apresentam indutância e resistência.

Naturalmente, a tecnologia de fabricação tem impacto sobre a influência de componentes parasitas sobre estes elementos, contudo, por mais que sejam minimizados, os efeitos parasitas estão presentes e devem ser levados em consideração.

Com uma combinação de componentes ideais representando tanto a parte nominal do equipamento medido quanto a parte parasita, pode-se ter um circuito que represente o modelo elétrico do componente como ele é na prática, o que é mostrado na Figura 31 para o caso exemplo de um capacitor. Nele, pode-se notar a presença de efeitos indutivos e resistivos, que variam com a frequência, tornando o componente sob medida uma verdadeira rede de impedâncias na prática. (Figura 32)

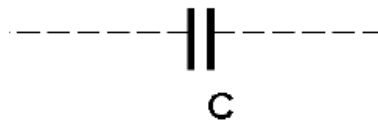


Figura 31: Representação do valor verdadeiro de um capacitor

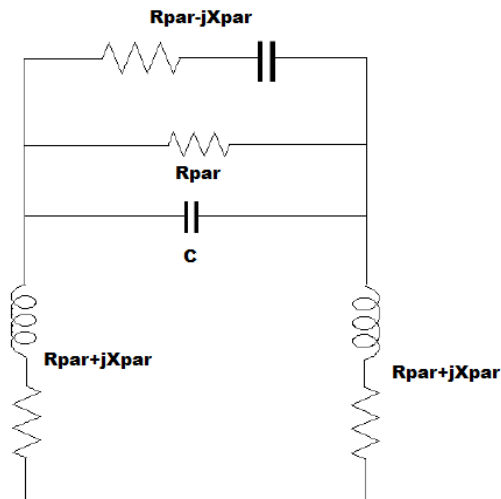


Figura 32: Circuito equivalente considerando-se elementos parasitas

4.1.2 Valores Verdadeiro, Efetivo e Indicativo

Uma noção do significado dos valores verdadeiro, efetivo e indicativo de grandezas medidas é conveniente antes de se passar a análises de dados de medição [19].

O valor verdadeiro é aquele apresentado pelo componente ou circuito na ausência de qualquer componente parasita, ou seja, representa o caso ideal.

O valor indicativo de uma medição é aquele que agrega o valor real da medição, os efeitos parasitas, e a influência do instrumento de medição sobre o componente ou circuito sob medida. É na realidade o valor obtido e mostrado pelo instrumento de medição de impedância, o que guarda em si uma perda de informação relacionada à classe de exatidão do instrumento. Por este motivo,

os valores indicativos contêm erros quando comparados aos valores efetivo e verdadeiro. Eles também variam de medição para medição dependendo das condições de medida (temperatura, conexões). Quanto mais o valor indicativo se aproximar do valor efetivo mais qualidade se tem na medição (o valor efetivo é o que se interessa medir, de fato). A Figura 33 ilustra a composição do valor indicativo de um elemento a partir de seus valores efetivo e verdadeiro.

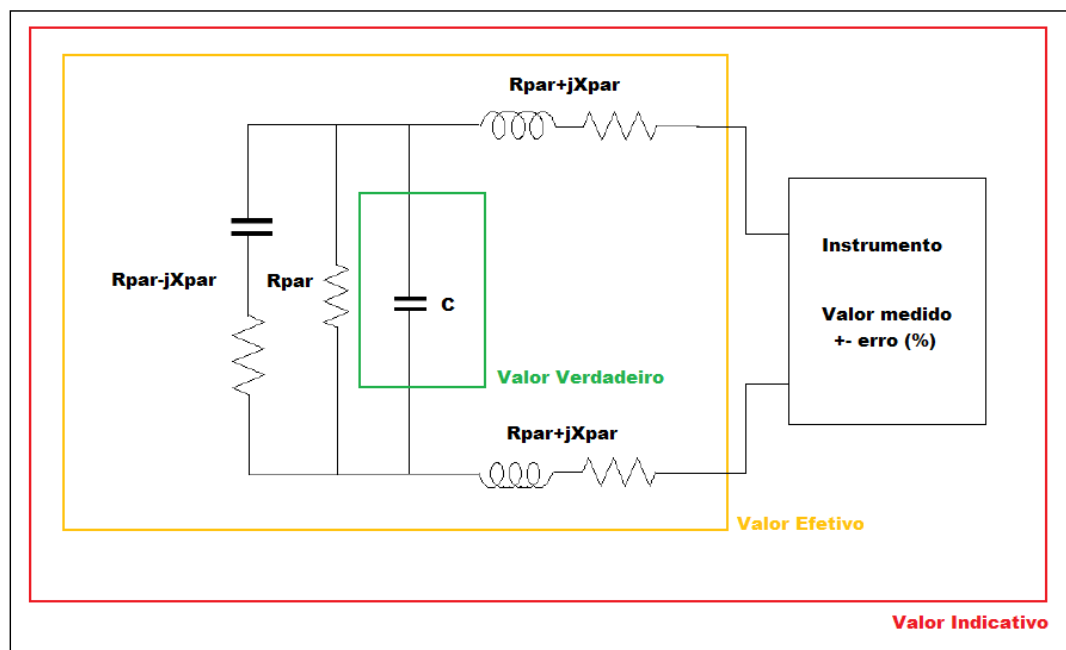


Figura 33: Composição de valor indicativo de um capacitor

4.2 Medição da Impedância Terminal por Varredura de Freqüência

Dentre os métodos usualmente aceitos pela literatura para medição de impedância terminal, podem-se citar a medição por ponte de impedâncias, método ressonante, análise de redes, I-V e ponte auto balanceada. Destes, os métodos mais aplicáveis para se caracterizar a impedância de um enrolamento de um transformador de potência no domínio da freqüência são o método I-V e

a ponte balanceada, devido às facilidades de implementação, robustez e sensibilidade a ruídos.

4.2.1 Método da Ponte

O método de medição de impedância através de ponte de Wheatstone pode ser amplamente utilizado tanto por profissionais da eletrônica quanto por técnicos do setor elétrico de potência. Seu funcionamento é de simples entendimento: quando não há corrente fluindo através do detector (D), o valor da impedância desconhecida Z_x pode ser obtido pela relação entre os demais elementos da ponte, de acordo com a Figura 34.

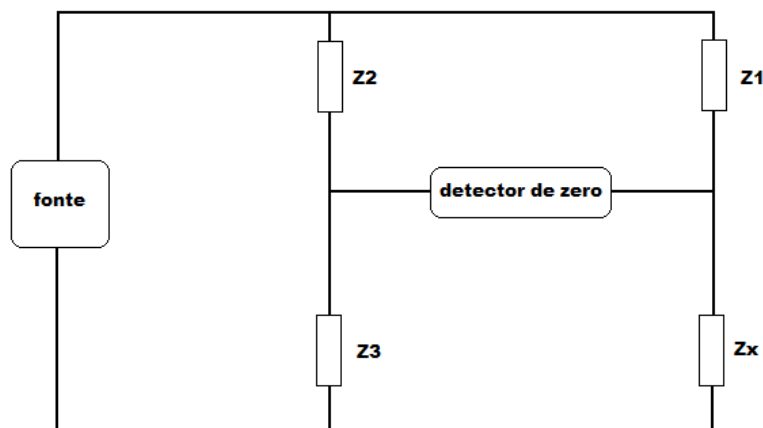


Figura 34: Esquema do método de medição por ponte

$$Z_x = \frac{Z_1 Z_3}{Z_2} \quad \text{(Equação 12)}$$

Portanto, se Z_1 ou Z_3 são impedâncias ajustáveis, elas podem ter seus valores modificados de tal maneira que haja o equilíbrio na ponte e a corrente no detector seja nula, condição na qual o valor da impedância desconhecida é obtido. Vários tipos de circuitos em ponte, utilizando componentes L, C e R

como elementos, são empregados para caracterizar a impedância desconhecida.

Como principal desvantagem do método, cita-se a necessidade de ajuste das impedâncias para que a condição de equilíbrio seja satisfeita, o que aumenta o tempo de execução da medição se um conjunto numeroso de freqüências de excitação deve ser usado, como é o caso dos ensaios de FRA. Além disso, tal necessidade dificulta ainda a construção de um equipamento automático de aquisição de medições, e impossibilita o ajuste fino dos elementos, aumentando o erro.

4.2.2 Método Ressonante

A Figura 35 mostra um esquema típico de montagem de um circuito que implementa o método ressonante. Quando um circuito é ajustado na ressonância através do capacitor C , o valor da impedância desconhecida composta por L_x e R_x é obtido pelo valor da freqüência de teste e pelos valores de C e fator de qualidade Q . Este último pode ser medido diretamente usando um voltímetro colocado em paralelo com o capacitor.

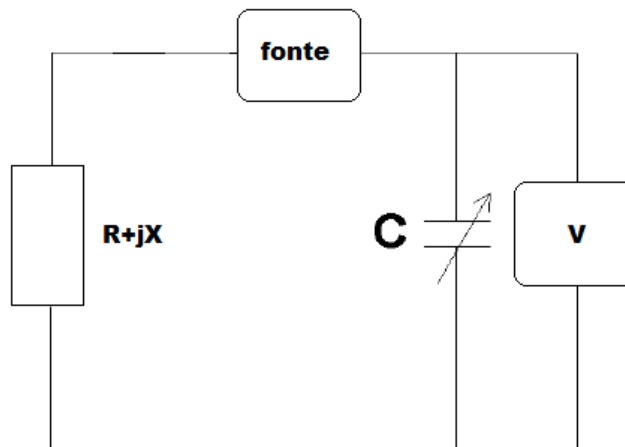


Figura 35: Esquema do método ressonante de medição

Para o caso dos ensaios de Resposta em Freqüência, a impedância desconhecida do enrolamento do transformador de potência seria representada por $R + jX$, e fonte seria a fonte de sinal que variaria de alguns Hertz a Megahertz.

O ajuste da capacitância C leva tempo, o que aumenta a duração total de ensaio quando várias freqüências de excitação devem ser usadas, como no caso dos ensaios de FRA. Além disso, assim como no método da Ponte de Wheatstone, o ajuste de componentes é feito de forma discreta, o que pode embutir erros de medição. De forma geral, é um método bastante útil, porém mais indicado para medições em laboratório.

4.2.3 Método I-V

Este é o método mais comumente utilizado para medições de impedância em geral, devido à enorme facilidade de implementação. Por não empregar componentes ativos no circuito de transdução, este método dispensa a preocupação adicional acerca da faixa de passagem e demais características

técnicas de componentes ativos, como amplificadores operacionais. Além disso, pelo fato de o elemento central da topologia de medição ser um resistor, a faixa de passagem de medição é geralmente muito alta, permitindo a medição na faixa do FRA (usualmente de 10 Hz a 10 MHz) com folga. Em linhas gerais, o método corrente-tensão de medição de impedância, para o caso dos ensaios de resposta em freqüência aplicada a transformadores de potência, consiste em:

- Aplicar uma tensão senoidal de baixa tensão e de freqüência variável a um terminal de um dos enrolamentos do transformador;
- Medir a tensão de entrada e a tensão de saída resultante da associação com uma ou várias impedâncias padrões diferentes de valor conhecido (um valor para cada escala de medição);
- Fazer a relação entre as tensões medidas no domínio da freqüência.

A Figura 36 ilustra a topologia de medição comumente utilizada para a realização de ensaios deste tipo. Nela, podem-se visualizar o transformador sob ensaio, a fonte de sinais e o elemento de medição. Os cabos de ligação podem ser coaxiais, desde que sejam tomados cuidados especiais, a serem discutidos posteriormente.

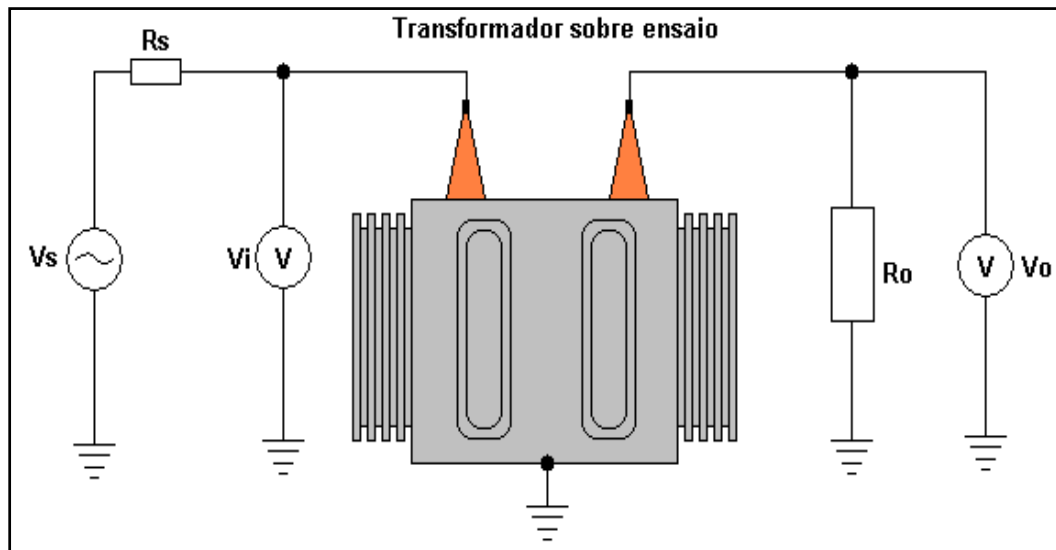


Figura 36: Esquema típico de medição de impedância utilizando o método I-V

Onde:

- Vs: Fonte de tensão de freqüência variável (amplitude em geral até 10 Vpp)
- Rs: Impedância de saída da fonte de tensão (50 Ω)
- Vi: Medida da tensão de entrada
- Vo: Medida da tensão de saída
- Ro: Impedância padrão (50 Ω ou outro valor compatível com a impedância medida)

O resultado final da medição pode ser apresentado na forma de módulo (ganho) e ângulo de fase, que são definidos respectivamente por:

$$K = 20 \log \left(\frac{|V_o|}{|V_i|} \right) [dB] \quad \text{(Equação 13)}$$
$$\theta = \angle V_o, V_i [^\circ]$$

A impedância propriamente dita pode ser obtida através de:

$$\frac{|V_o|}{|V_i|} = \frac{R_o}{R_o + Z} \Rightarrow Z = R_o \cdot \frac{|V_i|}{|V_o|} - R_o \text{ } [\Omega] \quad \text{(Equação 14)}$$

Algumas topologias variantes do método podem ser encontradas na literatura [19], embora guardem o mesmo princípio de medição. Para o caso da medição da impedância de enrolamentos de transformadores a topologia pode ser ligeiramente modificada para incluir resistências de casamento de impedâncias para os cabos de conexão. Podem ainda ser previstas estruturas de conexão especiais para ajuste às buchas de alta tensão, que têm em geral grandes dimensões físicas.

No geral é um método bastante prático e que fornece resultados confiáveis. O fato de não apresentar componentes ativos em sua construção representa uma facilidade prática muito grande, especialmente em montagens protótipo e testes preliminares.

4.2.4 Método da Análise de redes

O método da Análise de Redes se baseia na avaliação do coeficiente de reflexão, obtido pela medida da proporção refletida do sinal incidente no ponto de conexão da impedância desconhecida. Um acoplador ou ponte é utilizado para detectar o sinal refletido e um Analisador de Redes é usado para suprir e medir o sinal incidente (Figura 37). O método é mais indicado para medições em freqüências elevadas.

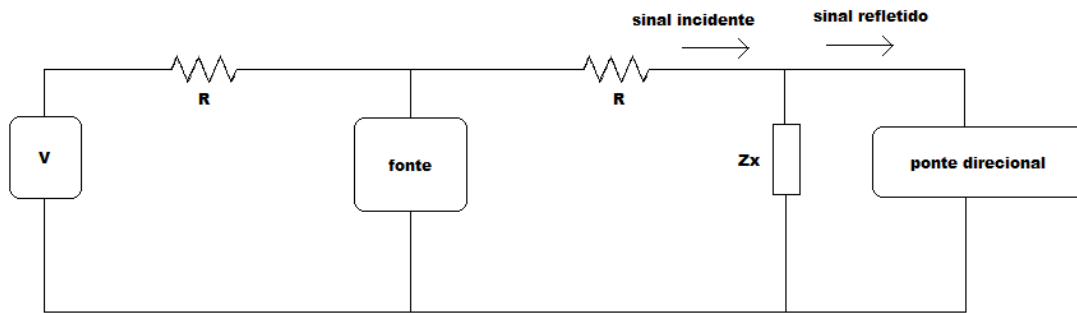


Figura 37: Esquema do método de Análise de Redes.

Para o caso dos ensaios de resposta em freqüência de transformadores o método é bastante limitado, justamente pelo fato de medir com razoável exatidão somente sinal de alta freqüência. Para o caso dos testes de FRA é necessária a caracterização do transformador segundo uma faixa que se inicia em alguns hertz, e isso não é possível usando-se o método da Análise de Redes.

4.2.5 Método da ponte auto balanceada

Uma variante um pouco mais elaborada em relação ao método I-V, do ponto de vista de circuitos, é a topologia de ponte auto balanceada. Nela, mede-se a impedância terminal através da relação entre corrente e tensão aplicada no equipamento. Nesse tipo de arranjo, verifica-se a necessidade de utilização de um componente ativo, o amplificador operacional, que tem o papel de promover um ponto de tensão virtualmente zero, realizando-se, com isso, uma medição referenciada à terra. Seu emprego tem como finalidade, além disso, a facilidade do ajuste da escala de medição através do controle do valor de um resistor de ganho. O esquema típico de montagem a ser realizado para a execução deste método é apresentado na Figura 38.

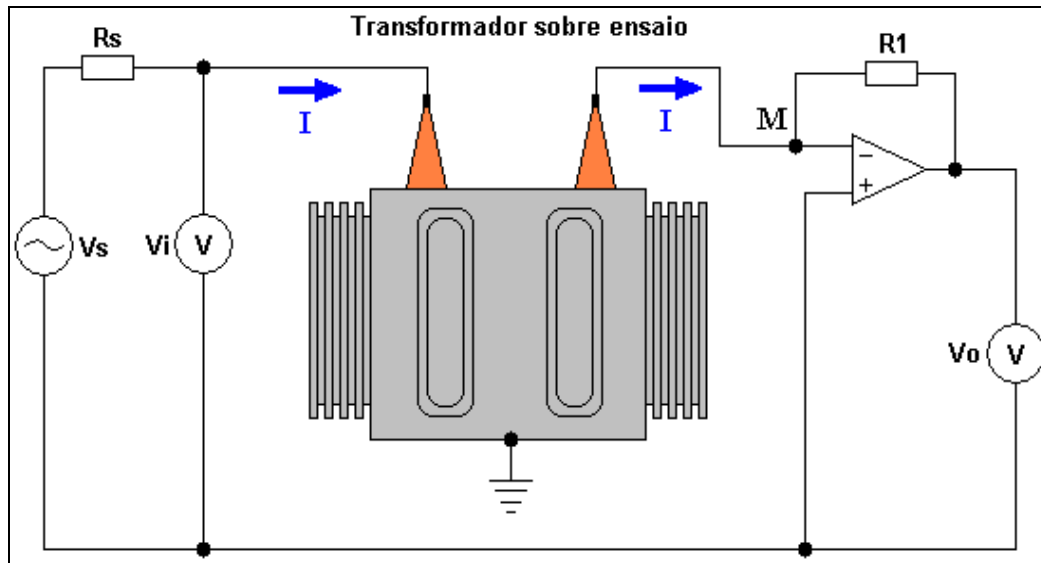


Figura 38: Esquema do método de medição utilizando ponte auto balanceada.

Onde:

- V_s : Fonte de tensão de frequência variável
- R_s : Impedância de saída da fonte de tensão (50Ω)
- V_i : Medida da tensão de entrada
- I : Corrente aplicada
- V_o : Medida da tensão proporcional a corrente

O funcionamento do arranjo anterior pode ser compreendido de forma simplificada. A tensão no ponto M é virtualmente zero, graças à ação do amplificador operacional que tende a manter a tensão diferencial igual a zero. Com isso, a medição sobre o enrolamento de interesse fica referenciada a terra. Uma vez que a corrente de entrada do amplificador é praticamente nula, a corrente que circula pelo enrolamento é igual em módulo à corrente pelo resistor R_1 . Desse modo a tensão V_o é proporcional à corrente I e o grau de proporcionalidade é R_1 , ou seja:

$$V_o = -R_1 \cdot I \quad \text{(Equação 15)}$$

Sendo que a impedância é obtida através da expressão:

$$Z = \frac{V_i}{I} \Rightarrow Z = \frac{V_i}{\frac{-V_o}{R_1}} \Rightarrow Z = -R_1 \cdot \frac{V_i}{V_o} \quad \text{(Equação 16)}$$

O fator de proporcionalidade, por se tratar de um resistor, pode ser alterado facilmente, tornando o método bastante flexível, pois faz a medida a dois terminais o que proporciona uma grande gama de combinações. Além disso, há a possibilidade de utilizar um terminal de guarda, o que proporciona uma medição muito refinada. Este método é mais indicado para a construção de um equipamento protótipo a ser usado em campo, embora cuidados adicionais relacionados ao projeto e construção da placa devam ser tomados, como o correto dimensionamento de componentes, blindagens, aterramento e um estudo de interferências.

4.2.5.1 Uso de multiplicadores

Em casos práticos de medição de impedância terminal de transformadores é comum se observar uma grande variação nos valores de impedância medida, desde dezenas de ohms a dezenas, ou centenas, de quiloohms. Portanto, para que seja possível medir tal faixa de variação com razoável precisão, algum sistema de escala deve ser usado [20].

Para o caso da ponte auto balanceada a faixa de medição pode ser selecionada, até mesmo de forma automática através do ajuste de ganhos dos

amplificadores operacionais utilizados, realizados de forma simples e rápida através do ajuste de determinados resistores, conforme mostrado na Figura 39:

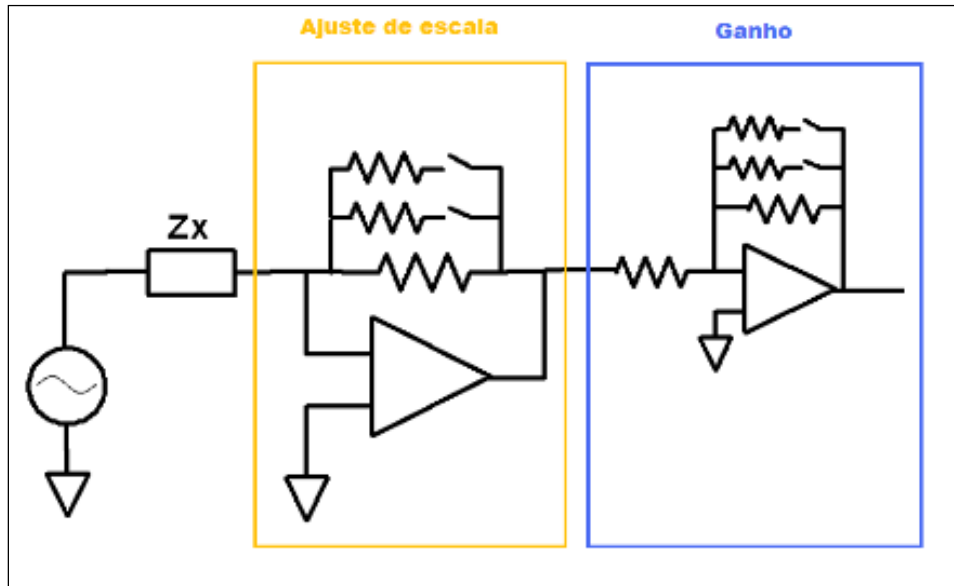


Figura 39: Uso de multiplicadores no método da ponte auto balanceada.

Isso possibilita que o sinal de medição tenha uma boa relação sinal ruído para toda a faixa de medição.

Para todas as faixas de medições disponíveis, o máximo de exatidão é obtido quando o valor de impedância a ser medido está próximo do valor de impedância de fundo de escala. O inverso também é verdadeiro, ou seja, o mínimo de exatidão é obtido quando o valor de impedância medido é muito menor que o valor de impedância de fundo de escala. Isso acarreta um salto na curva de impedância medida durante o decorrer do ensaio de FRA, conforme a Figura 40 nos mostra.

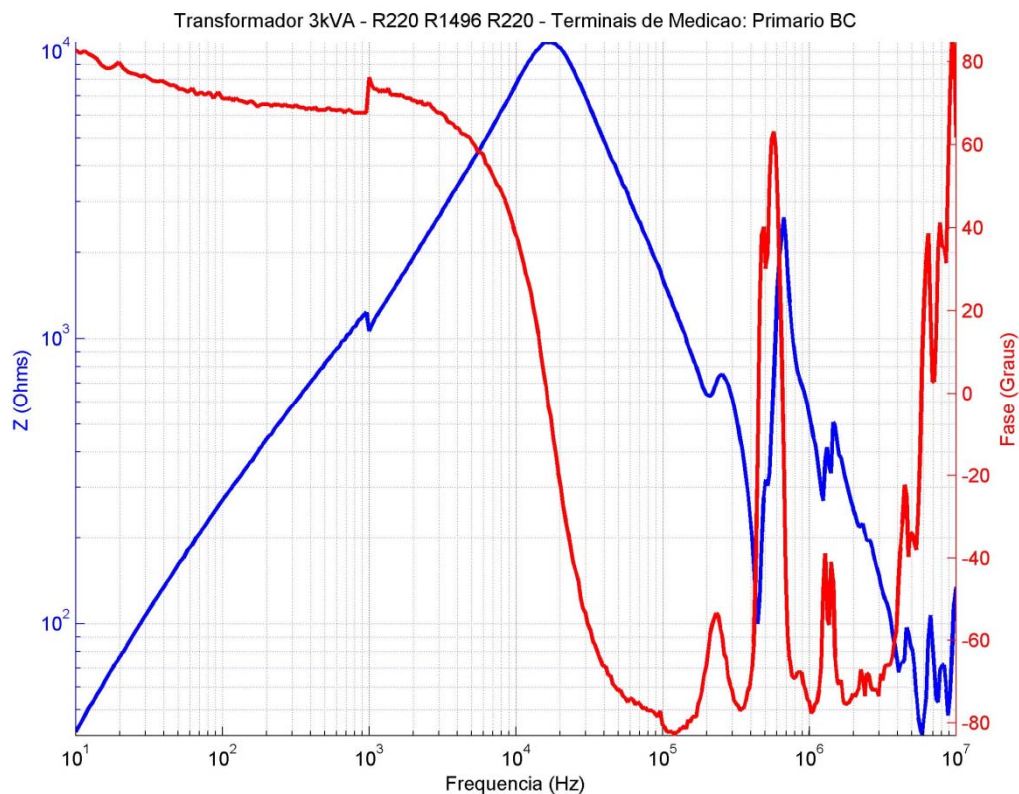


Figura 40: Descontinuidade na curva de FRA
Na frequência de 1 kHz nota-se uma descontinuidade tanto de módulo quanto de fase.

Como medida aplicável para solucionar tal problema, pode ser adotado um regime especial de mudança de escala que efetua sempre as medições numa faixa tal que o valor medido de impedância seja próximo do valor de impedância de fundo de escala, aumentando a exatidão da medição.

4.2.5.2 O terminal de guarda

Durante a medição de impedâncias na prática é muito comum se deparar com um arranjo de impedâncias composta de 3 elementos dispostos conforme a Figura 41, onde não se pode desconectá-los fisicamente. Por exemplo, para a figura, caso se queira medir a impedância Z1, as impedâncias Z2 e Z3 irão influenciar o valor de impedância medido. A corrente aplicada e a corrente medida serão iguais (Figura 41 e Figura 42).

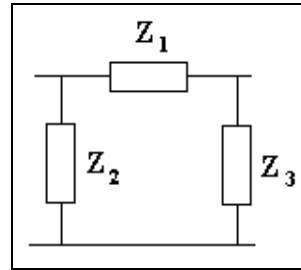


Figura 41: Rede de impedâncias prática.

Como pode ser observado na Figura 42, a medição obtida foi a impedância equivalente da associação entre as três impedâncias. Para eliminar esta dificuldade, sugere-se a utilização da estratégia de utilização de um terminal de guarda.

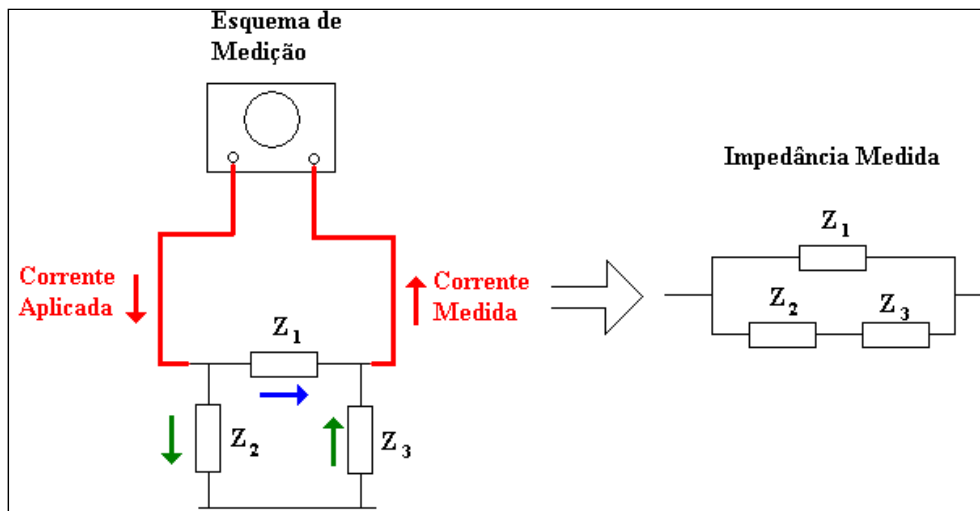


Figura 42: Medição de um elemento de impedância.

Segundo esta estratégia, e conforme pode ser observado na Figura 43, a corrente aplicada se divide em duas componentes que irão circular por Z_1 e por Z_2 . A componente que circula por Z_2 é desviada para a fonte através do terminal de guarda (G) e não passa pela seção de medida. Diz-se então que essa corrente foi “guardada”. A corrente que passa somente em Z_1 é a componente que será medida efetivamente pelo equipamento. Em Z_3 não há circulação de corrente, pois como já foi dito anteriormente a tensão no ponto M

é virtualmente zero e deste modo não há diferença de potencial para que haja corrente. Dessa forma, consegue-se isolar somente o trecho de interesse no circuito para a medição de impedância terminal.

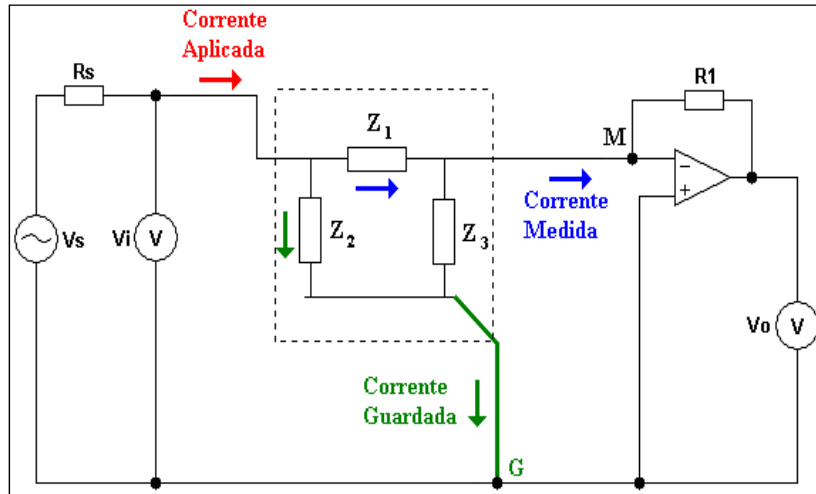


Figura 43: Ponte auto balanceada com terminal de guarda

No caso específico dos transformadores de potência, vários elementos poderiam ser guardados num ensaio de resposta em freqüência, como ilustra a Figura 44. Por exemplo, se o terminal de guarda fosse ligado no terminal de aterramento do transformador, as capacitâncias do enrolamento para terra e as devido às buchas seriam guardadas. Outro exemplo é guardar as impedâncias devido a outros enrolamentos, que poderiam interferir nas medições. A Tabela 8 apresenta um comparativo entre os métodos de medição de impedância citados anteriormente.

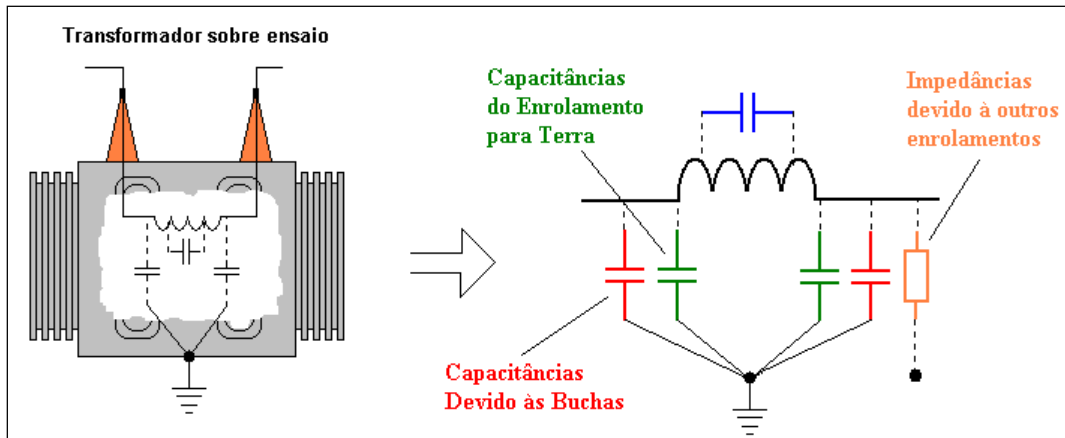


Figura 44: Ilustração dos elementos que poderiam ser “guardados” em um ensaio

Tabela 8: Comparativo entre métodos de medição de impedância

Método	Vantagens	Desvantagens
Ponte	Boa precisão; Alta faixa de freqüências; Baixo custo	Necessidade de ajustes manuais dos elementos da ponte a cada medição
Ressonante	Precisão para medições de altos fatores de qualidade Q	Necessidade de ajuste para alcance da ressonância; Baixa precisão para valores medidos de impedância
I-V	Medição referenciada à terra	Carregamento do gerador de sinais; Dificuldade de casamento de impedâncias no cabo
Análise de Redes	Alta faixa de freqüências; Boa precisão quando a impedância medida é próxima da impedância característica	Baixa faixa de valores de impedância medidos; Recalibração é necessária a cada troca de freqüência
Ponte auto balanceada	Alta faixa de freqüências; Boa precisão dentro de um alta faixa de valores de impedância medidos; Medição referenciada à terra	Projeto eletrônico deve ser feito com cuidado para que não haja limitação na banda de passagem do instrumento

4.2.6 Medição das Relações de Transformação entre Enrolamentos

A medição das relações de transformação é outra forma de caracterizar o transformador no domínio da freqüência. Esse tipo de ensaio permite avaliar as amplificações (ressonâncias) e atenuações ocorridas na relação de transformação entre enrolamentos ao longo da faixa de freqüências do ensaio. Os resultados podem ser apresentados de forma normalizada, tendo como base a relação de transformação nominal a 60 Hz.

Basicamente, este método consiste em aplicar uma tensão alternada (em geral de 10 Vpp) com freqüência variável em um enrolamento do transformador e medir a tensão transferida nos outros enrolamentos. A faixa de medição costuma ser o mesmo usado nos ensaios de medição de impedância terminal, ou seja, entre 10 Hz e 10 MHz. O esquema típico deste tipo de medição é apresentado na Figura 45, onde foi utilizado um gerador de funções para aplicar o sinal no enrolamento de alta tensão e um osciloscópio para medir a tensão no enrolamento de baixa tensão.

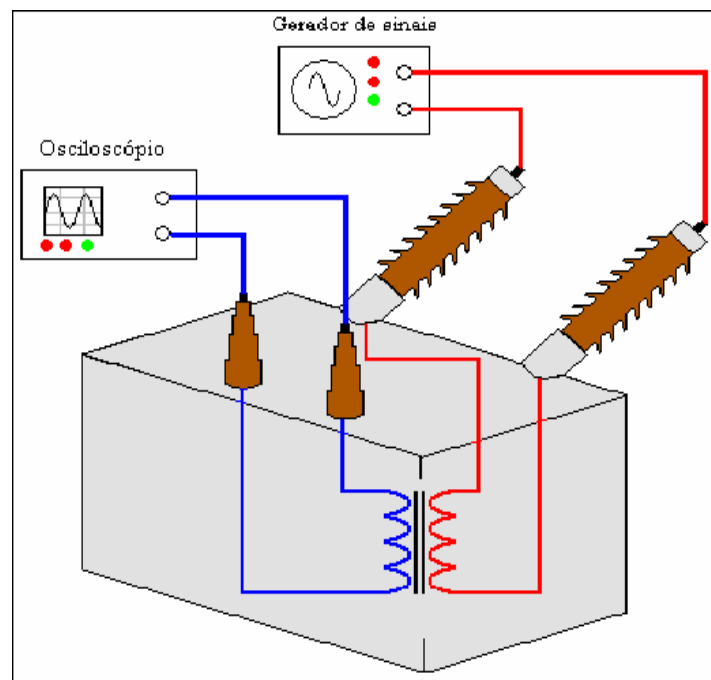


Figura 45: Esquema de medição de relação de transformação.

Para a realização do ensaio, o osciloscópio deve ser equipado com pontas de prova diferenciais para permitir a medição em enrolamentos distintos simultaneamente, uma vez que a referência de terra não é mais única. O esquema de ligação dos terminais do gerador de sinais e dos canais do osciloscópio pode variar muito de acordo com o transformador sob ensaio e as filosofias de teste adotadas. Por exemplo, pode-se medir a relação de

transformação entre o enrolamento ao qual se aplica o sinal e todos os demais enrolamentos, ou somente em relação ao enrolamento correspondente.

Em geral interessa obter a relação de transformação entre enrolamentos correspondentes por comparação com as condições nominais de operação. Tais enrolamentos têm uma particularidade construtiva que os caracteriza: são dispostos em um mesmo eixo ou braço do núcleo magnético do transformador, de modo que o fluxo magnético concatenado por um enrolamento seja concatenado ao máximo pelo outro enrolamento. A Tabela 9: Exemplo de correspondência entre enrolamentos Δ -Y Tabela 9 ilustra exemplos da correspondência entre os enrolamentos para um transformador com configuração delta (H) / estrela (L).

Tabela 9: Exemplo de correspondência entre enrolamentos Δ -Y

Correspondência	
X1-X0	H1-H3
X2-X0	H2-H1
X3-X0	H3-H2
H1-H3	X1-X0
H2-H1	X2-X0
H3-H2	X3-X0

Nos gráficos de resposta em freqüência é apresentada a relação entre o valor do sinal de tensão de saída e o sinal de tensão de entrada V_{out}/V_{in} em função da freqüência. Tal relação é normalizada para o formato por unidade

(p.u.) tendo como base a relação nominal para a posição considerada da chave comutadora.

$$V_{XBASE} = \frac{V_{Xnom}}{\sqrt{3}} \text{ e } V_{HBASE} = V_{Hnom} \quad \text{(Equação 17)}$$

As tensões nominais são obtidas diretamente da placa do transformador, e as tensões de base utilizadas para o processo de normalização são calculadas a partir das tensões sobre cada enrolamento. A Figura 46 exemplifica a determinação das tensões de base para o caso da ligação estrela em X (lado de baixa tensão) e a delta em H (lado de alta tensão):

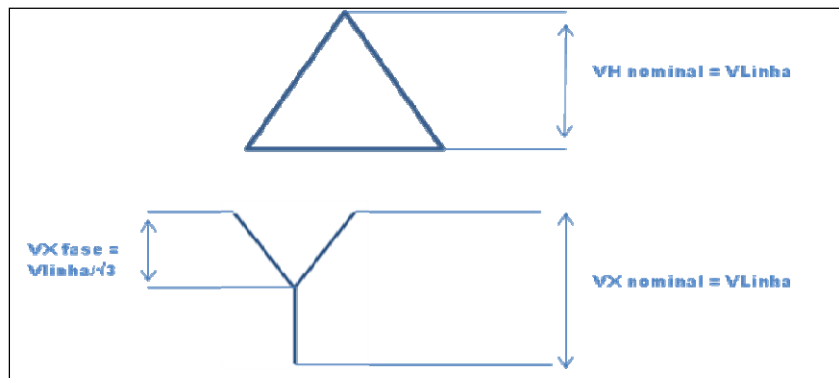


Figura 46: Exemplo de determinação das tensões de base para normalização

Se a aplicação é feita nos terminais de alta tensão (H) e a medição é efetuada nos terminais de baixa (X), a relação de transformação normalizada é expressa como:

$$V_{X/H} (p.u.) = \frac{V_{Xmedida} / V_{Haplicada}}{V_{XBASE} / V_{HBASE}} \quad \text{(Equação 18)}$$

Quando os terminais de aplicação estão localizados no lado de baixa com a medição na alta tensão, a relação de transferência normalizada fica:

$$V_{H/X}(p.u.) = \frac{V_{Hmedida} / V_{Xaplicada}}{V_{HBASE} / V_{XBASE}} \quad \text{(Equação 19)}$$

O resultado da medição é apresentado na forma de um gráfico que apresenta a relação entre as tensões de entrada e de saída na faixa de freqüência aplicada. A Figura 47 mostra um exemplo de resultado de medição deste método.

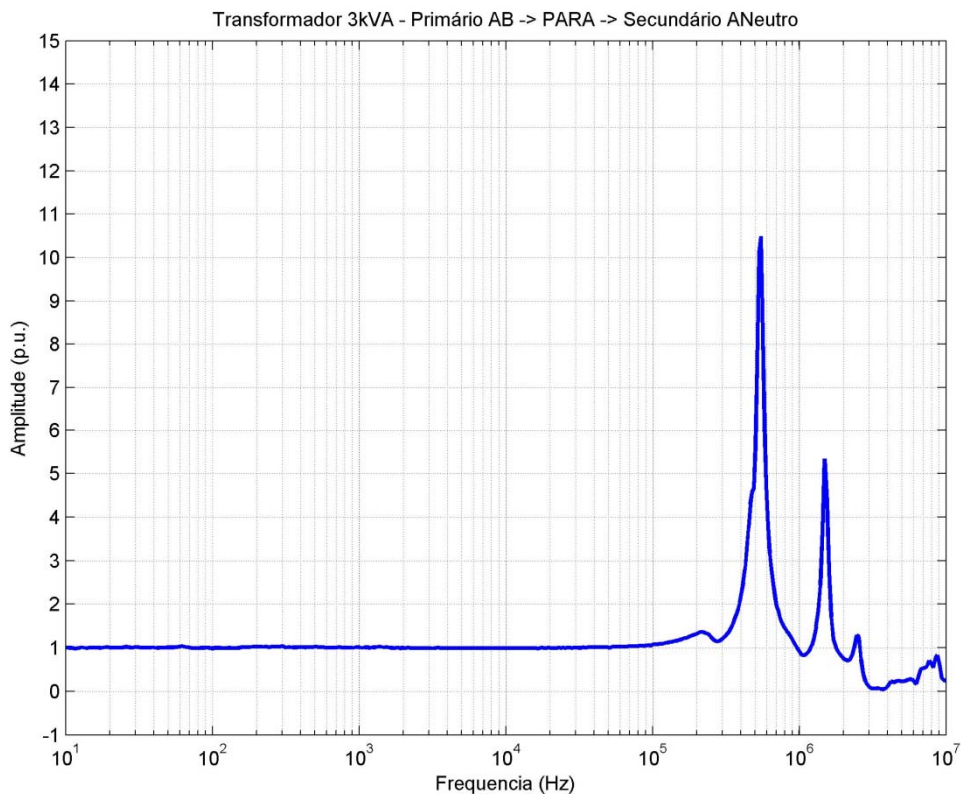


Figura 47: Resultado típico de medição de relação de transformação

Este método possui alguns inconvenientes práticos: mesmo sendo aplicadas tensões com níveis baixos, dependendo da tensão nominal do transformador e sua relação nominal, as tensões de saída podem ter níveis elevados principalmente nas freqüências de ressonância. Isto pode restringir ou mesmo impossibilitar a utilização do equipamento de medida (geralmente um

osciloscópio) que não suporta tensões elevadas, ou ainda o emprego de aparatos especiais, como um divisor de tensão. Além disso, os procedimentos de segurança para as pessoas que realizam o ensaio ficam mais rigorosos, demandando maiores custos de execução.

Contudo, espera-se que tal método de obtenção de resposta em frequência de transformadores pode fornecer informações importantes acerca do estado operativo do equipamento, por guardar implicitamente informações relacionadas à disposição mecânica dos enrolamentos em sua relação de transformação.

Este capítulo abordou duas filosofias de caracterização de transformadores de potência no domínio da frequência: a medição de sua impedância terminal e a medição de sua relação de transformação, para os vários enrolamentos. Embora cada uma delas possa guardar informações suficientes para o diagnóstico de faltas, o uso dessas técnicas de medição de resposta em frequência de forma complementar pode fornecer resultados ainda mais confiáveis.

No capítulo seguinte serão abordadas questões práticas relacionadas ao processo de aquisição da resposta em frequência de transformadores, tanto para medição de impedância terminal quanto para aquisição de sua relação de

transformação. Alguns problemas serão identificados e soluções serão propostas.

5

ESTUDOS DE PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO EM FRA

5.1 Introdução

A construção de um equipamento dedicado à automatização de ensaios de FRA em campo apresenta-se desafiador devido a uma série de questões de ordem prática e teórica. Se por um lado os aspectos construtivos do módulo de medição são relevantes, especialmente para medições em subestações (faixa de passagem dos componentes utilizados, taxas de *slew rate* dos amplificadores operacionais, projeto adequado da placa de circuito impresso, blindagem, aterramento, dentre outros), além de questões envolvendo cabos de conexão e metodologia de ensaio em si, nota-se uma carência de informações específicas sobre o tipo e o grau de influência de cada um sobre os resultados de medição. Além disso, a falta de uma metodologia específica e consolidada de trabalho dificulta a aplicação dos conhecimentos já adquiridos e os mais recentes de forma coerente, concisa e confiável.

A literatura técnica sobre o assunto em geral apresenta dados que descrevem resultados obtidos e suas análises e conclusões sem dar ênfase a questões práticas dos ensaios de FRA em si [5] [21] [22] [23] [24]. Tais questões envolvem o tipo de cabo utilizado e o comprimento, a configuração das conexões, a escolha da distribuição das frequências de teste na faixa do ensaio, a escolha dos resistores de *shunt* para medição de corrente, dentre outras.

Este capítulo traz informações relevantes relacionadas a tais aspectos práticos de medição tanto no que concerne aos equipamentos de aquisição e análise quanto no sentido de construção de uma base de conhecimentos sólida e coerente que possa constituir uma metodologia de aplicação de FRA.

5.2 Identificação e Análise de Fatores Críticos ao Sistema de Medição

Foi investigada em laboratório durante o presente projeto uma série exaustiva de fatores que podem ter influência expressiva sobre os resultados dos ensaios de FRA, afetando sua repetibilidade, exatidão e análise adequadas. Dentre eles, alguns se mostram críticos à aplicação de uma metodologia de FRA no sentido de degenerarem não só a qualidade das curvas resultantes, mas também a análise decorrente, levando a interpretações errôneas. Tais fatores são detalhados no decorrer deste capítulo.

5.2.1 Os cabos de conexão

Ensaio de FRA realizados em campo envolvem a transmissão de ida e volta de sinais de tensão de relativa baixa amplitude (em geral inferior a 10 V pico-a-pico) de baixa e alta frequência do equipamento de medição ao transformador de potência. Estes são equipamentos que têm porte elevado, em geral, o que exige a conexão de cabos de comprimento expressivo e estão localizados em um ambiente de subestação. Tais características conferem ao ensaio de FRA, que se baseia na repetibilidade dos resultados de medição, a necessidade do adequado dimensionamento dos cabos de conexão a fim de se minimizarem os efeitos de interferência gerados num ambiente tão complexo [25]. A Figura 48 mostra um ensaio de resposta em frequência realizado em laboratório durante esta pesquisa, onde se podem observar os cabos longos de conexão.



Figura 48: Testes com os cabos coaxiais

É comum se observar na literatura específica referências ao emprego de cabos coaxiais em ensaios de FRA [1] [26] [10]. Entretanto, testes realizados em laboratório indicaram que a utilização de cabos coaxiais longos (da ordem de 10 ou 20 metros) para a transmissão dos sinais de FRA entre os equipamentos e o transformador sob ensaio requer atenção especial a alguns cuidados:

- A utilização do cabo coaxial deve ser feita de modo que a malha externa condutora seja usada como retorno para a corrente de teste, ou seja, o cabo coaxial deve ser usado de forma a se tirar proveito de suas características de blindagem;

- Caso não seja necessário o retorno de corrente, a malha de blindagem deverá estar solidamente aterrada em apenas uma de suas extremidades;
- Se existir a possibilidade de utilização de cabos coaxiais curtos, estes devem ser priorizados. Esta situação pode ocorrer em sistemas onde os módulos de aplicação e aquisição de sinais estão localizados próximos às buchas de baixa e alta tensão do transformador sob teste. Nessas condições, observa-se que para cabos coaxiais de comprimento da ordem de alguns metros os efeitos de propagação de sinais rápidos (altas frequências) podem ainda ser desprezados. Testes realizados em laboratório mostraram ser aceitáveis os valores de tensão medidos com cabos de comprimento da ordem de um ou dois metros, sem que seja feito o devido casamento de impedâncias em suas extremidades.

Para a maioria das topologias de medição, os equipamentos envolvidos encontram-se distantes do transformador sob ensaio, o que justifica a adoção de cabos coaxiais longos. Nessas condições, observa-se que os efeitos de propagação para sinais de alta frequência são importantes. Considerando-se que o limite de frequência de um sinal de teste em um ensaio de FRA pode chegar a 10 MHz, o comprimento de onda associado é próximo de 30 metros, aproximadamente o mesmo comprimento dos cabos de medição utilizados, considerando-se ida e volta. Isto sugere, principalmente, desvios em fase nos resultados de medição. Além disso, reflexões sucessivas nas terminações, se

não for realizado um adequado casamento de impedâncias, pode levar a desvios de amplitude nas curvas de módulo, como mostrado na Figura 49.

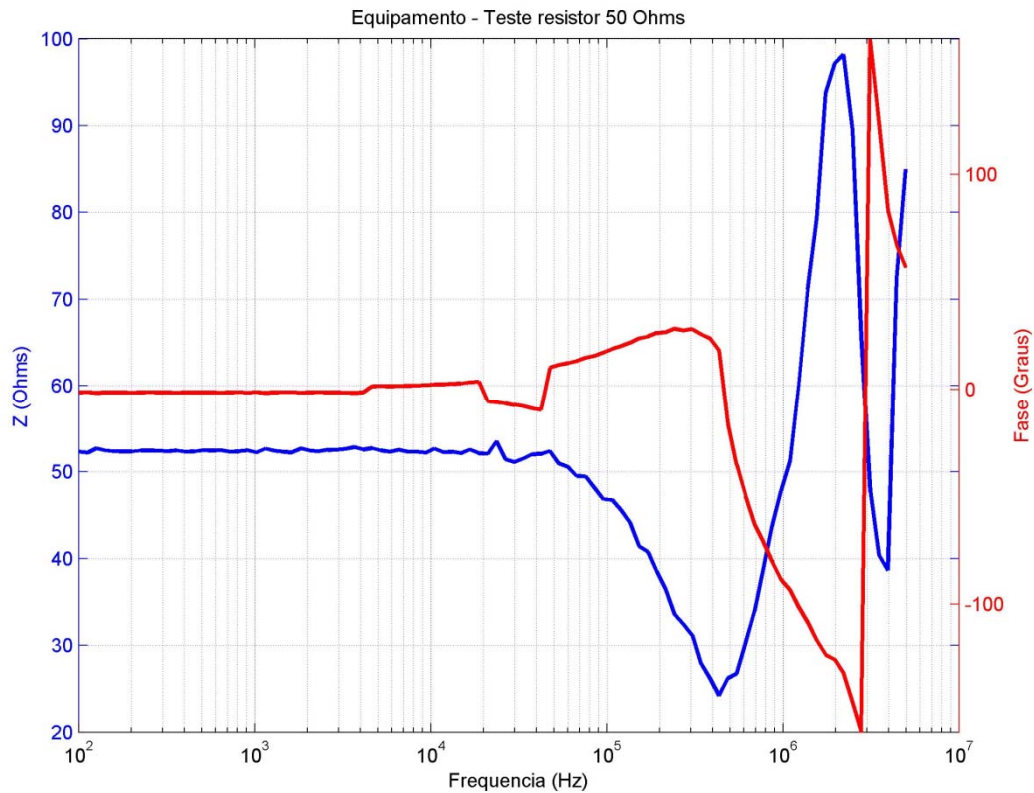


Figura 49: Desvio de impedância devido à falha na conexão

A Figura 50 e a Figura 51 ilustram os resultados de medição de módulo e fase da impedância sobre um resistor comercial de 27 Ω , utilizando-se um resistor de 22 Ω como *shunt* para medição de corrente. Os ensaios foram feitos em laboratório, utilizando-se cabos coaxiais de 50 Ω , um gerador de sinais e um osciloscópio 2 canais. Espera-se obter como resultado gráfico algo próximo de uma linha reta horizontal em torno de 27 Ω e fase próxima de zero. Contudo, utilizando-se cabos coaxiais longos (em torno de 15 metros) e sem casamento de impedâncias, observa-se o padrão de curva descrito na Figura 50:

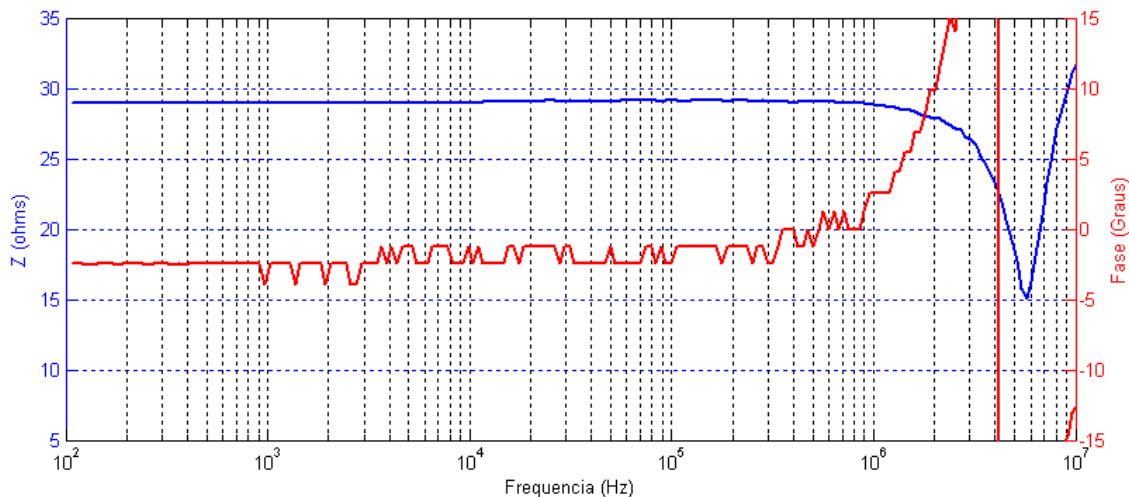


Figura 50: Medição sobre um resistor comercial de 27Ω utilizando-se cabos coaxiais longos para transmissão dos sinais

Se os cabos de ligação possuem influência mais pronunciada em altas freqüências, em baixas freqüências os erros observados na medição da fase da Figura 50 podem ser atribuídos à quantização do osciloscópio.

A quantização é um problema relacionado ao equipamento de aquisição, mas especificamente ao seu princípio de funcionamento no momento da amostragem do sinal. Como os desvios de ângulo de fase são muito próximos de zero e o algoritmo de detecção de passagem por zero é baseado no instante de tempo de duas amostras consecutivas e seu valor (n , $n+1$) para sinais muito próximos ou de alta freqüência erros ocorrem neste algoritmo, tornando imprecisa a detecção de mudança de fase, assim fazendo a medição de fase oscilar. Este problema também pode manifestar-se da mesma forma devido à resolução (*falta de bits*) do conversor A/D, porque a amplitude do sinal é muito pequena.

Quando a fase é próxima de zero o erro de medição tende a ser maior, e, por seu caráter aleatório, manifesta-se conforme observado na Figura 50.

Se nas mesmas condições os cabos longos são substituídos por outros de características idênticas, porém com comprimento da ordem de 1 metro, o resultado obtido é o que se pode verificar na Figura 51:

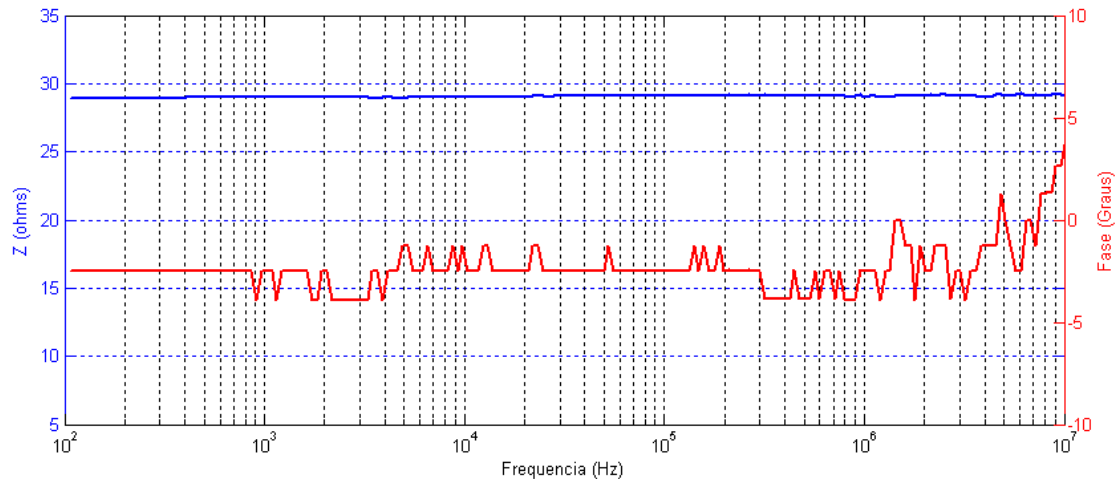


Figura 51: Medição sobre um resistor comercial de 27Ω utilizando-se cabos coaxiais curtos

Nota-se que os desvios causados pelos cabos são observados nas curvas de módulo e fase. Se o devido casamento de impedâncias é feito nos terminais dos cabos coaxiais longos, nota-se que os efeitos de reflexão de sinal são amenizados e a medição é mais coerente, pelo menos em módulo, conforme a Figura 52.

Um fenômeno observado nas figuras anteriores é a oscilação que a medição de fase sofre. Novamente, observamos os efeitos da quantização do sinal amostrado.

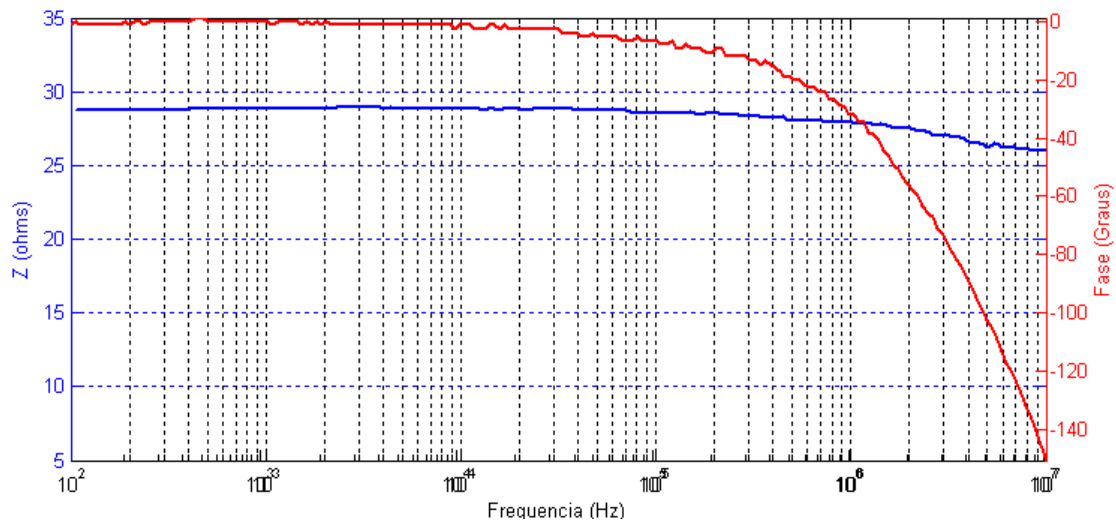


Figura 52: Medição sobre um resistor comercial de 27Ω utilizando-se cabos coaxiais longos com casamento de impedâncias nas extremidades

Os resultados anteriores ressaltam as dificuldades encontradas para a transmissão dos sinais de FRA, que variam numa faixa expressiva de frequências (de alguns Hertz a usualmente uma dezena de Megahertz) utilizando-se cabos longos coaxiais. Observa-se que os desvios em fase se mostram expressivos, e mesmo os desvios em módulo podem ser apenas atenuados através do casamento de impedâncias, e fica clara a forte dependência dos ensaios de resposta em frequência com relação ao comprimento dos cabos.

A Figura 53 ilustra os resultados de ensaios de resposta em frequência realizados em laboratório sobre um transformador trifásico de pequeno porte, 3 kVA. Os cabos de medição utilizados são coaxiais longos.

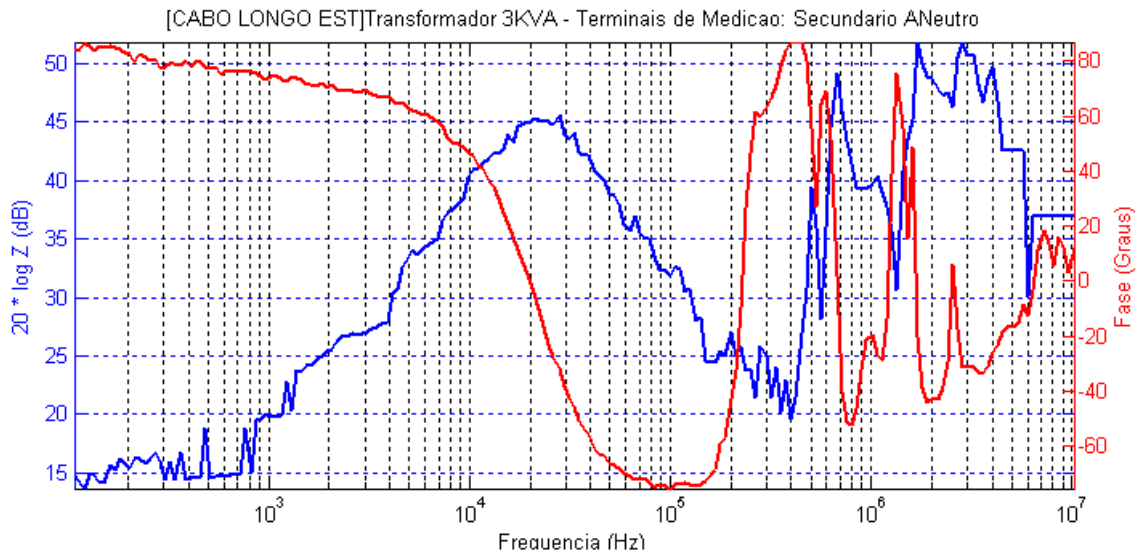


Figura 53: Exemplo de medição de impedância terminal em laboratório sobre um transformador trifásico, utilizando-se cabos longos.

Nota-se que os resultados obtidos com a utilização simples de cabos longos, sem nenhuma compensação, não deve levar a resultados com bons índices de repetibilidade. Os testes feitos até agora, representados pelas curvas apresentadas, levaram às seguintes conclusões:

- O uso de dois cabos longos coaxiais, onde apenas o condutor interno de cada cabo é utilizado, degrada fortemente as curvas medidas. Nessa configuração, até mesmo a disposição dos cabos (enrolado, esticado) pode trazer alterações significativas, prejudicando a repetibilidade dos resultados que é exigida nos testes de FRA;
- O melhor arranjo de medição é obtido utilizando-se os dois condutores de cada cabo coaxial, interno e externo. Essa é a configuração que menos degrada as medições, em especial para altas frequências;
- Ainda que o cabo coaxial seja utilizado de forma correta, se for longo (da ordem de dezenas de metros), este precisa ser casado para que

possa medir corretamente o módulo de impedâncias diferentes da sua impedância característica (50Ω). Isso requer a utilização de um terminador de 50Ω em cada extremidade do cabo.

Contudo, observa-se que a inserção de um terminador em cada extremidade do cabo tem o efeito de colocar em paralelo com o enrolamento a ser medido um resistor de 50Ω . Isso “*carrega*” o cabo, ou seja, mascara o verdadeiro valor da impedância medida. Além disso, torna-se necessário efetuar alguns cálculos para determinação do valor real da impedância do enrolamento, já que o valor medido pelo osciloscópio é, na verdade, o valor correspondente à impedância do enrolamento em paralelo com o terminador de 50Ω , o que deve ser levado em consideração na construção das curvas de módulo. Ainda vale observar que a fase continua a apresentar desvios em altas frequências, mesmo com estas correções, nestas condições.

5.2.2 Investigação das frequências de interesse nos ensaios de FRA

Os ensaios de FRA são baseados em comparações feitas entre curvas de resposta em frequência de enrolamentos de transformadores, seja em períodos diferentes de seu funcionamento, ou entre enrolamentos de outros transformadores idênticos. Embora existam índices numéricos que buscam avaliar o estado operativo do enrolamento sob ensaio, nota-se que os testes de FRA continuam ainda de alguma forma dependentes da análise visual e subjetiva de curvas de medição.

Nesse contexto, é de fundamental importância a adoção de uma metodologia de ensaio que contemple a escolha adequada do número e da distribuição das frequências de interesse dentro da faixa de medição de um ensaio de FRA, de modo a possibilitar a extração e análise de curvas de medição sem negligenciar detalhes importantes e indicativos de falta.

A literatura técnica sobre o assunto apresenta informações em geral superficiais acerca da escolha feita para as frequências de medição dentro a faixa de medição de um ensaio de FRA [21] [1]. Cada autor sugere um determinado número de pontos de medição para as curvas de FRA, bem como a seleção de frequências específicas, em geral distribuídas de forma a facilitar a visualização das informações em gráficos de escala logarítmica. Em [1], por exemplo, sugere-se a adoção de 100 pontos distribuídos de 10 Hz a 2 MHz. Já em [21], nota-se a utilização de 189 pontos de medição numa faixa de 20 Hz a 10 MHz. Contudo, nota-se que o assunto em geral não é tido como foco de questionamentos e testes no sentido de se definir uma escolha mais adequada ao ensaio proposto. Neste trabalho, estudos baseados em ensaios práticos de FRA sobre um transformador trifásico orientou a escolha de uma distribuição particular de pontos de medição que pudesse dar origem a um ensaio de FRA de boa legibilidade e relativa rápida execução

5.2.2.1 A distribuição de pontos

As curvas de módulo de impedância geradas em ensaios de FRA são em geral apresentadas em escala logarítmica em virtude da faixa expressiva de frequências (que vai, em geral, de alguns hertz, a uma dezena de megahertz).

Visando adequar a distribuição de pontos de forma a tirar proveito dessa forma de representação, sugere-se, assim como em [21], dentre outras referências, a adoção de uma distribuição logarítmica de pontos de medição na faixa de ensaio de FRA, conforme ilustrado na Figura 54:

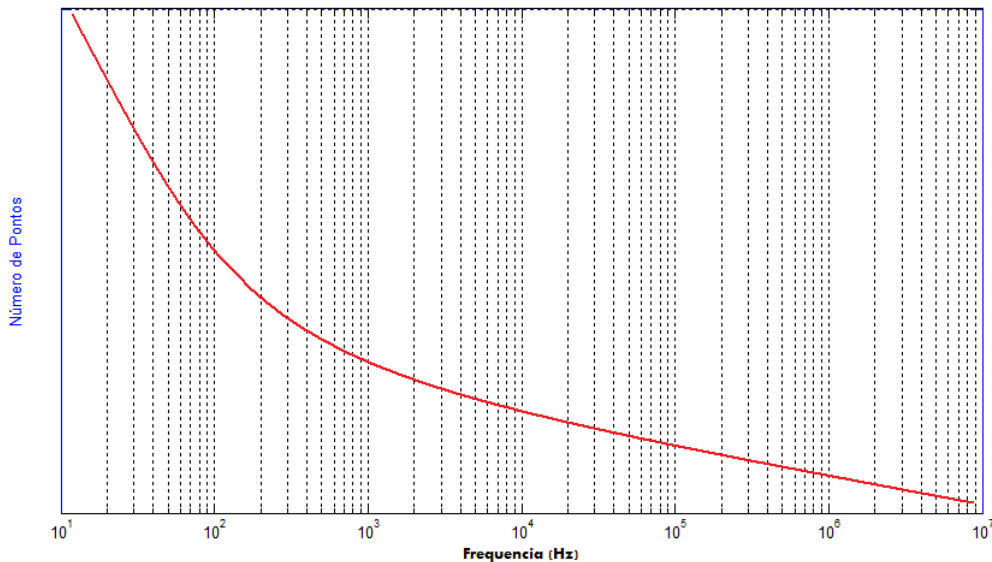


Figura 54: Distribuição de pontos sugerida ao longo da faixa de frequências encontrada em algumas referências.

Contudo, e conforme será tratado mais adiante neste trabalho, os diversos tipos de faltas passíveis de detecção via FRA podem se apresentar na forma de desvios nas curvas de medição que se manifestam em baixas, médias ou altas frequências. Logo, fica clara a deficiência deste tipo de distribuição de pontos se usada na sua forma original: a concentração de pontos de medição em baixas frequências em detrimento de frequências mais altas. Tal inconveniente é responsável pela dificuldade de uma correta visualização e comparação de eventuais picos de ressonância que possam se apresentar em frequências elevadas nas curvas resultantes dos ensaios, além de aumentar o tempo de execução por coletar um número maior de pontos em

baixas frequências, onde os sistemas de aquisição levam mais tempo para digitalizar os dados medidos.

Sugere-se então a modificação da forma original de se selecionar as frequências de interesse na faixa de medição. Mantém-se a forma logarítmica de distribuição por se contemplar o efeito gerado pela escala logarítmica dos gráficos, mas distribuem-se os pontos não ao longo da faixa como um todo, mas ao longo de cada década de frequências. Desta forma, obtém-se uma distribuição de pontos que é adequada à escala logarítmica ao mesmo tempo em que não privilegia baixas frequências. Além disso, permite a distribuição do número de pontos de medição por décadas. A Figura 55 ilustra a nova forma de distribuição logarítmica de pontos sugerida neste trabalho:

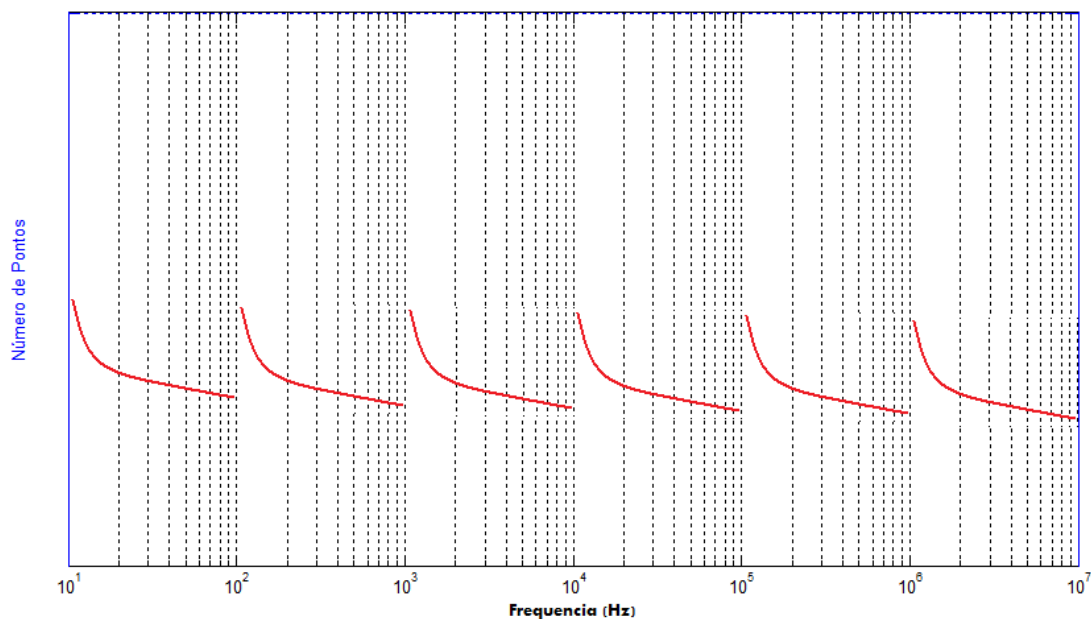


Figura 55: Nova distribuição logarítmica de pontos sugerida.

Segundo a nova distribuição, é possível selecionar-se o número de pontos de medição por décadas, e isto permite privilegiar faixas de frequência em específico onde o número de picos de ressonância é mais expressivo, em

geral, e com isso obter um melhor e mais claro detalhamento destas regiões. Esta escolha do número de pontos por década foi motivada por uma série de ensaios práticos.

5.2.2.2 O número de pontos por década

Dada a natureza subjetiva das análises de curvas de FRA, a qualidade visual das curvas resultantes, fortemente ligada ao número de pontos de medição dentro da faixa de frequências, é fundamental. Dois ensaios de FRA foram realizados em laboratório sobre um transformador trifásico de 3 KVA, o primeiro deles com uma distribuição de 100 pontos, logaritmicamente, de 10 Hz a 10 MHz, e o segundo, com 1000 pontos nas mesmas condições, ilustram o impacto do número de pontos sobre as curvas, conforme a Figura 56, Figura 57 e Figura 58. Nota-se que, para uma distribuição intermediária, usando-se 350 pontos, o resultado foi tão satisfatório quanto o que foi obtido com 1000 pontos, além de ter sido mais rápido por conter menos pontos de medição. Conclui-se que tal configuração é a mais adequada para os ensaios de *FRA* que se seguirão.

Nota-se que a definição de um número de pontos a ser utilizado nos ensaios de FRA deve levar em consideração a qualidade visual da curva gerada (riqueza de detalhes e picos de ressonância) e ao mesmo tempo não deve ser excessiva visando à geração de ensaios cuja duração não seja relativamente longa.

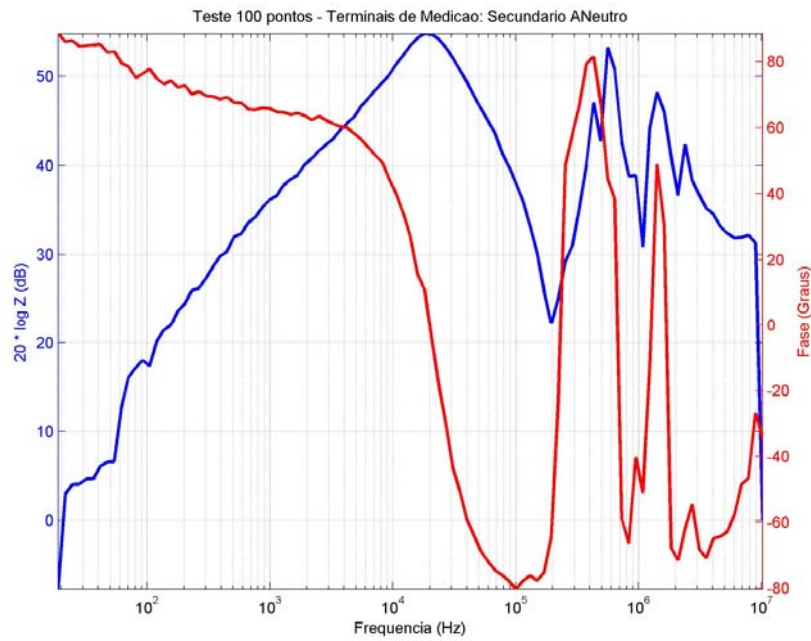


Figura 56: Distribuição de 100 pontos de medição ao longo da faixa de frequências.

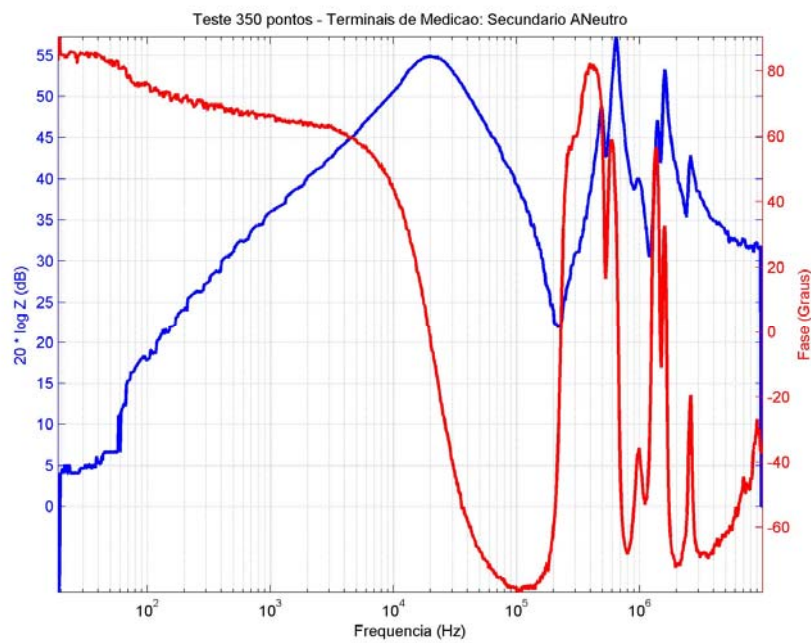


Figura 57: Distribuição de 350 pontos de medição ao longo da faixa de frequências

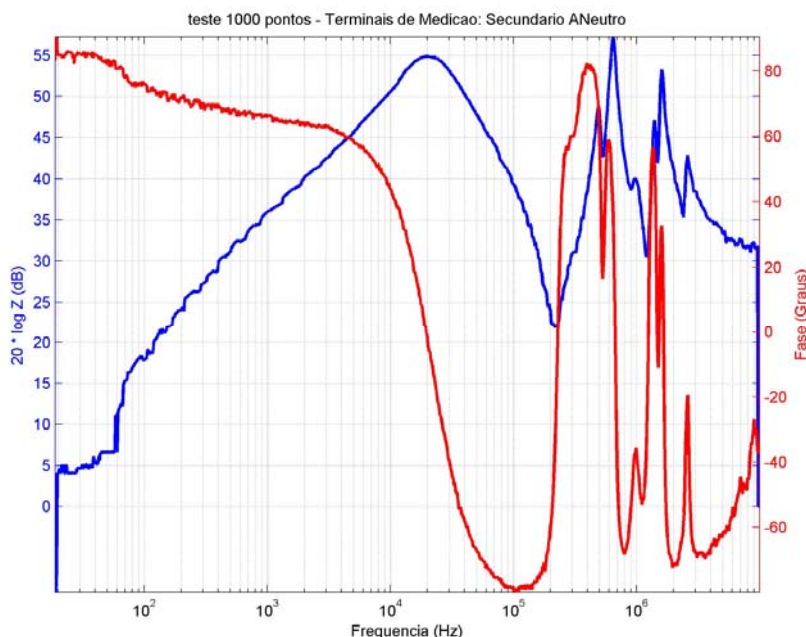


Figura 58: Distribuição de 1000 pontos de medição ao longo da faixa de frequências.

Segundo a literatura específica e ensaios de FRA realizados em laboratório ao longo deste trabalho, observa-se que os diferentes tipos de falta detectáveis nos ensaios de FRA (deslocamento de núcleo, curto-circuito entre espiras, dentre outros), manifestam-se majoritariamente em faixas de frequências específicas, tanto para transformadores de pequeno, quanto para os de maior porte [5] [9]. Além disso, observa-se que, de forma geral, o comportamento observado nas curvas resultantes de medições de FRA é mais rico em detalhes e nuances em frequências mais elevadas, onde se apresentam a maior parte dos picos de ressonância.

A escolha do número de pontos a se distribuir por décadas deve, portanto, ser tal que permita facilitar a visualização das diferenças causadas pelos diversos tipos de falta nas curvas de FRA ao longo de toda a faixa. Ao mesmo tempo, deve ser tal que privilegie, globalmente, frequências mais elevadas por apresentarem maiores detalhes.

Diversos ensaios qualitativos de FRA em laboratório foram feitos com o intuito de se escolher uma distribuição satisfatória, tendo-se em mente todas as questões citadas anteriormente. Da análise subjetiva dos resultados, sugere-se como distribuição padrão a escolha dos números de pontos por década relacionados na Tabela 10, tanto para os ensaios de medição de impedância terminal quanto para os ensaios de relação de transformação. Nota-se uma diferença entre as densidades de pontos por década entre as duas variantes de ensaio justificada pela escala de medição: nos ensaios de relação de transformação as amplitudes medidas são geralmente representadas em notação por unidade.

Tabela 10: Distribuição sugerida de pontos por década para ensaios de FRA.

	10 Hz – 100 Hz	100 Hz – 1 kHz	1 kHz – 10 kHz	10 kHz – 100 kHz	100 kHz – 1 MHz	1 MHz – 10 MHz	Total de pontos
Relação de transformação	30	45	55	70	85	70	355
Impedância terminal	35	55	55	60	75	75	355

5.2.2.3 Criação dinâmica adaptativa do vetor de frequências

A criação adaptativa do vetor de frequências é uma proposta inovadora e, com a sua implementação, trará um apreciável aperfeiçoamento na técnica do *sFRA*.

Ela tem como objetivo a escolha do melhor número de pontos por faixa de frequências em ensaios de FRA, tal que este seja sensível às variações relevantes em suas curvas de resposta em frequência. Criação de um algoritmo inteligente de distribuição dinâmica dos pontos de medição possibilitando o aumento automático da densidade de pontos de medição por trechos onde isto se fizer conveniente, como em regiões de ressonância.

5.2.2.3.1 A Motivação para a criação dinâmica do vetor de frequências

Testes de impedância terminal realizados sobre um transformador trifásico 3 kVA em laboratório durante o presente trabalho indicaram certa dependência entre a legibilidade das curvas de impedância terminal em relação à quantidade e à distribuição dos pontos de medição por faixa de frequência. Tal dependência revela-se importante para uma caracterização adequada de um teste de FRA, o que pôde ser verificado experimentando-se duas situações extremas de teste: distribuição pobre de pontos, isto é, um número notavelmente insuficiente para uma completa caracterização, e uma distribuição exageradamente rica de pontos, ambas empregando um espaçamento logarítmico. Como seria de se esperar, resultados indicaram uma perda de nuances, possivelmente importantes nas curvas obtidas quando os testes foram feitos utilizando poucos pontos, ainda que a distribuição tenha sido logarítmica, ao passo que a distribuição exagerada mostrou-se bastante completa, porém lenta, tornando impraticável o teste de FRA nessas condições.

Tendo-se em vista as condições citadas, torna-se conveniente determinar uma distribuição ótima dos pontos de medição, tanto quanto ao número de pontos utilizados quanto à melhor função de distribuição – espaçamento. Espera-se como boa alternativa uma função que concentre pontos de medição em regiões conhecidamente críticas ou que se suspeite ser

potencialmente visível uma alteração importante para o diagnóstico de uma falha.

É possível que estas regiões se encontrem na faixa de altas frequências nas quais se espera uma maior expressividade do efeito das capacitâncias internas do transformador, bem como alterações mais sutis do perfil da resposta em frequência de um enrolamento. Uma função de distribuição que privilegie a medição nesses pontos críticos pode se mostrar decisiva para um rápido e preciso diagnóstico de faltas, algo que pode variar de enrolamento para enrolamento, tornando difícil o estabelecimento de uma condição ótima de teste de FRA utilizando-se vetores ou funções estáticas de geração de frequências.

5.2.2.3.2 A proposta

Criação de uma rotina que permita uma criação dinâmica do vetor de frequências, gerando uma maior densidade de pontos de medição nas frequências em que ocorrem ressonâncias importantes de forma automatizada, como bases em parâmetros previamente fornecidos. Adicionalmente espera-se obter, além da melhor distribuição de pontos, um relatório de densidade indicando regiões críticas das curvas de resposta em frequência, tal qual possa ser analisado matematicamente e comparado a um banco de dados, gerando um resultado numérico, em uma dada escala, que possa servir de parâmetro preliminar para a identificação de uma eventual falta em um enrolamento.

5.2.2.3.3 A Estrutura Básica

Inspirando-se na estrutura adotada atualmente na compressão MP3 de arquivos de áudio, onde o *bitrate* é ajustado dinamicamente de acordo com o sinal de entrada a ser processado, pode-se idealizar uma estrutura capaz de ajustar automaticamente os passos de frequência em um teste de sFRA. Para isto, um histórico dos últimos cinco pontos medidos seria mantido em algum lugar da memória disponível e atualizado a cada medição.

Com base nos valores contidos nessas cinco medições e em parâmetros de sensibilidade ajustados previamente, fornecidos ao software provavelmente em uma rotina de inicialização ou calibração, pode-se construir um limiar de variação máxima da grandeza medida no teste que seja passível de atenção nível zero. Isso significa que enquanto as grandezas medidas variassem por uma quantidade menor que um Δ_0 em relação ao histórico de medições, um espaçamento maior seria dado aos intervalos de frequência, representando uma região de monotonicidade que não exige maior atenção.

A criação da escala de prioridade prosseguiria com os níveis de atenção 1,2,3,...,n, correspondentes a variações menores que Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 ,..., nas grandezas medidas em relação ao histórico de medições. Isso resultaria em uma variação quantizada dos degraus de frequência de acordo com a conveniência no momento da aquisição dos dados. A sensibilidade, que fora mencionada como parâmetro prévio, poderia se originar de testes empíricos ou mesmo de uma decisão do usuário, amparado por uma eventual suspeita ou pelo tempo máximo disponível para a execução de cada ensaio.

Um problema decorrente da formulação anterior vem do fato de se tornar impossível saber a priori o número de pontos requerido para um determinado ensaio de resposta em frequência, dado que a alocação dos pontos é dinâmica e limitada apenas pela sensibilidade máxima ajustada como parâmetro de entrada, o que pode ser impraticável. Propõe-se aqui a adoção de um estoque de pontos não utilizados tendo como base um número máximo de pontos de medição determinado pelo usuário, o que limitaria o tempo total de teste. Para tanto, um degrau padrão de frequência seria facilmente calculado e utilizado pelo software como parâmetro de comparação. A cada vez que o degrau utilizado fosse maior que o degrau padrão a reserva de pontos aumentaria, servindo como um estoque para a utilização em excesso (degrau de frequência menor que o padrão) nas regiões em que isso se fizer necessário. Com isso, créditos e débitos de pontos seriam computados durante a execução, estabelecendo-se um limite máximo de débito de pontos. Uma vez atingido este limite, faz-se parar a execução do programa com uma mensagem ao usuário relatando a impossibilidade de se completar o ensaio com a quantidade de pontos fornecida e a sensibilidade requerida, o que, naturalmente, depende de cada transformador sob teste. Neste momento, seria solicitado um número adicional a ser usado para completar o teste ou então a finalização da execução e a gravação em disco dos pontos medidos até então.

5.2.2.3.4 *Potencialidades da Técnica dos Vetores Dinâmicos*

O uso de uma estrutura dinâmica adaptativa como a que foi proposta aqui surge como uma alternativa favorável à caracterização mais robusta do

transformador sob teste, à medida que se ajusta a cada nuance previamente tida como importante e que apresenta um resultado que não negligencia qualquer dessas variações. Isso traria, à exceção dos erros possivelmente inseridos a partir dos meios de medição em si, uma assinatura verdadeiramente completa e descritiva de cada enrolamento.

A maleabilidade dos degraus de frequência utilizados contribuiria, nesse sentido, para que cada teste fosse individual e focalizado para as características de um transformador em específico. Isso contribuiria para a criação de mais um parâmetro numérico com base nos dados referentes a transformadores de um mesmo tipo: um índice que mede o desvio em relação ao comportamento esperado (baseado na distribuição de densidade de pontos, degraus de frequência, índices de atenção) uma vez que transformadores de mesmo tipo devem ter características muito semelhantes. Nesse sentido, índices e escalas poderiam ser construídos de forma a auxiliar na interpretação dos resultados de FRA, tornando-se mais uma ferramenta à disposição do especialista que daria noções básicas acerca das possibilidades de eventuais faltas.

5.2.3 Escolha dos resistores de shunt

Das técnicas comumente utilizadas para medição de impedância terminal (Filosofias de Medição e Obtenção da Resposta em Frequência), nota-se um amplo emprego de resistores *shunt* para medição de corrente nos ensaios de medição de impedância terminal em FRA. Por questões práticas, a utilização deste método, embora mais susceptível a erros de medição que o

método da ponte auto-balanceada, tem a vantagem de possuir simples implementação. Para que uma ponte auto-balanceada seja adequadamente utilizada, um projeto cuidadoso do circuito deve ser desenvolvido, principalmente com relação à faixa de passagem dos componentes utilizados e interferência eletromagnética. Além disso, o método de medição de impedância utilizando resistores *shunt* (método I-V) tem a vantagem de não ter elementos ativos que possam limitar sua banda de passagem, podendo medir frequências mais elevadas sem desvios significativos. Contudo, embora sua relativa facilidade de uso, o emprego de resistores *shunt* para medições de impedância terminal em ensaios de FRA deve respeitar certos cuidados. Vários ensaios de FRA em laboratório foram realizados fornecendo resultados que chamam a atenção para certos aspectos especiais que devem ser observados.

O primeiro deles está relacionado à forma de conexão dos resistores de *shunt*. De modo geral, sugere-se a adoção de conexões diretas às buchas de medição, se possível, ou através de cabos de menor comprimento e de mesma impedância característica dos cabos de transmissão de sinal. Isto minimizaria os efeitos de reflexão nas interfaces e preveniria os efeitos de propagação de sinais em cabos longos discutidos neste capítulo.

Além disso, recomenda-se a utilização de resistores de precisão, com a verificação de que mantenham suas características puramente resistivas ou com desvios aceitáveis ao longo da faixa de frequências dos ensaios de FRA. Essa faixa está entre 10 Hz e 10 MHz, em geral.

Ainda com relação às medições de impedância de enrolamentos de transformadores pelo método I-V, recomenda-se a troca sistemática dos resistores de *shunt* ao longo do ensaio por valores compatíveis aos valores de impedância medidos. Este procedimento é justificado pelo fato de a impedância do enrolamento de um transformador, mesmo de pequeno porte, variar significativamente ao longo de um ensaio de FRA. Para frequências baixas, nota-se que a impedância do enrolamento sob medição pode variar de unidades de ohms a unidades de quiloohms, por exemplo. O efeito de utilizar-se um resistor de shunt de valor excessivamente pequeno, se comparado ao elemento sob medição, é o de tornar a medição mais susceptível a ruídos, por se medir um valor de tensão de baixa amplitude.

Recomenda-se a troca dos resistores de *shunt* segundo um critério de sensibilidade a ruídos. Como os sinais envolvidos nas medições de impedância terminal são senoidais, pode-se determinar a qualidade do sinal medido através da distorção harmônica total da forma de onda de tensão medida sobre o resistor de *shunt*, e orientar a troca do resistor por um de maior valor, durante o ensaio. Além disso, tal avaliação pode ser feita através da criação de limiares inferiores de amplitude de tensão medida consideradas como aceitáveis.

5.2.4 A escolha da escala de apresentação de curvas de medição

Baseadas em diferenças entre curvas de resposta em frequência de enrolamentos, as técnicas de FRA são ainda dependentes da análise visual das curvas de medição geradas para a correta identificação de faltas, embora índices numéricos já tenham sido utilizados em algumas citações [11], [12].

Portanto, um cuidado especial com relação ao formato de apresentação dos resultados é desejável no sentido de facilitar a análise dos resultados de ensaio, e neste escopo, a escolha da escala utilizada nos gráficos é importante.

A literatura técnica sobre o assunto utiliza formas variadas de apresentação dos resultados de medição de impedância terminal e de relação de transformação. Contudo, é comum o emprego de escalas logarítmicas para a representação das amplitudes de impedância terminal medidas, conforme [5] [21], [10], por exemplo. Da mesma forma, observa-se comumente o emprego de notação por unidade para a construção de gráficos de relação de transformação em FRA [27].

Independentemente das escalas adotadas, os desvios eventualmente observados nas curvas resultantes do ensaio existem e podem ser indicativos de falta. O que muda é que o desvio existente pode ser mais ou menos evidenciado pela escala utilizada.

Os ensaios envolvendo medições de impedância terminal apresentam uma variação de valores medidos que vai de algumas unidades de Ohms a várias centenas de quiloohms. Isto sugere como é comum de se observar em curvas deste tipo, a adoção de escalas logarítmicas para representação dos valores. Alguns autores preferem utilizar escalas lineares, porém com a curva de módulo de impedância expressa em decibéis (dB), como em [10]. Durante o presente trabalho, resultados práticos de medição de impedância terminal em transformadores de pequeno e médio porte, em laboratório, indicaram ser adequada esta forma de representação, por permitir, de fato, uma melhor

distinção de picos de ressonância, especialmente em altas frequências (Estudos de Caso). A Figura 59 e a Figura 60 ilustram os resultados obtidos com os dois tipos de escalas de representação.

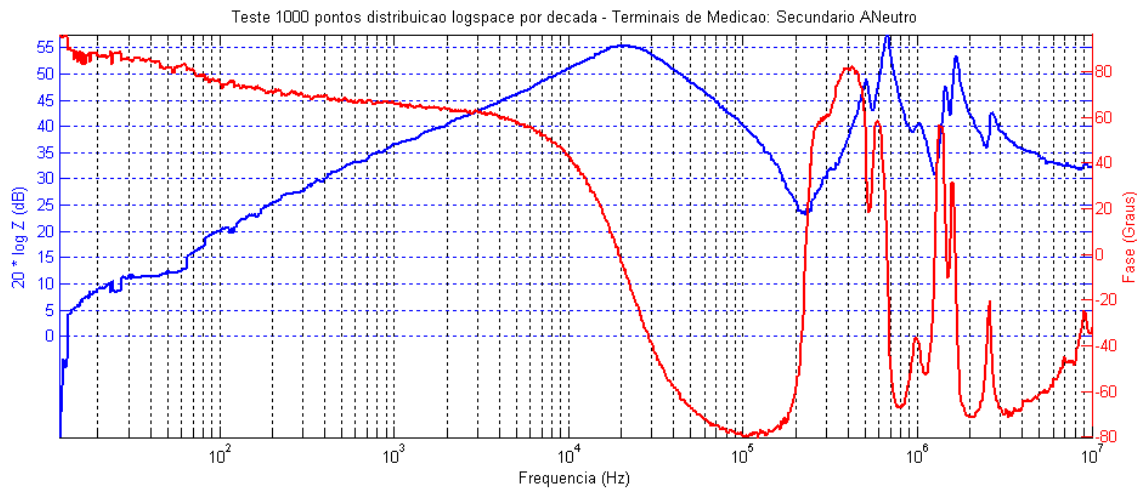


Figura 59: Ensaio de medição de impedância terminal em laboratório.

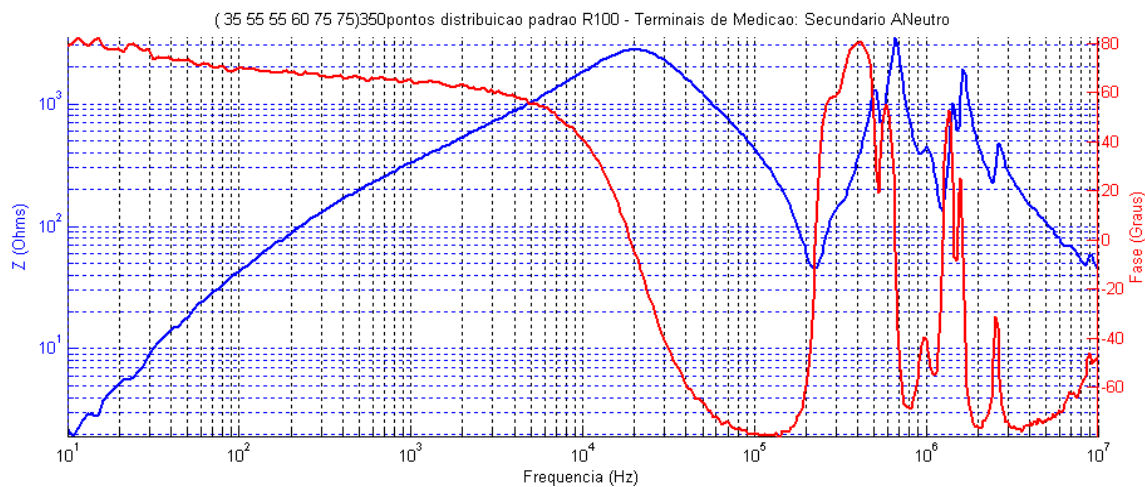


Figura 60: Medição de impedância terminal em laboratório.

Ensaio de relação de transformação, quando expressos em p.u., permitem uma rápida avaliação do estado operativo do enrolamento por fornecer, de imediato, o valor esperado da relação de transformação: o valor unitário. Além disso, permite uma avaliação de frequências específicas de funcionamento que correspondem a picos de elevada relação de transformação, e com isto avaliar o impacto de componentes de frequência

gerados por chaveamentos de dispositivos próximos ao transformador sobre sua vida útil. Contudo, esta forma de representação pode dificultar a identificação de desvios entre as curvas de FRA e mascarar faltas.

Vários ensaios de relação de transformação foram executados em laboratório envolvendo transformadores de pequeno e médio porte. De uma forma geral, nota-se que a representação dos resultados correspondentes em escala logarítmica, assim como nos ensaios de medição de impedância terminal, fornece curvas de mais fácil identificação de desvios. O ato de normalizar as curvas resultantes e posteriormente compará-las sob o mesmo par de eixos tem o efeito de minimizar os eventuais desvios.

A Figura 61e a Figura 62 ilustram o efeito da representação em escala logarítmica sugerida neste estudo para ensaios de relação de transformação. Nos dois casos, as curvas representam a sobreposição das relações de transformação medidas entre o enrolamento primário AB e secundário AN de um transformador trifásico de 3 kVA, conectado em delta-estrela em laboratório e usando gerador de sinais e osciloscópio, com cabos de conexão curtos (em torno de 1 metro de extensão). No primeiro cenário o transformador está intacto, e no segundo caso foi feito um breve afrouxamento dos parafusos que mantinham presas as lâminas do núcleo, simulando um deslocamento de núcleo. As demais condições são as mesmas, assim como o aparato experimental. Nota-se que quando as curvas são comparadas utilizando-se a escala em notação por unidade, os desvios observados são mínimos. Contudo, quando os dados são apresentados em escala logarítmica, observa-se que

algumas diferenças entre os picos de ressonância em alta frequência são evidenciadas, o que pode facilitar a análise.

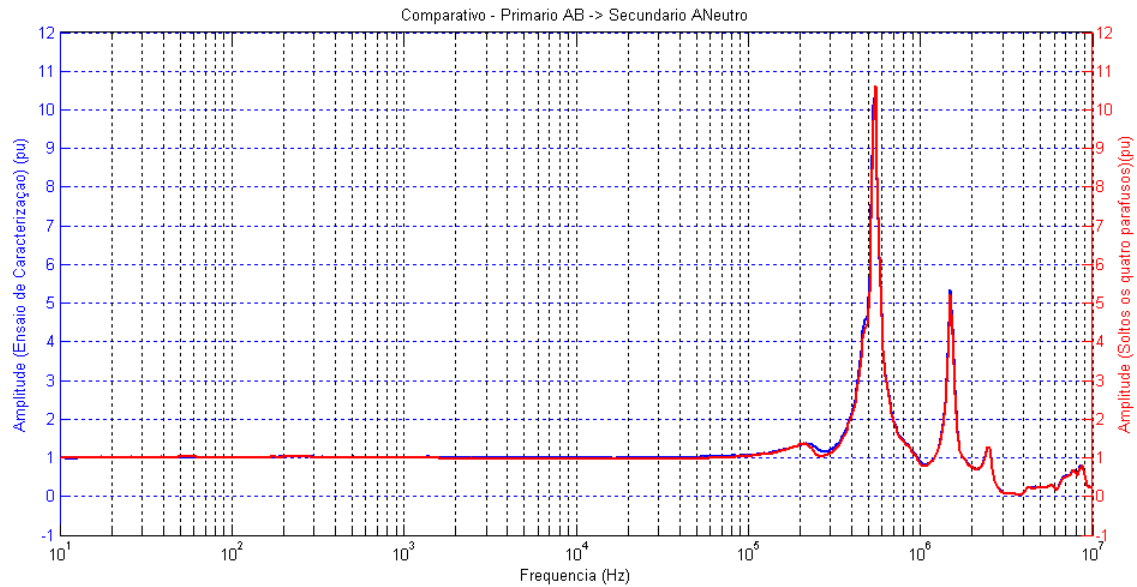


Figura 61: Resultado comparativo de relação de transformação para um ensaio de indução de faltas

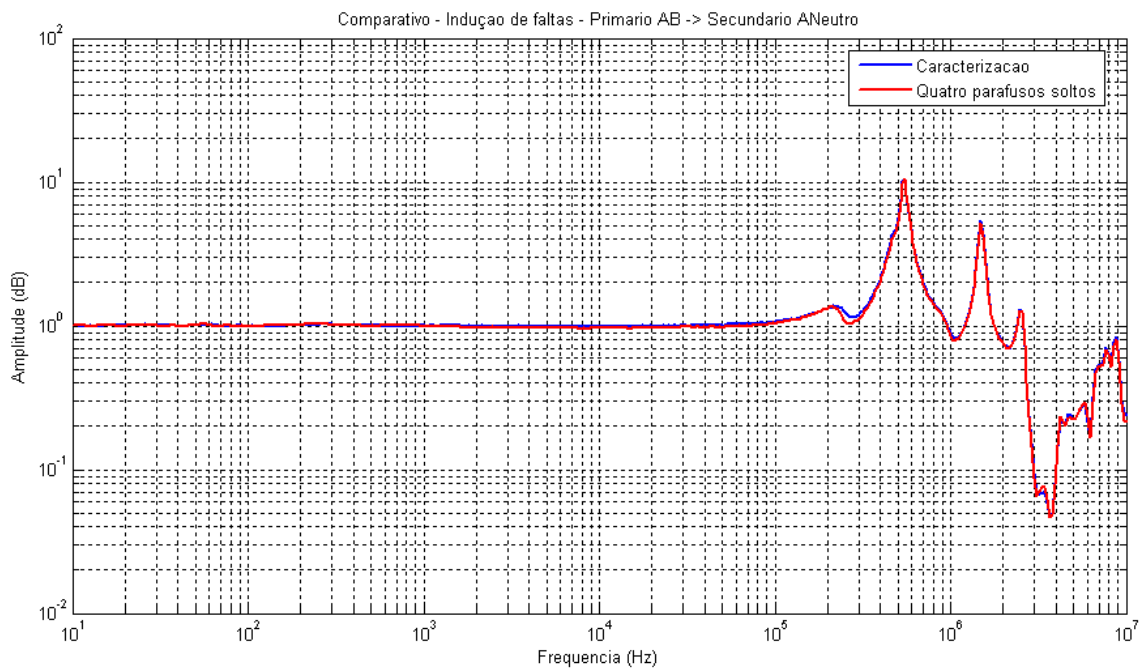


Figura 62: Mesmo resultado da figura anterior

5.2.5 A preparação do transformador para ensaio

Um cuidado adicional identificado durante os ensaios de FRA em laboratório diz respeito à preparação do transformador antes da execução dos ensaios. Resultados práticos indicaram que não basta que o transformador esteja desenergizado, é preciso que ele esteja completamente desconectado do sistema, ou seja, suas buchas devem estar livres. Qualquer conexão aos barramentos deve ser desfeita antes da execução dos ensaios.

Este procedimento se justifica pelo fato de tais conexões, mesmo inativas, se comportarem como antenas e causarem, em altas frequências, a irradiação e a captação de sinais, alterando a resposta do transformador e conseqüentemente a análise decorrente.

Tal alteração pode ser crítica, dependendo das condições, pois a alteração das curvas de FRA pode se tornar tão expressiva que induza a um diagnóstico indevido de falha. A Figura 63 a seguir ilustra o resultado de ensaios de FRA em módulo e fase realizados em laboratório sobre um pequeno transformador trifásico, 3 kVA, isolado a papel. Nos dois casos, o transformador sob ensaio é mantido nas mesmas condições, exceto pela presença de cabos de conexão ligados ao secundário, porém abertos em suas extremidades, simulando o efeito de conexões aos barramentos em transformadores de potência. O que se pode observar é um desvio, principalmente em altas frequências, o que afeta diretamente o diagnóstico. Tal condição é inaceitável para uma metodologia de FRA, que se baseia na repetibilidade dos resultados para mesmas condições de ensaio.

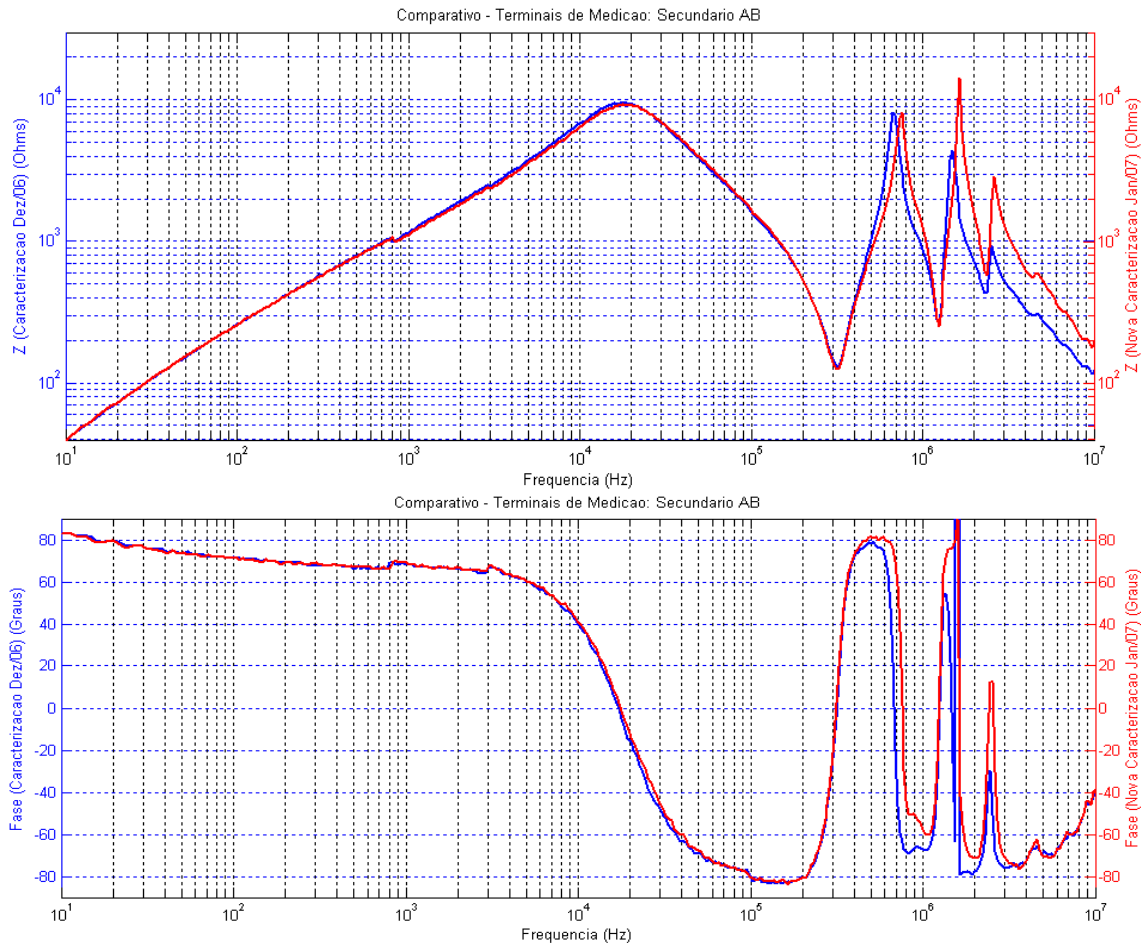


Figura 63: Comparativo entre ensaios de caracterização com e sem cabos terminais no secundário

A Figura 64 mostra como os cabos terminais de ligação, que dão acesso aos terminais do secundário, estavam conectados no momento do ensaio. Destaca-se que eles estavam isolados nas extremidades.



Figura 64: Fotografia mostrando o esquema de ligação dos cabos terminais de conexão.

5.3 Outros Ensaios complementares

Os ensaios descritos nos itens anteriores abordaram aspectos que têm influência comprovada experimentalmente sobre os resultados de medição e que devem ser levados em consideração para a construção de uma metodologia de ensaio. Além destes, uma série de outros ensaios foram feitos de forma a dar suporte às conclusões então apresentadas e que são descritos nos itens que se seguem. Tais ensaios confirmam ou suportam conclusões gerais sobre a metodologia discutida neste capítulo.

5.3.1 Ensaios sobre o equipamento de aquisição de FRA

O presente projeto de pesquisa conta com um módulo de medição de impedância terminal desenvolvido durante a execução do projeto de pesquisa

anterior, que iniciou a presente linha de pesquisas no ramo de FRA e teve como principal foco a construção de um dispositivo automatizado de aquisição de curvas de FRA. Tal trabalho apresentou também diversos avanços relacionados à modelagem dos enrolamentos do transformador no domínio da frequência usando componentes discretos [18].

O equipamento desenvolvido tem seu funcionamento baseado no método de medição de impedância através de ponte auto balanceada com terminal de guarda disponível, e tem como principal vantagem o automatismo do processo e sua portabilidade, o que o torna indicado para o uso em campo. Diversos ensaios em subestação foram realizados utilizando-se tal equipamento e seus dados suportaram enormemente as conclusões e análises feitas neste trabalho, fornecendo um panorama geral sobre o comportamento real de transformadores de potência do ponto de vista de FRA dos mais variados tipos, sejam de alta tensão ou potência, sejam para tipos menores.

O módulo consiste basicamente de uma unidade de pré-aquisição dos sinais capaz de realizar também a troca automática de escala, que é conectada a uma CPU e ao enrolamento sob ensaio através de cabos coaxiais. Através da utilização de uma CPU equipada com módulos de geração de sinais e osciloscópio, é possível realizar toda a aquisição dos dados e armazená-los diretamente em um disco rígido. Para o controle do hardware, um software em ambiente *LabView* foi desenvolvido e se mostra disponível ao usuário com certa facilidade de uso.

A partir dos avanços obtidos com o presente P&D, algumas considerações acerca do funcionamento do equipamento em questão devem ser levadas em conta, principalmente a questão dos cabos de ligação utilizados. Tais considerações afetam diretamente a exatidão das medições feitas em campo utilizando-se tal instrumento e devem ser analisadas com cuidado a fim de se evitar conclusões e diagnósticos equivocados sobre as curvas de FRA obtidas.

O ensaio descrito a seguir ilustra a realização, em laboratório, de um ensaio utilizando-se o equipamento de medição de FRA da impedância de uma associação paralelo de dois resistores idênticos de 100Ω , totalizando 50Ω . A conexão foi realizada através dos cabos que acompanham o módulo de aquisição, e são os mesmo cabos utilizados para as medições realizadas em campo, que têm a impedância característica de 50Ω . Logo, pela utilização de um resistor de 50Ω no lugar da impedância desconhecida do enrolamento, espera-se reduzir os efeitos de reflexão na interface cabo-resistor. A medição da impedância foi realizada de 100 Hz a 1 MHz, e espera-se obter um valor medido próximo de 50Ω em toda esta faixa, por se tratar de uma resistência, e fase próxima de zero. Contudo, o resultado obtido é exibido na Figura 65.

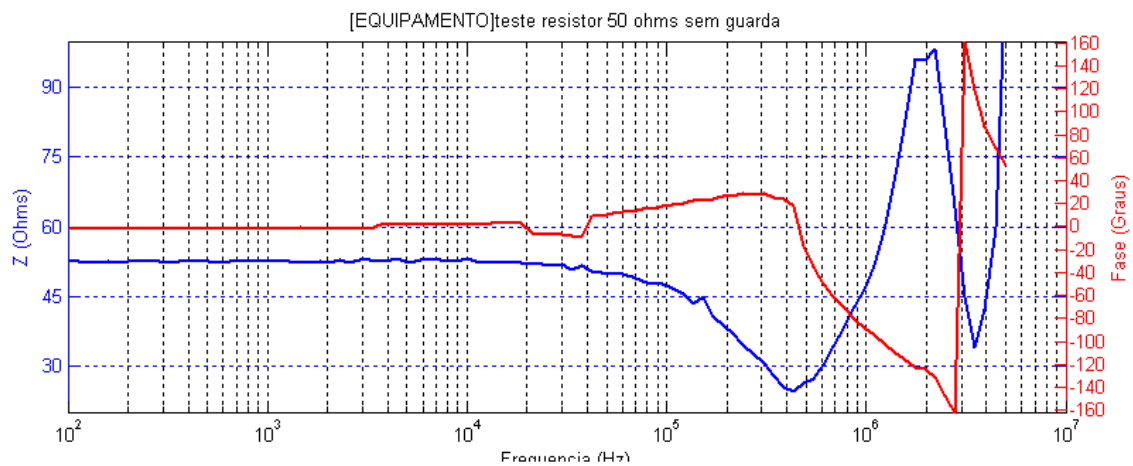


Figura 65: Ensaio de resposta em frequência sobre o equipamento de FRA

Nota-se claramente que os valores de impedância medidos são razoáveis em baixas frequências até uma faixa que chega aos 100 kHz. Para frequências superiores, a medição não se mostra mais confiável.

A fim de se eliminar a influência dos cabos de medição, a resistência sob medida foi conectada diretamente aos bornes BNC do equipamento, sem cabos, levando ao resultado de medição mostrado na Figura 66.

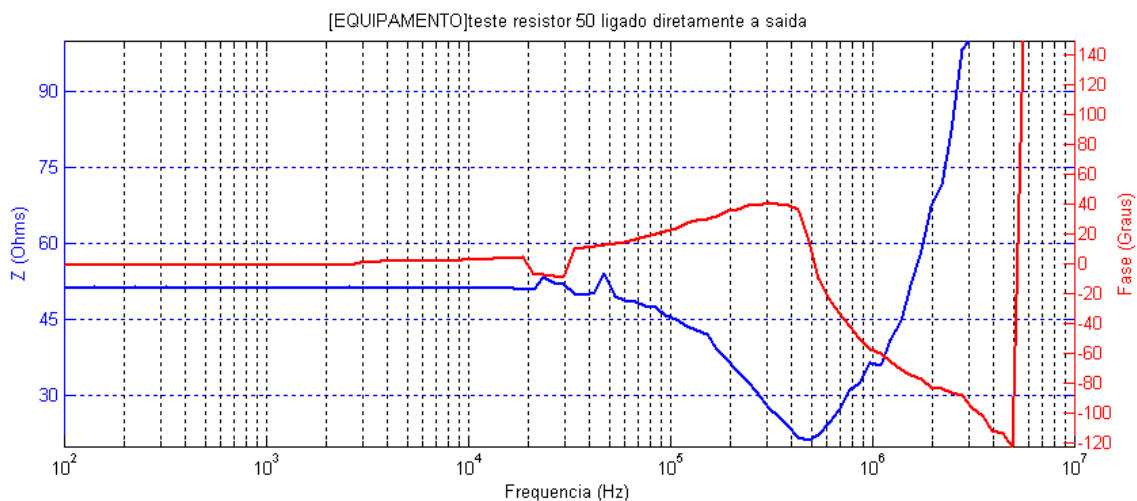


Figura 66: Ensaio de resposta em frequência sobre o equipamento de FRA – sem cabos.

Percebe-se que os cabos de ligação têm certa influência sobre os resultados obtidos, pois há uma melhora da segunda curva em relação à

primeira, quando se pensa no valor esperado a ser medido. Contudo, o resultado, mesmo nesse melhor caso sem cabos de ligação e com resistência padrão, não é confiável para medições acima dos 100 kHz. Tal deficiência para medições em freqüências superiores é perfeitamente justificada pela dificuldade técnica de construção de um dispositivo para tal fim usando-se componentes comerciais. Limitações devido ao diagrama da placa de circuito impresso do instrumento e faixas de passagem dos componentes utilizados, em especial dos amplificadores operacionais, aparentemente são os principais responsáveis pelos desvios observados em altas freqüências. Além disso, a taxa de *slew rate* dos amplificadores parece ter influência significativa sobre tais curvas em altas freqüências.

Embora o equipamento não seja indicado para medições acima dos 100 kHz, os dados provenientes de suas medições são coerentes e com excelente exatidão e precisão até a faixa dos 100 kHz. Tal informação é extremamente útil para as análises das curvas decorrentes da utilização do dispositivo, pois dá suporte a uma análise confiável dos dados até tal freqüência.

Conforme será discutido no capítulo seguinte, certas faltas passíveis de detecção via FRA ocorrem em freqüências mais baixas, usualmente até os 100 kHz. Logo, para tais tipos de faltas, o banco de dados proveniente da utilização do equipamento é perfeitamente útil e pronto à utilização, com boa qualidade de medição.

No próximo capítulo (Estudos de Caso) alguns resultados de medições em campo serão apresentados utilizando-se tal dispositivo, e as respectivas

análises deles decorrentes serão feitas com validade até a faixa de frequência que vai até 100 kHz.

5.3.2 Varredura crescente ou decrescente de frequências

O sistema elétrico de funcionamento de um transformador de potência, incluindo seu núcleo magnético e buchas, pode ser visto como um sistema linear invariante no tempo, dadas as suas características. Tal fato permite a realização de ensaios de FRA do tipo varredura, tais quais os descritos no decorrer deste texto, ou seja, a aplicação de sinais senoidais aos enrolamentos do transformador em passos discretos de frequência.

Com tal procedimento, uma dada frequência de interesse é aplicada ao transformador, aguarda-se o tempo necessário para a atenuação dos efeitos transitórios, e as medições são efetuadas. Logo em seguida o gerador de sinais é desligado, uma nova frequência é programada e aplicada ao transformador, e o procedimento se repete. Ora, se o sistema pode ser visto como linear e invariante no tempo, espera-se obter os mesmos resultados para qualquer ordem de aplicação das frequências de interesse ao ensaio, seja na ordem crescente de frequências, seja na ordem decrescente.

Para verificar tal observação, uma seqüência de ensaios simples foi efetuada. Na primeira delas o gerador de sinais foi programado para fornecer sinais senoidais com frequências crescentes, começando com 10 Hz até 10 MHz. No segundo ensaio a programação foi alterada para que a varredura se iniciasse em 10 MHz e terminasse em 10 Hz. Os resultados destes ensaios,

com a sobreposição das curvas de módulo e ângulo de impedância terminal, são mostrados na Figura 67.

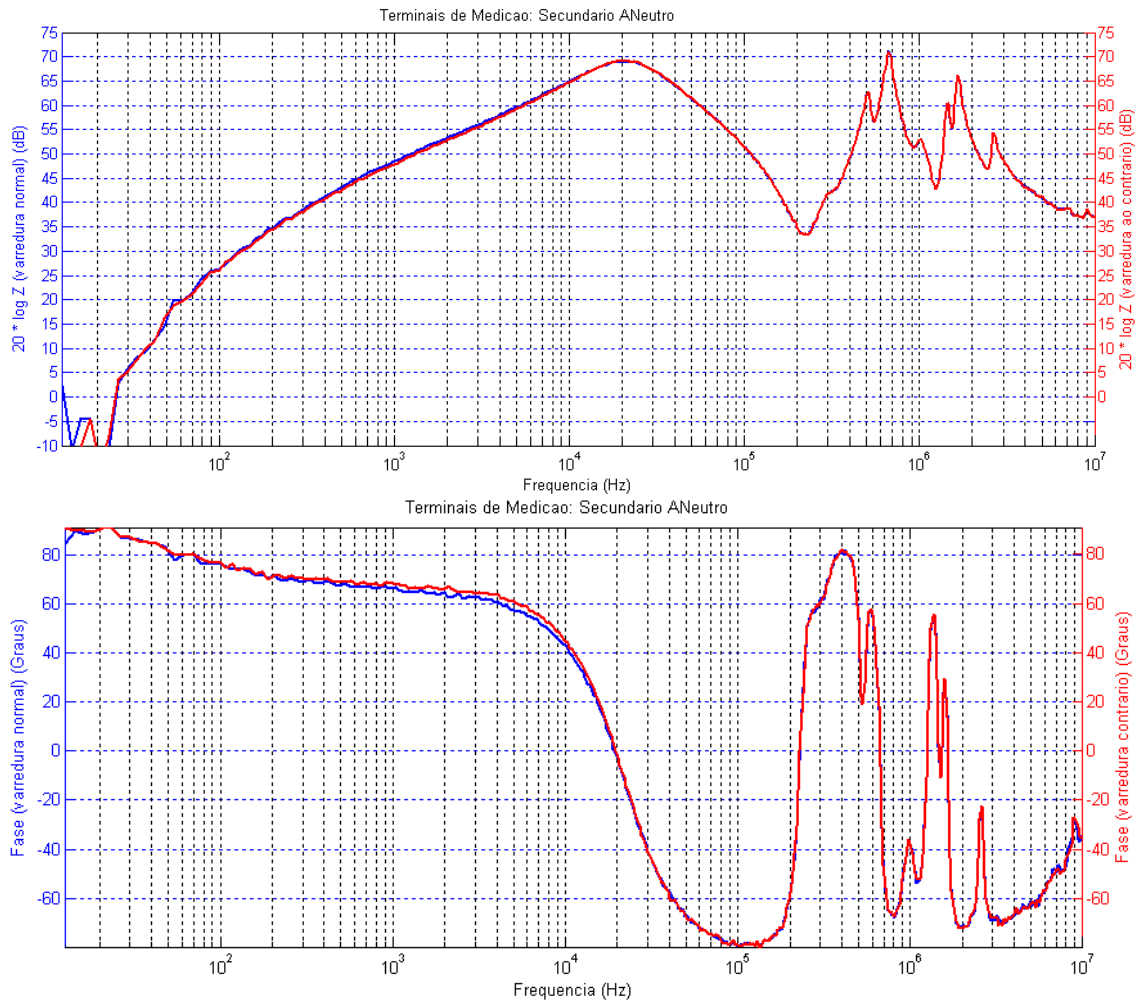


Figura 67: Comparativo de módulo e ângulo para varreduras crescente e decrescente de frequências.

Nota-se que os resultados coincidem a menos de desvios em baixas frequências. Tais desvios são justificados pela escolha inadequada do resistor shunt de medição de corrente, e chamam a atenção para um aspecto de fundamental importância: a correta escolha do resistor de base. Em baixas frequências a impedância do enrolamento do transformador é baixa, se comparada ao valor do resistor de shunt utilizado, que foi de 220Ω . Com isso, o valor de impedância medido é baixo demais se comparado ao valor de fundo

de escala do medidor, o que compromete sua precisão e pode levar a erros de medição, como foi o caso mostrado.

5.3.3 Necessidade de temporização nos ensaios de FRA

Uma vez que os transitórios de energização dos enrolamentos do transformador tendem a ser rápidos devido aos valores dos parâmetros envolvidos, espera-se que não haja a necessidade de se aguardar um tempo expressivo antes que as aquisições sejam feitas. Para verificar tal afirmação, uma seqüência simples de ensaios foi realizada em laboratório onde se aplicou a seqüência de sinais de FRA ao enrolamento do transformador em duas condições. Na primeira delas cada sinal senoidal foi aplicado ao enrolamento e imediatamente em seguida o osciloscópio utilizado para a aquisição dos sinais iniciou os ajustes de escala e o processo de aquisição. No segundo ensaio, aguardou-se um tempo de 1 s entre a aplicação do sinal ao enrolamento e o início do processo de aquisição. A sobreposição das curvas de módulo e fase da impedância medida é mostrada na Figura 68.

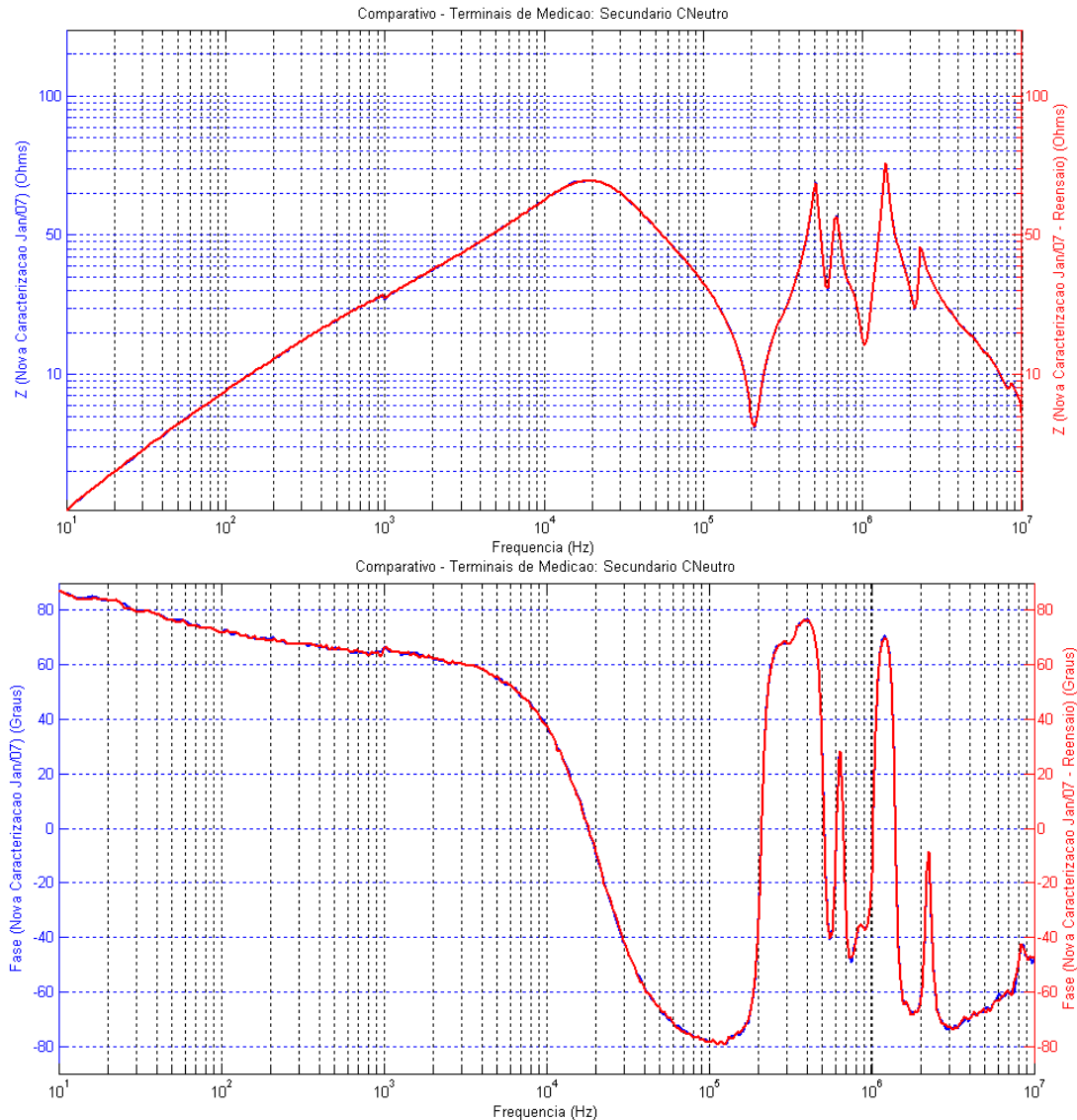


Figura 68: Comparativo de módulo e ângulo para ensaios normal e temporizado

Observa-se claramente que os sinais coincidem e, portanto, o tempo de ajuste de escala do osciloscópio utilizado, que é da ordem de algumas dezenas de milissegundos, deve ser o suficiente para o término dos transitórios de energização do transformador utilizado.

Nota-se também a excelente repetibilidade obtida com os ensaios na configuração adotada.

5.3.4 Emprego de pontas ativas de medição

Conforme foi discutido nas seções precedentes deste capítulo, o uso de terminadores de 50Ω nas extremidades dos cabos coaxiais de ligação se faz necessário devido a fenômenos de reflexão que possam ocorrer. Contudo, verifica-se que, por tal terminação entrar em paralelo com o enrolamento a ser medido, tal prática representa a aplicação constante de uma carga elevada ao gerador de sinais utilizado, o que pode atenuar o sinal efetivamente aplicado ao enrolamento devido à queda de tensão na resistência interna de saída do instrumento.

Para contornar tal problema, pode-se adotar a utilização de uma ponta ativa, constituída basicamente de um circuito amplificador cuidadosamente projetado para trabalhar nas frequências de interesse sem distorções. Para fins de teste, foi projetado, simulado e construído nos laboratórios do LRC/UFMG um circuito amplificador classe AB que possui faixa de passagem e taxa de *slew rate* compatíveis com a aplicação desejada. O esquema do amplificador protótipo projetado é mostrado na Figura 69, bem como suas curvas de simulação de sinal de saída a 10 MHz e faixa de passagem.

De acordo com a simulação, nota-se que o circuito projetado não deve distorcer muito os sinais de teste, mesmo para altas frequências.

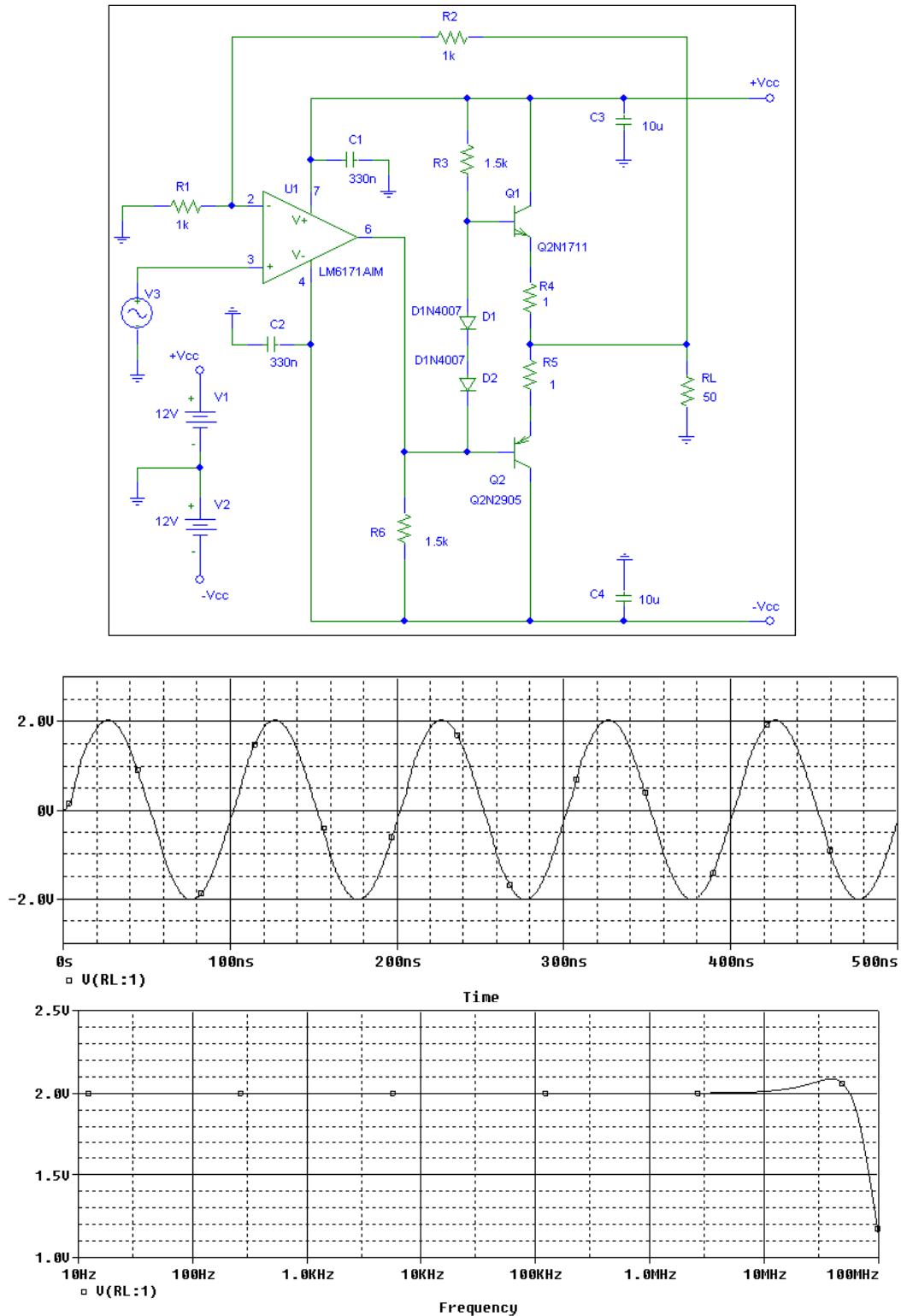


Figura 69: Diagrama esquemático da ponta ativa projetada e sua resposta em frequência simulada

Medições sobre o circuito em funcionamento indicaram um comportamento aceitável. Até 10 MHz a resposta do amplificador é boa e não

interfere na medição. A tensão de saída segue a entrada com distorções mínimas. A atenuação máxima do sinal medido foi cerca de 8% em frequências em torno de 5 MHz. Porém, a fase continua a apresentar alguma distorção em frequências mais altas, mesmo antes e depois do uso do amplificador.

Os desvios em fase, conforme discutido anteriormente, são esperados. Tal resultado reflete o efeito de propagação sofrido pelo sinal de FRA ao longo dos cabos de medição para frequências altas e é resultado do atraso temporal sofrido pelo sinal no percurso do gerador de sinais ao transformador.

Do ponto de vista prático, a construção de uma ponta ativa para injeção de sinal diretamente no transformador é algo bastante interessante, pois pode proporcionar níveis de tensão mais elevados e com isso aumentar a relação Sinal/Ruído das medições, conseqüentemente a sua sensibilidade. Alguns autores relatam certa dificuldade em se manter uma boa relação sinal ruído durante ensaios de FRA [1] [9], e neste aspecto tal solução parece viável.

Contudo, para operação em campo, outras dificuldades de ordem técnica tornam tal projeto um investimento de complexidade técnica mais alta. Por atuar em ambientes de alta interferência eletromagnética, um bom projeto de blindagem deve ser realizado para evitar a ação de ruídos. Além disso, o projeto da placa de circuito impresso, com a escolha dos demais componentes de circuito, deve ser feita de forma cuidadosa para se garantir a faixa de passagem conseguida nas simulações.

5.3.5 Uso de fibras óticas

Uma forma de se evitar a influência de interferências eletromagnéticas sobre o sinal que trafega no cabo de ligação é a sua substituição por fibras óticas. Tal alternativa de ligação apresenta imunidade a ruídos de origem elétrica por realizar o transporte de informação do sinal de medição via luz.

Existem atualmente pares de conversores de sinais elétrico/óptico e óptico/elétrico que se destinam a aplicações deste tipo, onde o interesse é o de trafegar informações e sinal do tipo analógico entre sistemas. O fabricante contatado, *Terahertz Technologies*, dos Estados Unidos, forneceu para esta pesquisa um dispositivo conversor elétrico/óptico (LTX-510 (ST)-PS-8) e um conversor óptico/elétrico (TIA-520S – ST), acoplados a uma fibra óptica multimodo de aproximadamente 1 metro.

Ensaio de resposta em frequência sobre o conjunto formado pelos conversores e a fibra óptica foram realizados em laboratório no LRC/UFMG para averiguação de sua influência sobre os resultados de medição, na eventual escolha em se adotar tal sistema de ligação. Para tal, seguindo-se as recomendações do fabricante, fez-se uma varredura em frequência com sinais senoidais de 3 Vpp e offset de 2,5 V (necessário devido à faixa de trabalho do conversor E/O, que é de 0-5 V). O resultado dessa varredura é exibido na Figura 70.

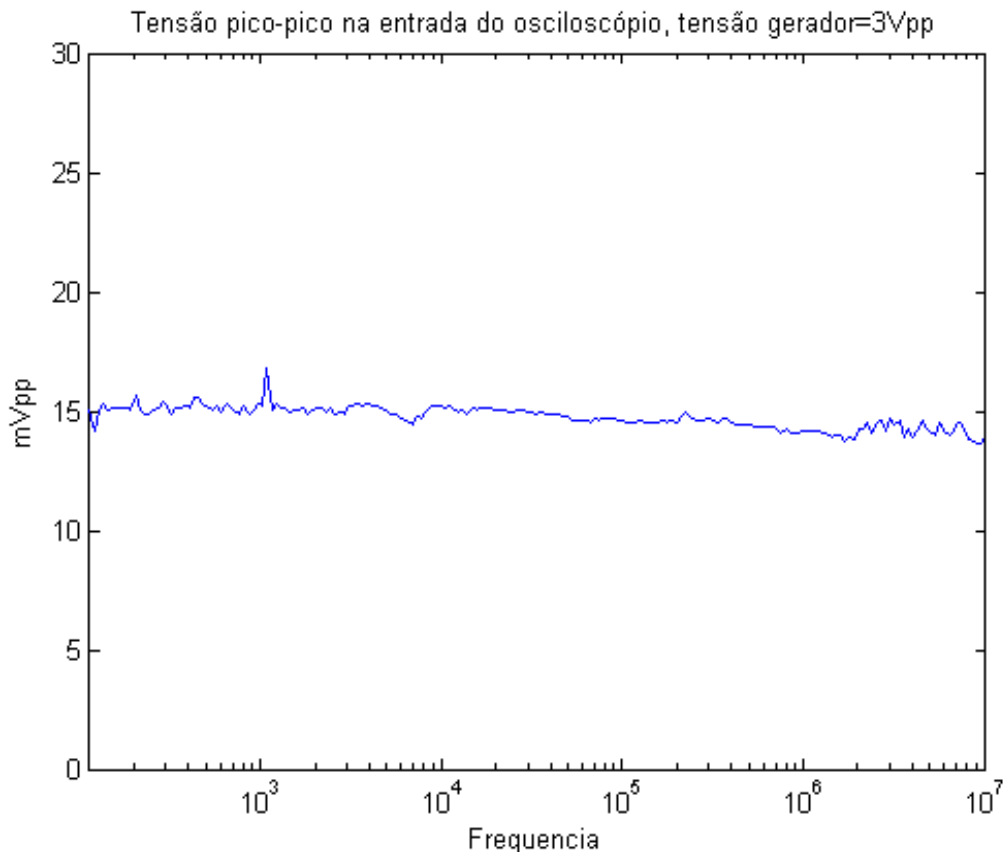


Figura 70: Resposta em frequência do par conversor com fibra.

Observa-se que a relação entre as amplitudes dos sinais de entrada e saída permanece praticamente constante, o que indica que o par conversor não deve distorcer em muito as amplitudes envolvidas.

Algumas observações importantes devem ser feitas. Pelo que se pode observar acima, a tensão fornecida pelo conversor O/E é muito baixa, mesmo quando o sinal de entrada possui uma excursão que é praticamente a máxima tolerada pelo conversor E/O. Isso significa que, em condições práticas, será impossível, com o par de conversores utilizados, obter sinais muito maiores que os aqui obtidos. Contudo, por se tratar de uma comunicação óptica e pelo fato de o conversor O/E se ligar diretamente à entrada do osciloscópio, espera-se uma imunidade a ruídos maior do que seria de se imaginar em se tratando de um sinal de amplitude tão reduzida. Além disso, nota-se pela curva um comportamento que é o ideal para as aplicações de FRA: o sinal fornecido pelo

gerador de sinais se propaga até o ponto de aplicação e de volta ao instrumento de medição praticamente independente da frequência aplicada, ou seja, a senóide é perfeitamente recomposta sem distorções para qualquer frequência.

Para que o par conversor possa ser utilizado em campo uma ponta ativa de medição deve ser utilizada a fim de se adequar os níveis de sinal utilizados no ensaio, como por exemplo, para garantir a aplicação de 10 Vpp sobre o enrolamento, ou a adequação do sinal de retorno da medição dentro dos limites do conversor elétrico/óptico. Um cuidado especial para o projeto de tais pontas ativas deve ser observado, conforme discutido anteriormente.

No geral, nota-se que o uso de fibras ópticas para transmissão dos sinais de medição em substituição aos cabos coaxiais pode ser uma excelente alternativa. A proposta de imunidade a ruídos é algo extremamente vantajosa, o que faz com que tal arranjo de transmissão possa ser bastante utilizado, a despeito das dificuldades técnicas envolvidas nos projetos dos subsistemas envolvidos, como é o caso das pontas de prova ativas.

Neste capítulo foram apresentadas as principais conclusões referentes a questões práticas relacionadas aos ensaios de FRA. Tais observações incluem principalmente informações obtidas acerca da influência dos cabos de

transmissão de sinais utilizados sobre os resultados de medição e o impacto do número e da distribuição dos pontos de medição ao longo da faixa de frequências dos ensaios. Tais fatores, dentre outros, foram considerados críticos ao correto diagnóstico de faltas usando FRA, e sua identificação pode amparar a definição de uma metodologia de ensaio mais abrangente.

No próximo capítulo serão apresentados casos práticos de utilização de ensaios de FRA na detecção de faltas induzidas em transformadores no laboratório. Os testes feitos contemplam em sua metodologia os aspectos práticos de ensaio identificados neste capítulo.

6

ESTUDOS DE CASO

6.1 Introdução

No capítulo anterior foram discutidos aspectos práticos e teóricos relacionados à metodologia de ensaio de resposta em frequência e algumas soluções foram propostas para as particularidades identificadas. Neste capítulo tais aspectos foram levados em consideração na elaboração da sistemática de ensaio e diversos testes de indução de faltas foram realizados nos laboratórios do LRC/UFMG, onde se procurou investigar o comportamento do conjunto de equipamentos de ensaio e a eficácia da metodologia de medição em detectar alterações físicas e elétricas em um transformador sob ensaio. Os defeitos induzidos procuram simular condições comumente observadas na prática, sejam decorrentes do transporte, operação ou acidentes naturais, tais como curto-circuito entre espiras e deslocamentos de núcleo ou bobinas.

Para os ensaios descritos ao longo deste capítulo, foi utilizado um transformador trifásico de pequeno porte isolado a papel (Figura 71), cujas características podem ser encontradas na Tabela 11 e na Tabela 12.

Tabela 11: Dados técnicos do transformador utilizado nos ensaios.

Transformador de ensaio	
Marca	King
Potência	3kVA
Tensão Nominal	220:65/110/220 V
Configuração	Δ - Y (configurável)
Corrente Nominal	7.8:27 A

Tabela 12: Correspondências entre enrolamentos.

Aplicação	Medição
Primário AB	Secundário ANeutral
Primário BC	Secundário BNeutral
Primário CA	Secundário CNeutral
Secundário ANeutral	Primário AB
Secundário BNeutral	Primário BC
Secundário CNeutral	Primário CA



Figura 71: Transformador utilizado nos ensaios de indução de faltas.

Dentre as faltas induzidas, algumas são de particular interesse na investigação da eficácia da metodologia de FRA, pois representam variação direta em parâmetros elétricos que afetam as curvas de resposta em

freqüência. Curtos-circuitos entre espiras afetam diretamente a impedância do enrolamento sob medida e sua relação de transformação, além de alterar a distribuição de capacitâncias parasitas entre espiras ou entre espiras e núcleo. Faltas mecânicas, como deslocamentos de núcleo, podem provocar uma alteração significativa na distribuição dos valores de capacitância parasita no transformador.

Ao longo dos próximos itens, vários ensaios procuram explorar tais faltas, seus impactos sobre as curvas medidas e conseqüentemente a sensibilidade do ensaio de FRA à falta considerada. Isto é feito no âmbito da metodologia de ensaio definida e discutida no capítulo anterior, como a escolha do número de pontos de medição por década de freqüência e sua forma de distribuição. A escolha dos resistores de *shunt* seguiu um critério de amplitude mínima de tensão medida ao longo do ensaio, para evitar erros de medição, tal qual discutido anteriormente. Tal escolha foi mantida para todos os ensaios discutidos neste capítulo, para fins de comparação entre as curvas. Estas informações estão detalhadas na Tabela 13 e na Tabela 14:

Tabela 13: Distribuição de pontos por década de freqüência.

Tipo de Ensaio	10 Hz a 100 Hz	100 Hz a 1 kHz	1 kHz a 10 kHz	10 kHz a 100 kHz	100 kHz a 1 MHz	1 MHz a 10 MHz
Relação de transformação	30	45	55	70	85	70
Impedância terminal	35	55	55	60	75	75

Tabela 14: Regime de trocas de resistores de shunt para primário e secundário.

Freqüência	Primário / Secundário AB, BC e AC	Secundário
800 Hz	Troca de 220Ω por 680Ω	-
1 kHz	-	Troca de 100Ω por 220Ω
3 kHz	Troca de 680Ω por 1500Ω	-
100 kHz	Troca de 1500Ω por 220Ω	Troca de 220Ω por 150Ω

Como etapa prévia dos ensaios de FRA, foi feita uma rotina de ensaios completos em todos os enrolamentos do transformador onde se mediu sua impedância terminal e sua relação de transformação. As condições de ensaio foram cuidadosamente preparadas, como a desconexão de quaisquer cabos de ligação não utilizados, a fim de se evitar interferências. Tal etapa busca obter curvas representativas do transformador em sua condição de operação normal, o que alguns autores denominam *assinatura do transformador*. Nesta etapa é importante verificar a repetibilidade do sistema de medição ao fornecer curvas idênticas, dentro de certa tolerância, para condições idênticas de ensaio e de estado operativo do transformador. Sem repetibilidade fica praticamente impossível a correta atribuição de desvios nas curvas medidas a faltas.

Os ensaios realizados utilizando-se o sistema de gerador de sinais e osciloscópio e demais equipamentos discutidos no capítulo anterior demonstraram uma excelente repetibilidade, tanto nas medições de impedância terminal quanto nas medições de relação de transformação.

6.2 Ensaio de indução de curto-circuito entre espiras

Através da raspagem do papel isolante sobre as espiras do transformador sob ensaio foi possível o acesso a grupos de espiras de enrolamentos escolhidos no secundário, por questões construtivas. Os contatos elétricos feitos sob pressão permitiram o estabelecimento de curtos-circuitos através de fios de cobre, com o objetivo de simular condições de curto que eventualmente surgem em transformadores de potência em campo.

Foram realizados ensaios com curto-circuito em um número variável de espiras da bobina B do enrolamento secundário, conectado em Y. Inicialmente três espiras foram curto-circuitadas, depois oito. Por fim, estabeleceu-se um curto entre várias espiras da bobina A, também do secundário. Tal seqüência de ensaios buscou verificar o impacto sobre as curvas de FRA a sensibilidade do ensaio a tais alterações. A Figura 72 mostra como o curto-circuito foi estabelecido entre várias espiras da bobina A, os outros dois curtos-circuitos foram estabelecidos de forma semelhante.



Figura 72: Curto-circuito entre várias espiras da bobina A.

A Figura 73, Figura 74 e a Figura 75 ilustram os resultados obtidos com os ensaios de impedância terminal descritos:

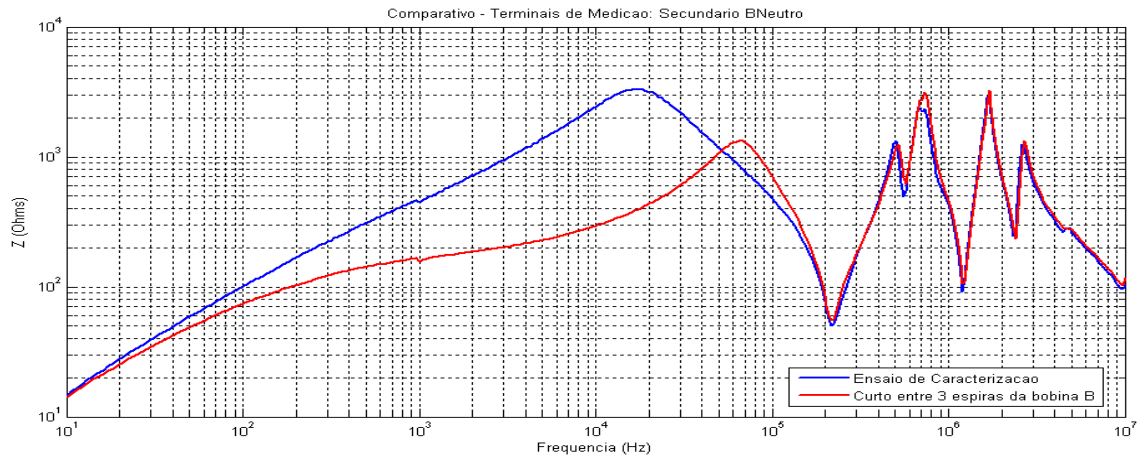


Figura 73: Comparativo de Impedância – Curto entre 3 espiras da bobina B – Terminal de medição: Secundário B - Neutro

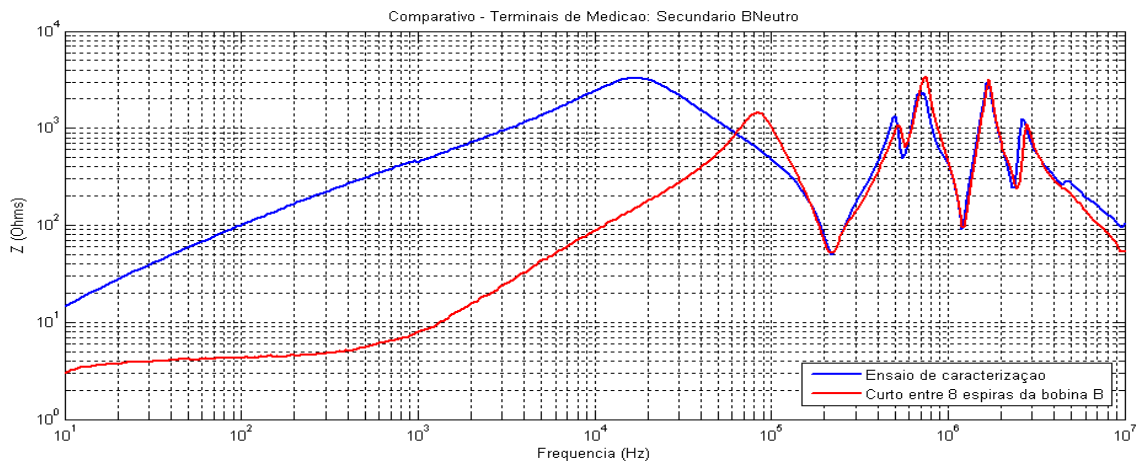


Figura 74: Comparativo de Impedância – Curto entre 8 espiras da bobina B – Terminal de medição: Secundário B - Neutro

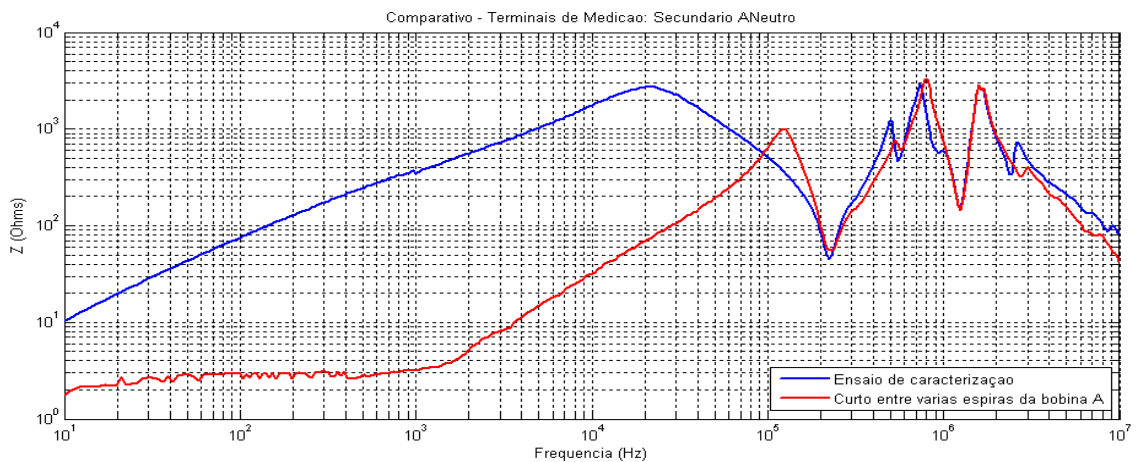


Figura 75: Comparativo de Impedância – Curto entre várias espiras da bobina A – Terminal de medição: Secundário A - Neutro

Um curto circuito entre 3 espiras da bobina B, como se pode observar nas figuras anteriores, provocou alterações nas curvas de resposta em

freqüência que se traduzem principalmente por uma redução na magnitude da impedância terminal em baixas freqüências. Quando o curto-circuito é estendido a um número maior de espiras, observa-se que o impacto sobre as curvas é mais pronunciado. Isto sugere que o ensaio de FRA, quando a grandeza medida é a impedância terminal, deve exibir boa sensibilidade na detecção de curtos-circuitos entre espiras uma vez que o desvio observado nas curvas tende a ser expressivo mesmo quando um número percentualmente pequeno de espiras é afetado. Nota-se também que os demais enrolamentos têm suas respostas afetadas pelo curto-circuito, o que contribui para o aumento da sensibilidade. Além disso, nota-se que o desvio observado nas três curvas tem a mesma forma, o que pode auxiliar o analista ou o software de análise na atribuição do provável tipo de falha ao transformador, pois tende a categorizar e associar o padrão de alteração a tal falha.

Os resultados obtidos com os ensaios de relação de transformação foram caracterizados por uma relação abaixo da nominal durante uma larga faixa de freqüências, para todos os curtos-circuitos induzidos, o que é esperado, uma vez que o curto-circuito elimina algumas espiras que deixam de contribuir para o estabelecimento do fluxo magnético no núcleo. Além disso, nota-se uma redução do pico de ressonância e desvios em alta freqüência, conforme descrito pela Figura 76, Figura 77 e Figura 78:

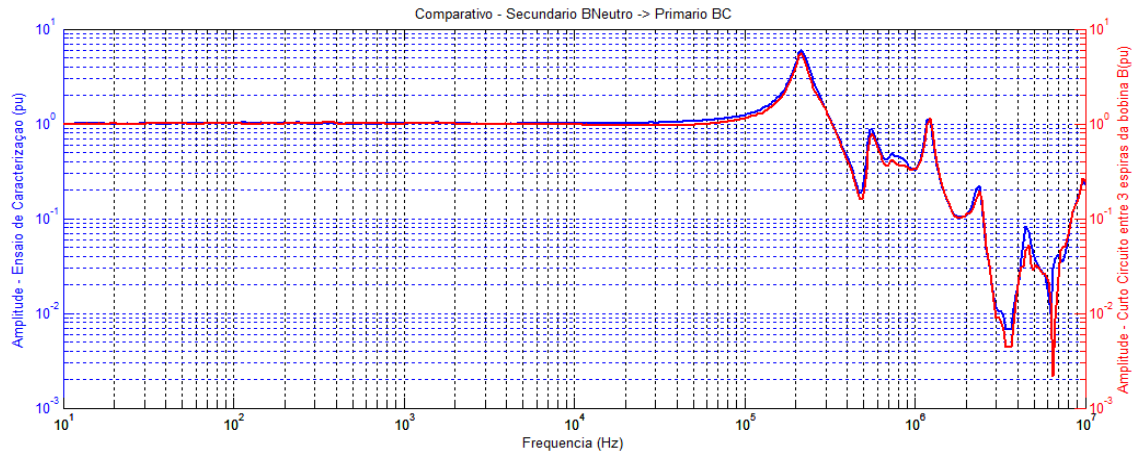


Figura 76: Comparativo de relação de transformação – Curto entre 3 espiras da bobina B

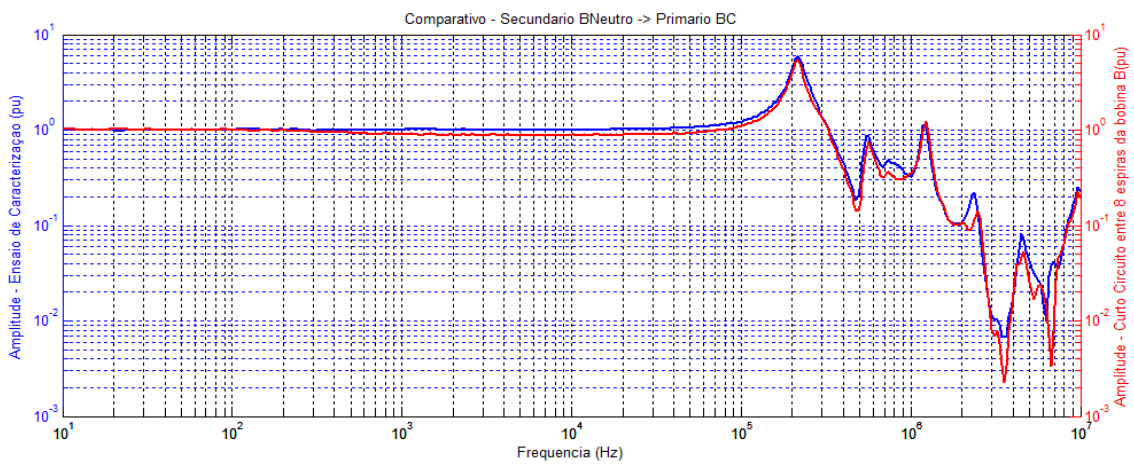


Figura 77: Comparativo de relação de transformação – Curto entre 8 espiras da bobina B

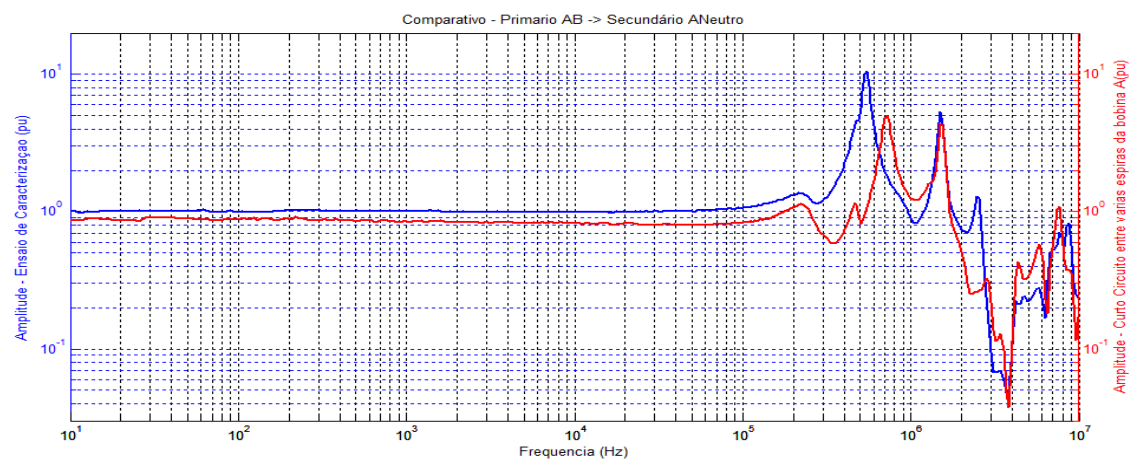


Figura 78: Comparativo de relação de transformação – Curto entre várias espiras da bobina A

Nota-se, de forma geral, que os ensaios de medição de impedância terminal foram mais sensíveis do que os ensaios de relação de transformação

aos curtos-circuitos induzidos em laboratório quando se pensa no desvio causado às curvas medidas em função da alteração operacional induzida. Isto se deve, principalmente, à maior riqueza de detalhes comumente observada nas curvas de impedância terminal. Contudo, o objetivo dos testes de FRA, amparado por uma metodologia de ensaio bem definida, é buscar, acima de tudo, a categorização dos desvios observados nas curvas segundo falhas conhecidas, baseada na repetibilidade dos ensaios. Nesse contexto, é possível que a utilização de ferramentas computacionais para o diagnóstico indicativo de falta, ou mesmo o trabalho do analista de FRA, apresente uma maior probabilidade de correto diagnóstico usando-se curvas de relação de transformação ao invés de impedância terminal [28] [29].

6.3 Ensaio de deslocamento de núcleo

Os ensaios de deslocamento de núcleo realizados neste item buscaram verificar o impacto causado pela variação da geometria do transformador e a sensibilidade dos testes de FRA a tais modificações. Sabe-se, conforme discutido nos capítulos anteriores, que as alterações na disposição dos enrolamentos (eventualmente oriundas de solicitações mecânicas extremas em condições de curto) ou do núcleo (pancadas em decorrência do transporte, por exemplo) podem iniciar processos de falta. Ao mesmo tempo, tais alterações modificam também a distribuição de capacitâncias parasitas no transformador e espera-se poder reconhecer tais modificações através de alterações nas curvas de FRA.

O transformador utilizado para os ensaios deste capítulo possui núcleo envolvido, com suas placas expostas e prensadas. Um primeiro teste de deslocamento de núcleo procurou verificar a sensibilidade do ensaio através de uma alteração sutil: o afrouxamento das placas que prensam o núcleo do transformador, conforme mostrado na Figura 79 e na Figura 80, promovendo um breve afastamento entre placas consecutivas e a aproximação das espiras em relação à massa.



Figura 79: Processo de afastamento das placas do núcleo do transformador.



Figura 80: Detalhe das laminas do núcleo.

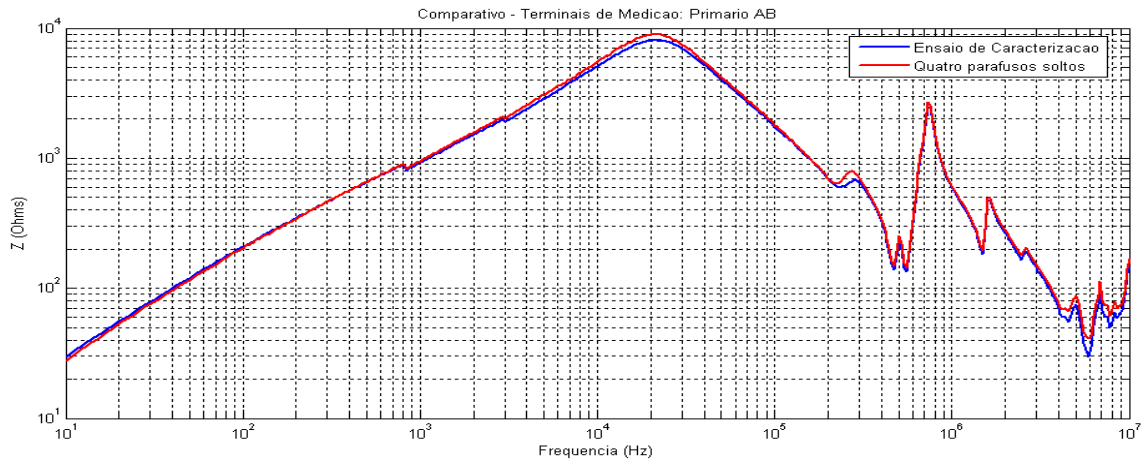


Figura 81: Resultados da medição de impedância terminal sem os parafusos de sustentação das placas

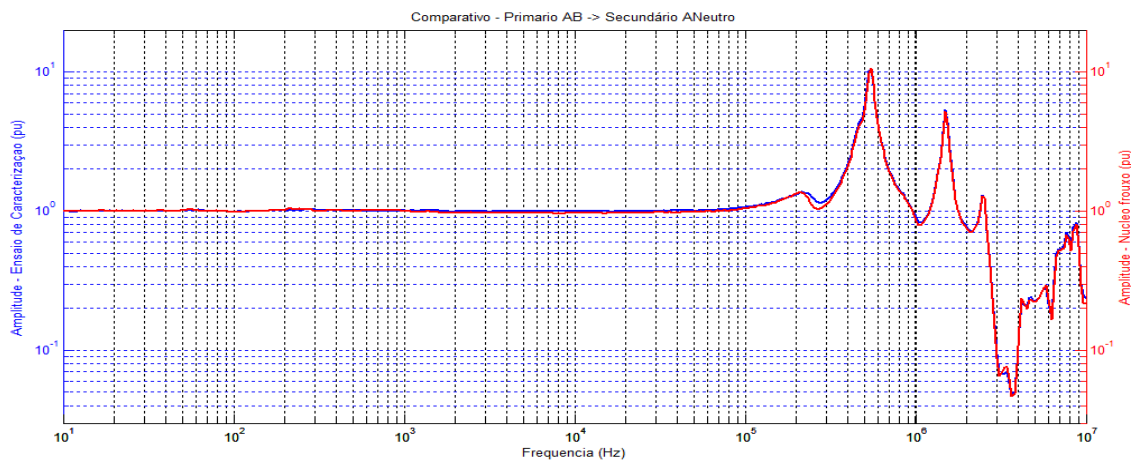


Figura 82: Resultados da medição de relação de transformação sem os parafusos de sustentação das placas

Nota-se, através dos resultados verificados na Figura 81 e na Figura 82, que mesmo com uma alteração muito sutil na geometria do núcleo foi possível identificar desvios nas curvas, com destaque para as curvas de impedância terminal. Quando o deslocamento imposto às placas do núcleo é ainda maior, nota-se que o desvio observado nas curvas de FRA é mais expressivo, conforme visualizado na Figura 83, Figura 84 e na Figura 85.

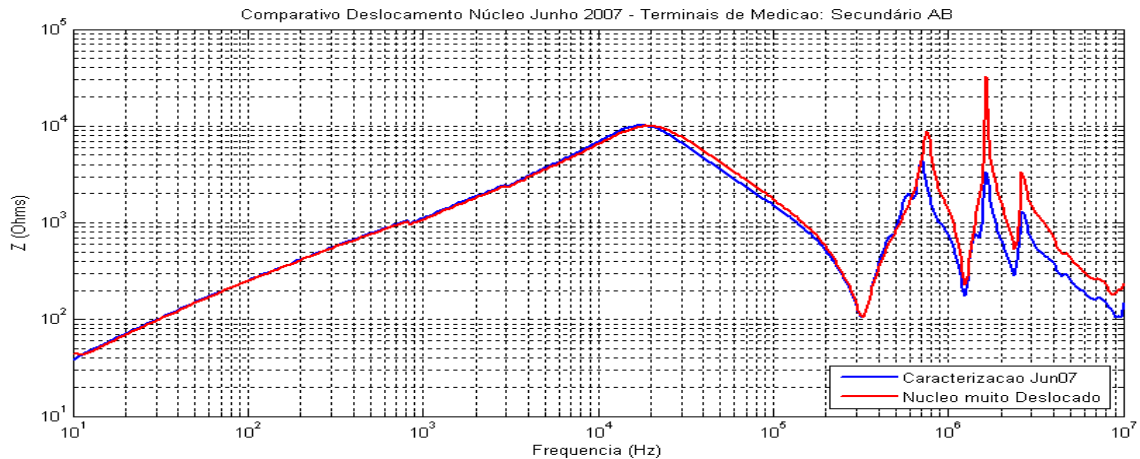


Figura 83: Medição de impedância para núcleo muito deslocado – Módulo

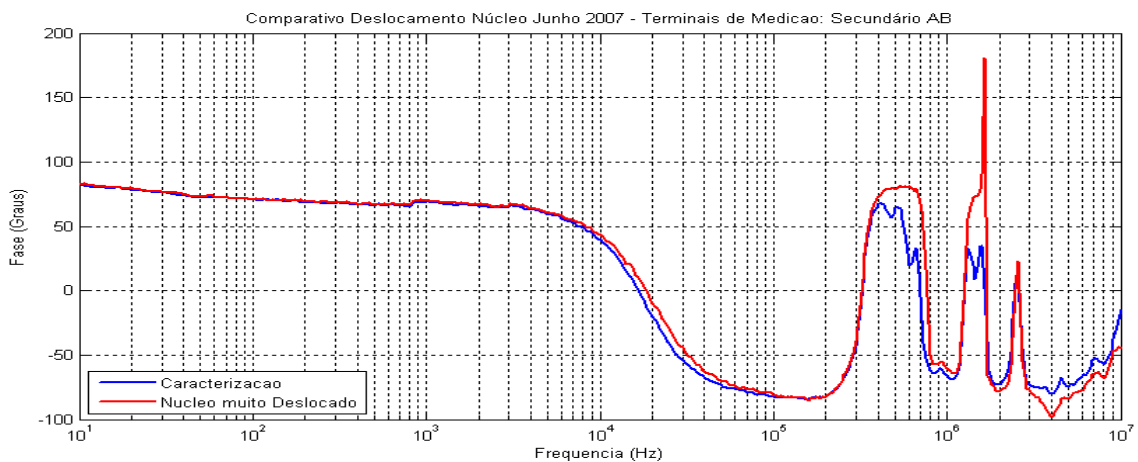


Figura 84: Medição de impedância para núcleo muito deslocado – Fase

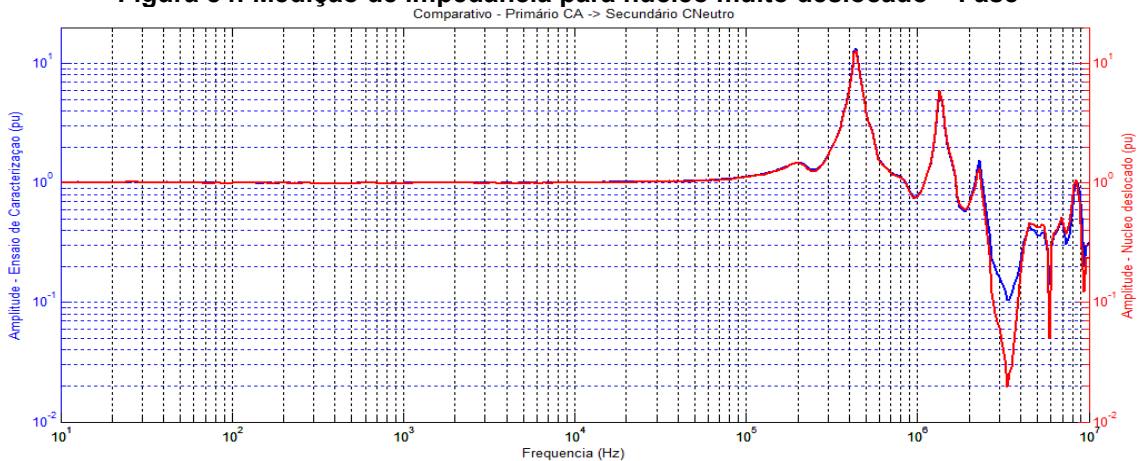


Figura 85: Medição de relação de transformação para núcleo muito deslocado

Os resultados anteriores sugerem que a metodologia de ensaio adotada é sensível a deslocamentos de núcleo ou bobinas, amparada pela excelente repetibilidade alcançada nos ensaios realizados, uma vez que, remontado o transformador com a prensagem das placas, as curvas de FRA voltam a

coincidir com aquelas referentes ao estado original antes da falta (Figura 86). Esse resultado ampara um futuro diagnóstico de falta mecânica com mais segurança.

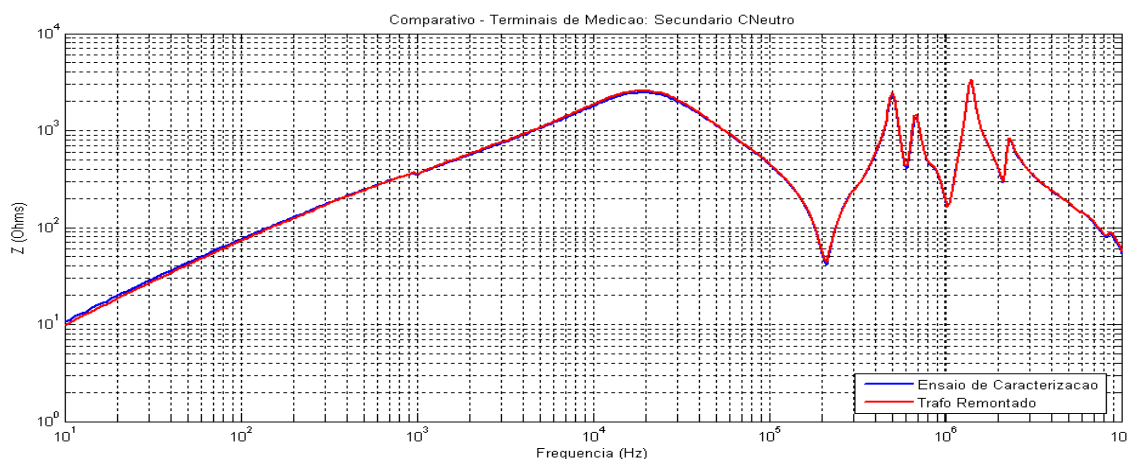


Figura 86: Resultados da medição de impedância terminal com o transformador remontado.

Dos ensaios de indução de faltas realizados, os que apresentaram alterações mais expressivas nas curvas de FRA foram aqueles que simularam condições de curto-circuito entre espiras. As grandes alterações observadas nas curvas de impedância terminal podem se tornar um indicativo bastante preciso acerca do diagnóstico desse tipo de falta. Ao mesmo tempo, observa-se que os ensaios de relação de transformação não foram capazes de indicar faltas mecânicas, como deslocamentos de núcleo, através de grandes variações nas curvas medidas.

Aparentemente os ensaios de relação de transformação são mais sensíveis a faltas elétricas nos enrolamentos, como curtos-circuitos. Como as alterações mecânicas estão diretamente relacionadas à modificação da distribuição de capacitâncias parasitas, é de se esperar que os ensaios de

impedância terminal apresentem desvios maiores para este tipo de falta do que os ensaios de relação de transformação.

Além da questão da sensibilidade do ensaio de FRA às faltas induzidas, nota-se que os padrões de falta observados se repetem para os casos estudados, com maior ou menor intensidade [30] [31]. Tal observação é fundamental para a concretização de uma metodologia de diagnóstico eficaz via FRA. Um estudo mais abrangente, envolvendo a criação de um extenso banco de dados com medições em transformadores de diversos portes e em condições de laboratório e campo pode subsidiar a elaboração de uma metodologia de diagnóstico que, associada a uma metodologia de ensaio bem definida, pode ser bastante útil como ferramenta. Isto permitiria ter mais segurança na tomada de decisão à medida que torna mais confiável o diagnóstico obtido.

Neste capítulo foram apresentados resultados práticos de ensaios de resposta em frequência realizados nos laboratórios do LRC/UFMG, amparados pela metodologia de ensaio abordada no capítulo anterior. Demonstrou-se que resultados confiáveis podem ser obtidos nas condições experimentadas. Pela alta repetibilidade atingida com os equipamentos de medição adotados em laboratório, mostrou-se que os ensaios de FRA podem ser sensíveis a diferentes tipos de falta e que a identificação de padrões de alteração nas

curvas de FRA pode amparar a definição de uma metodologia de diagnóstico bastante eficaz, especialmente para grandes bancos de dados experimentais construídos ao longo do tempo.

Destaca-se que este capítulo teve a intenção de validar a metodologia de ensaio em *FRA* discutida no capítulo precedente (questões práticas relacionadas aos procedimentos de medição em FRA em si, tais como cabos, conexões, distribuição de pontos, dentre outras). A definição de uma metodologia de diagnóstico deve ser uma etapa posterior, onde, amparada por uma metodologia de ensaio consistente e robusta, poderá ser capaz de criar condições para o correto e confiável diagnóstico de faltas em transformadores via FRA.

7 CONCLUSÕES

As discussões referentes à metodologia de ensaio de Resposta em Frequência (FRA) continuam sendo de inquestionável interesse para as concessionárias de energia elétrica e demais empresas do setor. Devido à posição estratégica do transformador de potência como peça chave na transmissão de energia, o uso de técnicas não invasivas para diagnóstico de faltas incipientes é bastante atrativa, pois pode evitar prejuízos maiores e retiradas de operação. Além disso, o assunto FRA não está totalmente consolidado na literatura atual, que carece de informações de caráter prático para execução de ensaios e de aspectos teóricos que possam sustentar com segurança os diagnósticos de faltas.

Nesse contexto, o trabalho discutido buscou a identificação de aspectos de caráter prático que pudessem ter influência expressiva sobre os resultados dos ensaios de FRA. Em outras palavras, buscou-se definir e consolidar a metodologia de ensaio que possa ser aplicada em trabalhos posteriores com mais segurança e que possa amparar a definição e consolidação de uma metodologia de diagnóstico de resposta em frequência.

Foram discutidos ao longo deste texto detalhes referentes à prática dos ensaios que em geral não são detalhados nos trabalhos presentes na literatura pertinente. Dentre eles, destaca-se a escolha dos cabos utilizados para a transmissão do sinal, que representam uma peça chave para os ensaios de FRA e que podem ter impacto realmente significativo sobre os resultados e conseqüentemente o diagnóstico. Além disso, diversos outros aspectos práticos foram discutidos e soluções foram propostas para os problemas identificados.

Vários ensaios de indução de faltas foram feitos em laboratório buscando verificar a eficácia da metodologia de ensaio para os tipos de faltas para os quais os ensaios de FRA são mais indicados: alterações geométricas e curtos-circuitos. Dois aspectos básicos foram avaliados: a repetibilidade alcançada e a sensibilidade do método à falta aplicada.

A repetibilidade nos ensaios de FRA é seu aspecto mais fundamental, uma vez que a metodologia é baseada na comparação de resultados atuais de medição com bancos de dados de outras medições. Para que os resultados sejam confiáveis, é imprescindível que haja alta repetibilidade afim de que os desvios observados sejam fruto tão somente de alterações nas condições operativas do transformador. Nesse sentido, a metodologia de ensaio desenvolvida mostrou-se bastante satisfatória por fornecer resultados com altíssimo grau de repetibilidade, conforme identificado através dos ensaios realizados.

A sensibilidade às faltas induzidas é um outro fator de grande importância para uma futura metodologia de diagnóstico, pois pode amparar a tomada de decisão com mais segurança. A metodologia de ensaio definida neste trabalho alcançou um bom nível de sensibilidade, pois foi capaz de produzir desvios visíveis nas curvas de FRA para as faltas induzidas, mesmo aquelas mais sutis como os breves deslocamentos de núcleo.

Espera-se que o presente trabalho possa dar suporte a uma definição mais abrangente de metodologia em FRA ao acoplar a definição de uma metodologia de diagnóstico eficaz. As questões aqui discutidas são questões de ordem prática que podem surgir durante a execução dos ensaios. As soluções aqui propostas suportam ensaios futuros através de uma padronização própria, possibilitando altos níveis de repetibilidade.

8

PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

8.1 Introdução

O foco deste texto foi a definição e consolidação de uma metodologia de ensaio em FRA. O objetivo de tal metodologia é dar amparo à execução de ensaios de FRA ao definir procedimentos que permitam obter alta repetibilidade nos resultados de ensaios e boa sensibilidade a faltas detectáveis. Contudo, a metodologia de ensaio em FRA requer a criação de uma metodologia própria de diagnóstico.

Uma metodologia de diagnóstico em FRA pode ser entendida como o conjunto de métodos, diretivas e estudos teóricos que dêem suporte à tomada de decisão acerca de faltas incipientes ou existentes. Tal conjunto seria capaz de trabalhar amparada por uma metodologia de ensaio consolidada e de fornecer diagnósticos de alto grau de confiabilidade.

Para que uma metodologia de diagnóstico em FRA possa ser criada e consolidada é preciso que um grande número de ensaios tenha sido realizado,

em diversas condições. Em outras palavras, é preciso que um grande banco de dados tenha sido estudado e analisado via FRA, uma vez que os diagnósticos provenientes dessas análises são baseados em comparações com outros resultados de medição.

Sugere-se como proposta de trabalhos futuros a aplicação da metodologia de ensaio definida neste trabalho a um número amplo de transformadores e a criação de um banco de dados que possa ser estudado. Com isso, uma metodologia de diagnóstico poderá ter condições de ser desenvolvida através de estudos teóricos aprofundados sobre o tema, amparada, naturalmente, por bases teóricas sólidas sobre o funcionamento de transformadores de potência e sua modelagem. Adicionalmente, um sistema especialista baseado em inteligência computacional pode ser desenvolvido para a automatização dos processos de medição e de diagnóstico em FRA, minimizando, ou até mesmo descartando, a exigência da atuação do especialista em FRA para a aplicação do método.

As possibilidades de expansão para um trabalho como este são muitas. Abaixo serão destacadas várias delas, algumas abrangendo melhorias na metodologia, tanto da análise quanto do próprio ensaio e outras no equipamento de medição e no software de análise dos dados.

8.2 Pesquisa em metodologia e técnicas online de FRA

Existe um forte interesse das concessionárias de energia em sistemas online, ou seja, que possam ser aplicados na operação normal do

transformador, sem o inconveniente de desligá-lo. Na obtenção da assinatura em frequência, isto seria possível retomando-se o estudo das técnicas de medição no domínio do tempo, as chamadas iFRA.

Portanto, mesmo possuindo algumas limitações, essas técnicas são uma importante fonte de pesquisa no assunto.

8.3 *Aperfeiçoamento na metodologia da análise*

8.3.1 *Uso de inteligência computacional*

O uso de ferramentas de inteligência computacional para auxiliar na análise dos dados será de grande valia, principalmente com o aumento da massa de dados resultante de ensaios subseqüentes.

Os algoritmos neurais, como as redes LS-SVM, utilizados para classificar os tipos de faltas em famílias e subfamílias são bastante promissores

Estas mesmas ferramentas computacionais auxiliarão, conforme mostrado no capítulo 8, a validar as medições realizadas em um ensaio. Desta forma o operador poderá definir momentos após o término das medições, se realiza ou não outro ensaio para obter resultados com maior representatividade e qualidade.

8.3.2 Metodologia estatística

A utilização de um método estatístico na análise, aliado a ferramentas de RNA, aumentará em 72% a qualidade das medições e em 46% a certeza dos diagnósticos. Esta metodologia deverá ser baseada em dados a respeito do próprio transformador e à família a qual pertence, e.g: Número médio de manobras, de descargas atmosféricas, sobrecargas entre outros.

8.3.3 Estudos classificatórios das falhas

O aprofundamento dos estudos classificatórios dos tipos de falhas e suas características resultarão numa precisão muito maior no diagnóstico e prognóstico de faltas.

8.4 *Aperfeiçoamento na metodologia do ensaio*

8.4.1 Ensaio de relação de transformação

A criação de metodologia para o ensaio de relação de transformação em função da frequência.

8.4.2 Experimentação em campo

A realização de um maior número de ensaios em condições reais de uso nas subestações e fábricas, onde a temperatura, ruídos eletromagnéticos, poluição ambiente e outros fatores, inclusive humanos, não podem ser controlados resultará em uma metodologia de ensaio mais robusta e precisa.

Isso é necessário, como mostrado no capítulo 7, devido à alta susceptibilidade deste ensaio a fatores externos, comprometendo a repetição e qualidade das medições.

8.4.3 Testes de Compatibilidade Eletromagnética (EMC)

Neste estudo, não foi mensurada a EMC do equipamento e a interação deste com o transformador na ocorrência de surtos eletromagnéticos. Um exemplo prático é a comprovação do que se chama de “Efeito Antena” no capítulo 6, onde supõe-se que a influência dos barramentos conectados às buchas do transformador não poderia ser compensada. Devido a este efeito, todo o equipamento deve ser desconectado e posteriormente aterrado para estabilizá-lo eletromagneticamente. Este tipo de manobra aumenta o tempo e os custos do ensaio.

Seguindo esta mesma linha, o estudo de EMC de cada componente do sistema de medição é imprescindível para a consolidação e comprovação da estabilidade do mesmo. Estes estudos podem resultar em alteração e conseqüente aperfeiçoamento da metodologia estabelecida neste estudo.

8.5 Aperfeiçoamento do equipamento de medição

Outra linha de continuidade, que poderá ser realizada em paralelo com a primeira, é a melhoria do sistema de medição.

8.5.1 Módulo para o ensaio de relação de transformação

A criação de um módulo capaz de realizar o ensaio de relação de transformação em função da frequência.

8.5.2 Sistema de cabos utilizados no ensaio

Este estudo mostrou o quanto os cabos influenciam no resultado das medições. A utilização de cabos longos degrada em demasia as medições, conforme mostrado no capítulo 4, onde ruídos são fortemente introduzidos nas medições. Os testes mantendo os cabos enrolados e esticados mostraram que os mesmos sofrem influência da mesma forma.

De encontro a este fato, a necessidade de cabos longos se torna evidente ao se ensaiar transformadores da classe de 245 kV e 500 kV.

Esta pesquisa mostrou como atenuar com sucesso a recepção de ruídos pelo cabo e a compensar reflexão do sinal de alta frequência ao longo do trajeto. Mas estas melhorias não foram implantadas nem testadas no equipamento de medição. Isso compromete de maneira geral a confiabilidade e repetição das medições.

8.5.3 Acoplamento do terminal de guarda

Quanto ao uso do terminal de guarda, pôde ser verificado que certos casos a ausência desta ligação tornava melhores os resultados das medições, diminuindo a sensibilidade do equipamento a ruídos eletromagnéticos.

Como este terminal é fundamental em diversas situações a proposta é pesquisar uma forma de reduzir esta sensibilidade deste terminal.

8.5.4 Estudo de novos conectores

Foi mostrado neste estudo que os conectores de ligação têm uma grande influência na qualidade da medição. Então a busca de conectores de ligação que tenham menor influência nos resultados da medição é fundamental. Apresentou-se um modelo simplificado deste futuro conector, mas um estudo mais detalhado deve ser desenvolvido porque esta única peça deve servir mecanicamente para uma ampla gama de tipos de conectores existente nas buchas dos transformadores.

8.5.5 Mudança na tensão de ensaio

Outro ponto importante de melhoria é a escolha da tensão aplicada que poderia apurar a sensibilidade da medição. Atualmente um sinal de 1 a 10 Vpp é utilizado, sendo que o valor típico é de 5 Vpp.

Existem certos casos onde o aumento deste sinal aplicado pode gerar respostas que se sobressaem aos ruídos de medição, conforme dito no capítulo 8. Essa melhoria na relação sinal-ruído aumenta a qualidade das medições.

8.5.6 Aprimoramento do projeto e dos circuitos eletrônicos do sistema de medição

O módulo de medição foi projetado e construído utilizando metodologias artesanais, por se tratar de um protótipo de laboratório. Mesmo assim, ele apresentou um desempenho satisfatório para os testes até 100 kHz.

Para alcançar freqüências superiores existe a necessidade de um projeto mais especializado das placas, dos circuitos e dos componentes utilizados.

Por exemplo, o amplificador operacional utilizado tem seu limite de amplificação linear próximo de 200 kHz. Isso causa uma deformação progressiva do sinal de tensão conforme a freqüência aumenta para além deste limite. Também foi verificado que o desenho da placa resulta em baixa compatibilidade eletromagnética para ruídos irradiados. Além disto, alguns componentes que não são eletromagneticamente compatíveis com outros.

A soma destes fatores causa uma limitação operacional tanto do ambiente onde será realizado o ensaio quanto da freqüência máxima atingida sem comprometer a qualidade.

8.5.7 Melhorias no gerador de sinais e no osciloscópio

Tanto o osciloscópio quanto o gerador de sinais utilizado no módulo de controle são inadequados para medições de sinais maiores que 2 MHz, considerando-se que para a aplicação são necessários cerca de 10 pontos por

ciclo de onda para uma recomposição satisfatória. Isso degrada o sinal produzido e conseqüentemente o sinal amostrado de forma que não é possível compensá-los por software. O efeito mais proeminente desta deficiência é a falta de resolução (serrilhamento ou *aliasing*) nas medições.

8.6 Aperfeiçoamento do Software de medição

8.6.1 Interface

Criação de uma interface mais amigável com o usuário.

8.6.2 Adição do controle e tratamento do ensaio de relação de transformação

A criação de um módulo capaz de controlar e tratar o ensaio de relação de transformação em função da frequência.

8.6.3 Introdução de todos os aperfeiçoamentos pesquisados

A introdução de todos os aperfeiçoamentos pesquisados na metodologia do ensaio e no tratamento das informações resultará em um grande ganho de produtividade.

9

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] **Dick, E. P., Erven, C. C.** *Transformer diagnostic testing by frequency response analysis*. 6, s.l. : IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1978, Vol. 27, pp. 2144–2144.

[2] **al, Marek Florkowski et.** *Detection of transformer winding deformations based on the transfer function—measurements and simulations*. s.l. : Meas. Science Technology, 2003, Vol. 14, pp. 1986-1992.

[3] **M. Wang, A. John Vandermaar, K. D. Srivastava.** Improved Detection of Power Transformer Winding Movement by Extending the FRA High Frequency Range. *IEEE Transactions On Power Delivery*. Julho de 2005, Vol. Vol. 20, No. 3.

[4] **K. G. Nilanga B. Abeywickrama, Yuriy V. Serdyuk, Satanislaw M. Gubanski.** Exploring Possibilities for Characterization of Power Transformer Insulation by Frequency Response Analysis (FRA). *IEEE Transactions On Power Delivery*. 2006, Vol. Vol. 21, No. 3.

[5] **Hassig, M., et al.** On-site applications of advanced diagnosis methods for quality assessment of insulation of power transformers. *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 2001, pp. 441 - 447.

[6] **Jorge Pleite, Carlos González, Juan Vázquez, Antonio Lázaro.** *Power Transformer Core Fault Diagnosis Using Frequency Response Analysis*. IEEE MELECON 2006. Benalmádena (Málaga), Spain, 2006 May 16-19.

[7] **K. Ragavan, L. Satish.** An Efficient Method to Compute Transfer Function of a Transformer From its Equivalent Circuit. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*. 2005, Vol. 20, 2.

[8] **J. Pleite, E. Olías, A. Barrado, A. Lázaro, J. Vázquez.** *A procedure to model the frequency response*. Madri, 2002. pp. 189 - 193.

[9] **Jayasinghe, J.A.S.B., et al.** *Investigations on sensitivity of FRA technique in diagnosis of transformer winding deformations*. 2004. pp. 496 - 499.

[10] **Sweetser, Charles e McGrail, Tony.** Sweep Frequency Response Analysis Transformer Applications: A Technical Paper from Doble Engineering. *Doble Engineering Company*. [Online] [Citado em: 25 de 06 de 2009.] http://www.doble.com/pdf/sfra_tech_paper_01.pdf.

[11] **Coffeen, L., Britton, J., Rickmann, J.** *A new technique to detect winding displacements in power transformers using frequency response analysis*. Bologna, 2003. Vol. 2, p. 7.

[12] **Jeong Seung Cheol, Kim Jong-Wook, Park PooGyeon, Kim Woo, Sang.** A pattern-based fault classification algorithm for distribution transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery.* 4, 2005, Vol. 20, pp. 2483 - 2492.

[13] **Vaessen, P.T.M., Hanique, E.** A new frequency response analysis method for power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery.* 1992, Vol. 7, 1, pp. 384 - 391.

[14] **Kim, Jong-Wook, et al.** Fault diagnosis of a power transformer using an improved frequency-response analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery.* 2005, Vol. 20, 1, pp. 169 - 178.

[15] **Ryder, Simon A., Tenbohlen, Stefan.** A comparison of the swept frequency and impulse response methods for making frequency response analysis measurements. [Online] http://www.uni-stuttgart.de/ieh/forschung/veroeffentlichungen/2003_Doble_Tenbohlen.pdf.

[16] **Harlow, James H.** Electric Power Engineering Handbook. [A. do livro] Richard C. Dorf, L.L. Grigsby H. Jin Sim and Scott H. Digby. *Electric Power Engineering Handbook.* s.l. : CRC Press, 2001, 3.2.

[17] **Carrijo Polonio Araujo, Daniel e Martins A. J. A. L., Costa M. A., Silvino J. L. Filho J. L. O. M.** *Revitalização de Transformadores de Potência Utilizando Aramida e Óleo Vegetal.* s.l. : Aranda Editora, Agosto de 2007, Eletricidade Moderna, Vol. 401.

[18] **Aguiar, Ezequiel Rabelo de.** *Análise de Resposta em Freqüência Aplicada em Transformadores de Potência.* Belo Horizonte : s.n., 2007. Dissertação de Mestrado.

[19] **Technologies, Agilent.** Impedance Measurement Handbook. [Online] 2003.
http://www.home.agilent.com/agilent/redirector.jsp?action=ref&cc=US&lc=eng&ckey=1000075407%3Aepsg%3Adow&cname=AGILENT_EDITORIAL.

[20] **Prabhakaran, S. Sullivan, C.R.** *Impedance-analyzer measurements of high-frequency power passives: techniques for high power and low impedance.* 2002. Vol. 2, pp. 1360- 1367.

[21] **Cerqueira Filho, W. R., et al.** *Medição de Resposta em Freqüência e Impedância Terminal como Técnica de Diagnóstico Aplicada a Transformadores de Potência.* Campina Grande, 2000.

[22] **Islam, S.M., Ledwich, G.** *Locating transformer faults through sensitivity analysis of highfrequency modeling using transfer function approach.* 1996. Vol. 1, pp. 38 - 41.

[23] **Guocai, Shang, Dachuan, Yu.** *Identifying internal faults of transformers through the similaritydegree between voltage and current.* 2000. Vol. 3, pp. 1868 - 1872.

[24] **Nirgude, P.M. Gunasekaran, B. Channakeshava Rajkumar, A.D. Singh, B.P.** *Frequency response analysis approach for condition monitoring of transformer.* 2004.

[25] **Wang, M., Vandermaar, A.J., Srivastava, K.D.** *Transformer winding movement monitoring in service - key factors affecting FRA measurements.* 5, s.l. : IEEE Electrical Insulation Magazine, 2004, Vol. 20, pp. 5 - 12.

[26] **Hasman, T., Kvasnieka, V., Totev, J.** *Sensitivity of methods for diagnostics of power transformer windings.* 1999. Vol. 5, pp. 244 - 247.

[27] **Neves, Alexandre, et al.** *Investigação Sobre Falhas no Transformadores 500 kV/185 MVA da Chesf na Usina Luiz Gonzaga.* Foz do Iguaçu, 1999.

[28] **Islam, S.M.** *Detection of shorted turns and winding movements in large powertransformers using frequency response analysis.* 2000. Vol. 3, pp. 2233 - 2238.

[29] **K. Feser, J. Christian, et al.** The transfer function method for detection of winding displacements on power transformers after transport, short circuit or 30 years of service. [Online] [Citado em: 25 de 06 de 2009.] <http://www.haefely.com/pdf/scientific/e1-97.pdf>.

[30] **Oliveira Filho, O. B., Cerqueira Filho, W. R., Rocha, A. C. O, Mendes, J. C.** *Medições de Ressonâncias em Transformadores de Potência.* Belém, 1997.

[31] **Ryder, S.A.** *Transformer diagnosis using frequency response analysis: results from fault simulations.* 2002. Vol. 1, pp. 399 - 404.

[32] **W. Lech, L. Tyminski.** *Detecting transformer winding damage-the low voltage impulse method.* s.l. : Electrical Review, 1966, pp. 768–772.

[33] **Pinhas, N., Islam, S., Hullett, J.** *On the development of transfer function method for fault identification in large power transformers on load.* 2000. Vol. 2, pp. 747 - 751.

10 APÊNDICE A

10.1 O Conceito de Impedância

A impedância de um circuito ou componente pode ser definida como sendo sua oposição à passagem de uma corrente alternada (ca), a uma dada frequência, e é representada por uma quantidade complexa. É um parâmetro que pode ser usado de forma eficiente para a caracterização de circuitos, componentes, e materiais utilizados para construir componentes.

Um vetor impedância é constituído de uma parte real (resistência, R) e uma parte imaginária (reatância, X , que pode ser indutiva ou capacitiva). Quando expressa na sua forma retangular fica clara sua composição em parte resistiva e reativa, na forma $Z = R \pm jX$. Além disso, impedâncias podem ser expressas na forma polar como uma amplitude e um ângulo de fase: $Z = |Z| \angle \theta$, conforme se pode visualizar na Figura 87.

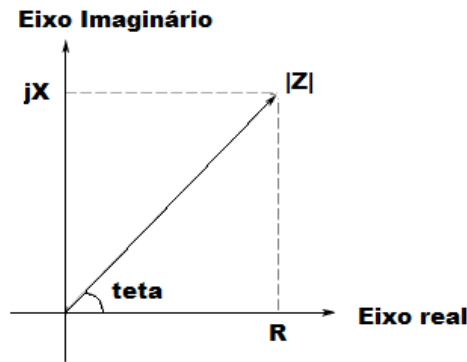


Figura 87: Impedância em suas partes real e imaginária.

A relação matemática entre as partes real, imaginária, e os módulos e ângulos de fase da impedância são obtidas diretamente da Figura 87:

$$\begin{aligned}
 Z &= R \pm jX = |Z| \angle \pm \theta \\
 R &= |Z| \cos \theta \\
 X &= |Z| \operatorname{sen} \theta \\
 Z &= \sqrt{R^2 + X^2} \\
 \theta &= \operatorname{arctg} \left(\frac{X}{R} \right)
 \end{aligned}
 \tag{Equação 20}$$

Em certos casos, é mais fácil trabalhar com o inverso da impedância, a admitância: $\frac{1}{Z} = \frac{1}{R \pm jX} = Y = G \pm jB$, onde Y representa a admitância, G a condutância e B a susceptância. A unidade no S.I. para a impedância é o ohm (Ω) e o da admitância é o siemens (S). A impedância é um parâmetro muito utilizado para a associação série de indutância e capacitâncias com resistências, pois pode ser expressa como a simples soma entre R e X. Já para os casos onde a associação entre tais componentes é paralela, prefere-se utilizar a admitância como parâmetro de caracterização por uma questão de conforto matemático, já que pode, dessa forma, também ser expressa como uma simples soma de G e B.

A reatância pode assumir a forma capacitiva (X_C) e indutiva (X_L). Por definição, $X_L = 2\pi fL$ e $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$, onde L é a indutância, C é a capacitância e f é a frequência.

O fator de qualidade (Q) mede a pureza da reatância (quão perto ela está de ser uma reatância pura, sem efeitos resistivos), e pode ser definida como a relação entre a energia armazenada num componente e sua dissipação de energia. O fator de qualidade é adimensional e expresso pela relação entre X e R ou entre G e B , do seguinte modo:

$$Q = \frac{X}{R}; Q = \frac{B}{G} \quad \text{(Equação 21)}$$

A Figura 88, Figura 89, Figura 90 e a Figura 91 exibem a representação no eixo complexo de impedâncias e admitâncias, indutivas e capacitivas.

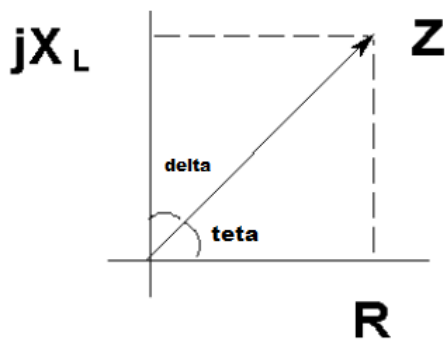


Figura 88: Representação de uma impedância indutiva.

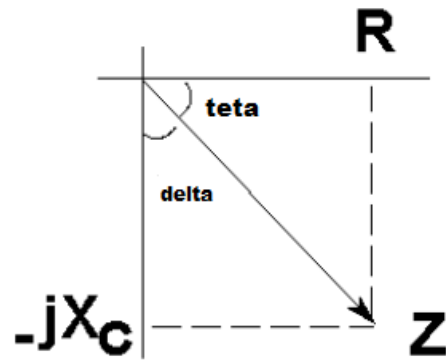


Figura 89: Representação de uma impedância capacitiva.

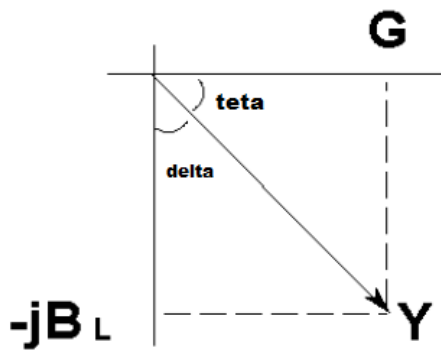


Figura 90: Representação de uma admitância indutiva.

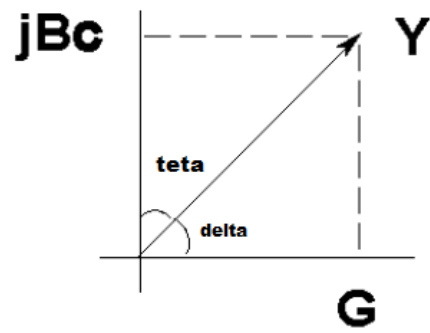


Figura 91: Representação de uma admitância capacitiva.

11 APÊNDICE B

11.1 A Classificação dos Resultados Utilizando Máquinas Vetor Suporte

Utilizando frequências variadas para a excitação do transformador é possível acentuar os efeitos indutivos e capacitivos e desta forma melhorar a sensibilidade dos ensaios. É nesse princípio que se baseia o conjunto de ensaios conhecido como análise de resposta em frequência. Estes ensaios fazem uma varredura numa faixa de frequências (geralmente de 10 Hz a 1 MHz) e obtém as características do equipamento para o domínio da frequência. Essas características são geralmente as impedâncias terminais e as relações de transformação do transformador.

Este ensaio é extremamente sensível ao modo como é realizado, sendo necessários diversos cuidados do executor. Após a medição, temos não existe uma maneira automática para a detecção de erros de medição e nem para o diagnóstico do equipamento através destas medições.

A proposta deste trabalho é resolver um destes problemas, o de detecção automática de erros de medição, através das *Least Square Support*

Vector Machine. Este tipo de máquina de aprendizado tem a característica de ter uma grande capacidade de generalização e ser de fácil implementação computacional.

O objetivo final do presente projeto de pesquisa é desenvolver um método de detecção de erros de medição nos ensaios de resposta em frequência transformadores de potência baseado em *Least Square Support Vector Machine*.

11.2 Dificuldades de se obterem diagnósticos

Os métodos baseados em resposta em frequência possuem uma alta sensibilidade a ruídos e a maneira como se executa a medição. Como pode ser observado nesse método é aplicada uma tensão senoidal de baixa tensão e de frequência variável no enrolamento. Estes ruídos podem ser gerados facilmente por interferências eletromagnéticas, problemas de conexão e variados fatores. Outra questão que causa uma flutuação nas medições são os cabos utilizados no ensaio, com conseqüentes efeitos de propagação e antena. Estes efeitos são maximizados pela ampla faixa de frequência aplicada, que varia de 10 Hz a 10 MHz. Neste espectro, são sentidos efeitos de sinais de rádio, descargas parciais em equipamentos próximos, indução eletromagnética em frequência da rede e outros tipos de interferência, todas estas diminuindo a confiabilidade dos ensaios.

Portanto, um método automatizado para a detecção destes erros de medição é altamente recomendável.

11.2.1 A Máquina Vetor Suporte (SVM)

As SVMs foram e estão sendo desenvolvidas pela equipe do pesquisador *Vladimir Vapnik* e é baseada na teoria de aprendizagem estatística, através da Minimização do Risco Estrutural. A SVM pode ser considerada como uma máquina de aprendizagem com uma camada escondida, treinada por um algoritmo supervisionado.

O treinamento de uma SVM é simples, envolvendo a resolução de um problema quadrático. A SVM realiza um mapeamento não-linear dos dados em um espaço de dimensão elevada no qual um hiperplano ótimo – com a maior margem de separação possível – possa ser construído.

A SVM possibilita a abordagem dos problemas de duas formas. Em uma não são considerados erros de classificação, ou seja, padrões que estejam fora dos valores típicos de sua classe irão desviar o hiperplano de separação de forma que o padrão incorreto seja classificado como correto. Na outra, são estabelecidas variáveis de folga, de forma que padrões fora dos valores típicos da sua classe podem ser desconsiderados, diminuindo assim a probabilidade de erro de classificação.

Algumas das principais características das SVM's são a sua boa capacidade de generalização e a robustez em grandes dimensões.

11.2.2 O método LS-SVM

A LS-SVM - *Least Squares Support Vector Machines* - é fruto de modificações na formulação da SVM. Estas modificações foram a utilização de

uma função de custo de mínimos quadrados e o uso de restrições de igualdade.

Sua principal característica é a menor complexidade computacional em relação à SVM, sem perda na qualidade das soluções.

Mas a LS-SVM possui a desvantagem que todos os dados de treinamento são considerados como vetores de suporte, diferentemente das SVM's. As SVM's detectam apenas uma pequena fração da amostra como vetores de suporte. Isso causa um uso excessivo de memória em simulações computacionais.

São apresentadas abaixo as principais características da LS-SVM, que justificam o seu uso no presente trabalho.

- Facilidade de implementação, resolução por meio de um sistema linear;
- Construção de hiperplanos paralelos para a maximização da margem de separação e utilização da função de kernel para a realização de um mapeamento implícito dos dados de entrada.

A desvantagem existente, mas que não é significativa no âmbito deste estudo é a inexistência da detecção dos vetores de suporte.

11.3 Aplicação da LS-SVM ao diagnóstico através do Ensaio de Resposta em Frequência

Devido às diversas características do LS-SVM em comparação a outros métodos de aprendizado de máquina e, principalmente, ao fato de suas deficiências não serem problema para esta aplicação, a LS-SVM foi aplicada ao estudo da detecção de erros de medição em ensaios de resposta em frequência. É importante esclarecer que os valores absolutos das medições e o perfil da curva mudam de transformador para transformador, o que torna imprescindível a presença de um especialista para averiguar se existe ou não erros na medição. Mas é possível perceber quando existe ruído em um conjunto de medições, mesmo a forma da resposta em frequência variando, devido justamente ao caráter aleatório das interferências.

Para a aplicação da LS-SVM na detecção de erros de medição, foi utilizada uma base de dados conforme descrita na Tabela 15.

Tabela 15: Base de dados utilizada na LS-SVM.

Quantidade de Amostras	Potência do Transformador	Dados de Treinamento	Número de Medições Válidas/Inválidas no Treinamento	Dados de Validação	Número de Medições Válidas/Inválidas na Validação	Espectro de Frequência	Quantidade de pontos amostrados
20	3 kVA	15	7/8	5	2/3	10 Hz – 10 MHz	300
20	250 kVA	15	8/7	5	3/5	10 Hz – 10 MHz	300
8	15 MVA	6	3/3	2	1/1	10 Hz – 10 MHz	300
8	25 MVA	6	2/4	2	2/0	10 Hz – 10 MHz	300

A máquina foi treinada e validada com os dados apresentados, utilizando-se as ferramentas do MATLAB oferecidas por *Kristiaan Pelckmans*

and *Johan Suykens*. Este toolbox possui diversas ferramentas que podem ser utilizadas para a implementação de máquinas LS-SVM.

11.3.1 Avaliação dos resultados

Após a máquina ter sido treinada conforme os parâmetros anteriores, foram aplicados vetores de validação para verificar se o aprendizado e a consequente classificação foram satisfatórios.

Devido ao espaço de entrada possuir 300 valores, não existe uma forma gráfica de avaliar a classificação e a sua superfície, devido à superfície ser um hiperplano. Então a curva ROC será utilizada para verificar a qualidade da classificação. O mesmo toolbox possui uma rotina para gerar a curva ROC.

A área abaixo da curva ROC está associada ao poder discriminante de um classificador. Geometricamente, a curva ROC é um gráfico que tem como eixo x a especificidade e eixo y a sensibilidade, num plano ROC unitário. A melhor situação de um classificador corresponde a uma linha horizontal no topo do gráfico - 0 % de especificidade e 100 % de sensibilidade - o qual percorre até o ponto de 100 % de especificidade e depois desce em direção ao eixo horizontal - 100 % de especificidade e 0 % de sensibilidade. Curvas abaixo disto significa que o classificador não obteve sucesso em todas as amostras. Apesar disso, qualquer curva situada acima da reta diagonal que atravessa o gráfico entre os pontos 0,0 e 100,100 pode ser considerada como aceitável. A sensibilidade significa que ele é capaz de decidir se o ruído está presente quando realmente ele está, e a especificidade significa a capacidade de decidir se o ruído está ausente quando de fato está ausente.

Ao executar a primeira validação utilizando todos os casos, obteve-se curva ROC da Figura 92.

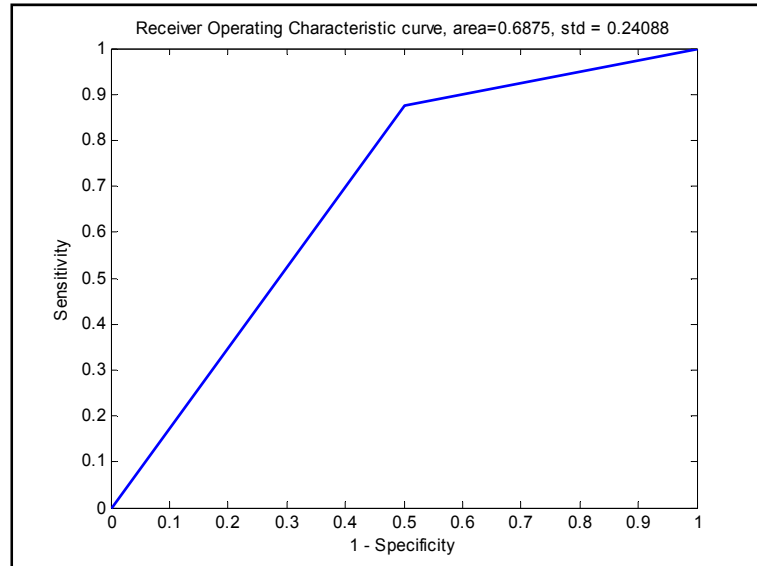


Figura 92: Curva ROC para toda a base de dados.

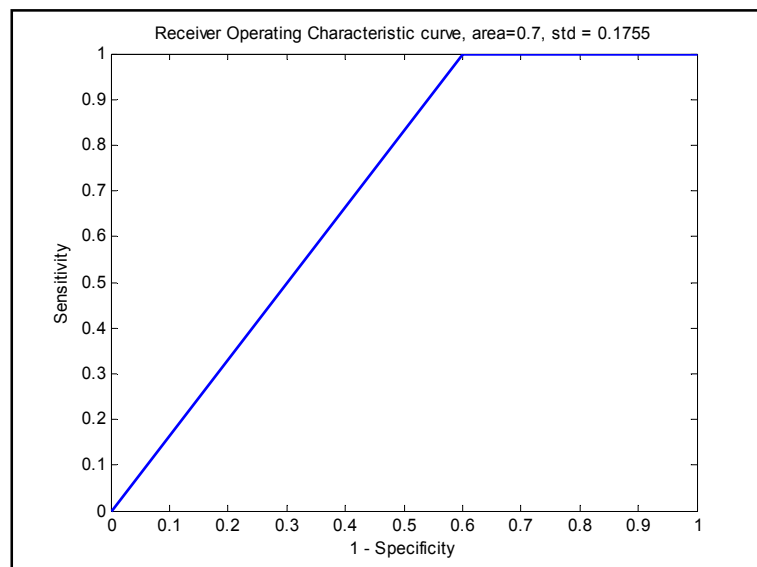


Figura 93: Curva ROC para toda a base de dados, menos o transformador de 25 MVA.

Pode-se observar que o classificador não conseguiu obter sucesso em todos os casos, mas a sua área está acima de 0,5, portanto obteve mais sucesso que falha. A especificidade está razoável, enquanto a sensibilidade poderia melhorar mais.

Este exemplo ilustra a dificuldade em se definir quando existe ou não ruído em uma medição.

Para averiguar o caso mais específico, reduzindo-se os tipos de transformadores, o conjunto de treino e teste foi apresentado à máquina sem os dados dos transformadores de 25 MVA. A Figura 93 apresenta o resultado.

Pode-se observar que o classificador não conseguiu obter sucesso em todos os casos, mas a sua área aumentou, portanto obteve mais sucesso que o caso anterior. A especificidade praticamente se manteve, enquanto a sensibilidade melhorou.

Novamente, reduziram-se os tipos de transformadores, o conjunto de treino e teste foi apresentado à máquina sem os dados dos transformadores de 25 MVA e dos de 15 MVA. A Figura 94 apresenta o resultado.

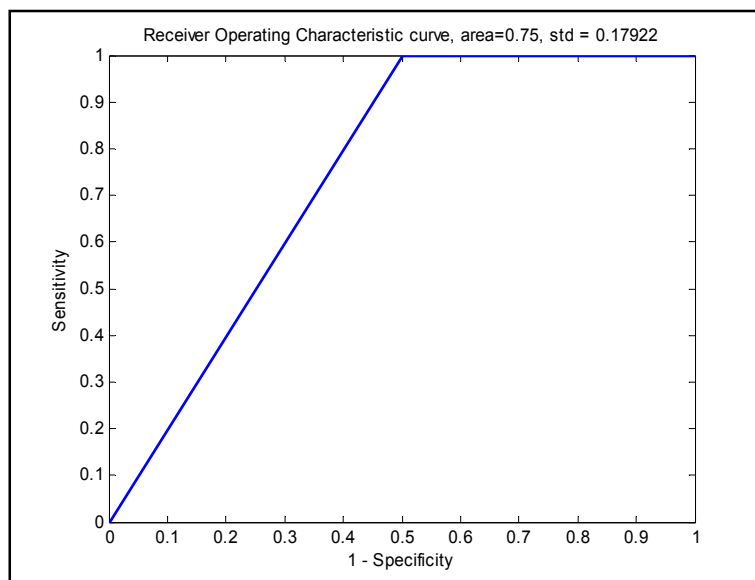


Figura 94: Curva ROC para toda a base de dados, menos o transformador de 25 MVA e o de 15MVA.

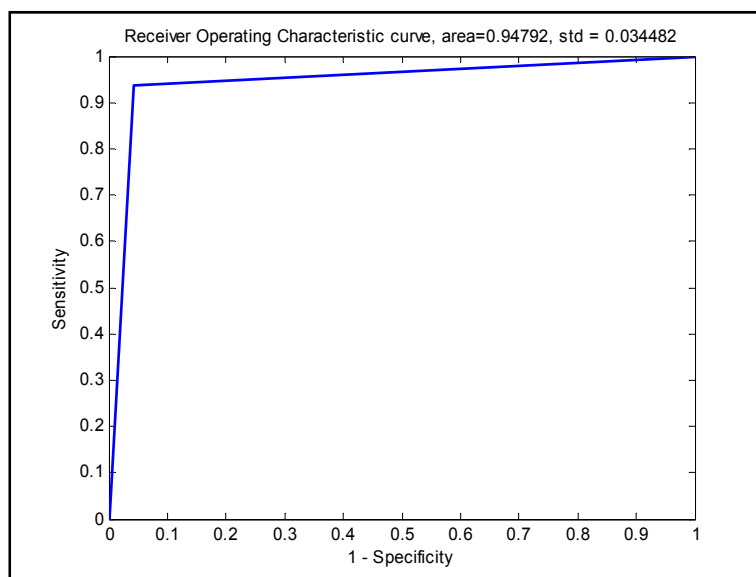


Figura 95: Curva ROC para o transformador de 3 kVA.

Observa-se que o classificador não conseguiu obter sucesso em todos os casos, mas a sua área aumentou ainda mais, portanto obteve mais sucesso que o caso anterior. A especificidade melhorou, enquanto a sensibilidade se manteve.

Novamente, reduziram-se os tipos de transformadores, o conjunto de treino e teste foi apresentado à máquina somente com os dados do transformador de 3 kVA. A Figura 95 apresenta o resultado.

Pode-se observar que o classificador não conseguiu obter sucesso em todos os casos, mas a sua área aumentou significativamente. Este caso obteve o maior índice de acerto. A especificidade piorou o que significa que a taxa de detecção de ruído quando não existe ruído está ruim e a sensibilidade aumentou o que mostra que a máquina conseguiu detectar mais ruídos quando realmente existem ruídos.

Pode-se observar que realmente a tarefa de detecção de ruídos em ensaios de resposta em frequência é uma tarefa muito complexa.

Devido à natureza do ensaio de resposta em frequência, os problemas de medição mostram-se muito significativos. A tentativa de detecção automática de ruídos neste tipo de ensaio é uma alternativa atraente para que o operador possa tomar as devidas medidas mitigatórias para reduzir estas interferências.

A utilização de uma poderosa máquina de classificação, como a LS-SVM foi proposta.

Após os estudos verificou-se que o uso desta máquina é viável, mesmo no âmbito deste trabalho não se tenha conseguido sucesso de 100% na classificação dos ensaios. No estado atual, este método poderia ser utilizado como auxiliar na detecção do erro de medida, mas não como um método definitivo.

A utilidade prática do ensaio de resposta em frequência é inquestionável, e sua associação com métodos computacionais de análise o torna muito mais interessante e prático.
