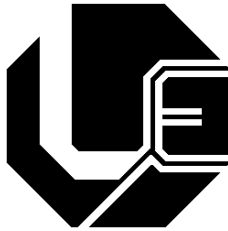


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



TESE DE DOUTORADO

**ESTRESSE ELETROMECHANICO EM
TRANSFORMADORES CAUSADO POR
CURTOS-CIRCUITOS “PASSANTES” E
CORRENTES DE ENERGIZAÇÃO**

Ana Claudia de Azevedo

Fevereiro

2007

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTRESSE ELETROMECÂNICO EM
TRANSFORMADORES CAUSADO POR
CURTOS-CIRCUITOS “PASSANTES” E CORRENTES DE
ENERGIZAÇÃO**

Ana Claudia de Azevedo

Tese de doutorado apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, por Ana Claudia de Azevedo, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutora em Ciências.

Banca examinadora:

Antônio Carlos Delaiba, Dr - Orientador (UFU)

Damásio Fernandes Júnior, Dr (UFCG)

José Carlos de Oliveira, Dr (UFU)

José Roberto Cardoso, Dr (USP)

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr (UFU)

*“O Senhor é o meu pastor e nada me faltará. Deita-me em verdes
pastos e guia-me mansamente em águas tranqüilas.
Refrigera a minha alma, guia-me pelas veredas da justiça, por amor
do seu nome.
Ainda que eu ande pelo vale da sombra da morte,
Não temerei mal algum, porque Tu estás comigo,
A Tua vara e o Teu cajado me consolam. Prepara-me uma mesa perante
os meus inimigos,
Unges a minha cabeça com óleo, o meu cálice transborda. Certamente
que a bondade e a misericórdia me seguirão todos os
dias da minha vida
E habitarei na casa do SENHOR por longos dias.”
Salmo 23*

Agradecimentos

Chega ao fim mais esta importante etapa de minha vida profissional. Agradeço a todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para o sucesso alcançado, que se concretiza com esta defesa de doutorado.

Meu reconhecimento a Universidade Federal de Uberlândia, aos professores, técnicos e colegas FEELT, pela colaboração ao longo desses anos todos.

Meus agradecimentos, de maneira muito especial ao professor Antônio Carlos Delaiba, meu orientador, pela amizade, confiança e incentivos recebidos. Ao professor José Carlos de Oliveira, presente nos momentos de necessidade.

Ao professor Bismarck Castillo Carvalho pelo incentivo e pelas discussões produtivas que culminaram no desenvolvimento deste trabalho. Ao colega Fernando Nunes Belchior, atualmente professor da Universidade Federal de Engenharia de Itajubá, pelo companheirismo e ajuda prestada, particularmente para resolver problemas com os equipamentos de informática.

Ao colega Élvio Prado da Silva, pelo incentivo para utilizar o Latex para a confecção da tese e auxílio em conhecer este processador de texto.

A senhora Marli Junqueira Buzzi, pela presteza e atenção, sempre que solicitada, em todos os assuntos vinculados ao programa de Pós-Graduação.

Resumo

Azevedo, Ana C. Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado por Curtos-Circuitos “Passantes” e Correntes de Energização, FEELT-UFU, Uberlândia, 2007, 158 páginas.

Transformadores de potência são dispositivos fundamentais para a operação de sistemas de potência e têm um peso significativo no custo total de uma instalação. Além dos custos de manutenção e substituição, as falhas nos transformadores devem ser levadas em consideração, no sentido de manter tanto a continuidade do fornecimento de energia como os padrões mínimos de qualidade estabelecidos para o insumo energético, aliado ao equilíbrio financeiro das empresas. Estudos realizados por concessionárias de diversos países deixam evidentes os enormes prejuízos financeiros das empresas do setor elétrico, devido às falhas mecânicas em transformadores. Defeitos provocados pelos esforços mecânicos decorrentes de correntes de curtos-circuitos passantes e correntes de *inrush* se constituem como importantes causadores de falhas em transformadores. Os esforços adicionais causados nos condutores/bobinas de transformadores, devido ao acréscimo das forças eletromagnéticas resultantes, podem, em alguns casos, vir a reduzir a vida útil de transformadores ou até mesmo provocar a sua perda total. A investigação dos efeitos danosos causados pelos fenômenos mencionados, portanto, torna-se imperativa. Nessa perspectiva, a presente tese tem por objetivo investigar as forças eletromagnéticas e o estresse mecânico resultantes de correntes de curtos-circuitos passantes e correntes de energização que se estabelecem no interior de transformadores. Para alcançar tal propósito, é empregada uma modelagem computacional no domínio do tempo baseada em forças magnetomotrizes e relutâncias magnéticas. Este modelo permite simulações de fenômenos de regime transitório e permanente, além de possibilitar o acesso às grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas. A metodologia é aplicada a dois modelos de transformadores operando em condições nominais e em curto-circuito. Devido às dificuldades de se encontrar publicações que contenham valores de referência para validar a metodologia proposta, os resultados são comparados aos correspondentes obtidos de um tradicional e bem aceito pacote do Método dos Elementos Finitos. Os resultados oriundos das simulações são avaliados em termos do grau de impacto que é provocado nas grandezas utilizadas para aferir os esforços mecânicos a que fica submetido um transformador, quando de sua energização ou na ocorrência de curtos-circuitos passantes. A partir dos esforços mecânicos determinados é apresentada uma proposta de metodologia que estabelece uma correlação entre os fenômenos aqui estudados e o impacto sobre a vida útil de transformadores, que pode auxiliar, de maneira preditiva, na redução do número de falhas inesperadas e, em consequência, nos prejuízos financeiros decorrentes.

Palavras-chave

Forças eletromagnéticas, estresse mecânico, método dos elementos finitos, correntes de curto-circuito, modelagem de transformadores, domínio do tempo.

Abstract

Azevedo, Ana C. Electromechanical Stresses in Transformers Caused by Through-Fault and Inrush Currents, FEELT-UFU, Uberlândia, 2007, 158 pages.

Power transformers are quite costly and essential to provide reliable electrical power system operation. Besides their maintenance or substitution costs, transformer failures must be taken into account, since its will have a large impact on the utility financial health due to the temporary loss of power delivery capability. Concerning transformer failure statistics, investigations carried out in many utilities in the world reveal that the effect of electromechanical stress caused by short-circuit currents is a relevant cause of failure in such equipment and they cause onerous financial damage. Failures caused by mechanical stress due to external short-circuit and due to inrush currents are an important aspect to be considered. The excessive strength caused in transformer conductors/windings due to electromagnetic forces can reduce the transformer lifetime or even cause irreversible damages of them. Therefore, the investigation of the harmful effects caused by transient phenomena becomes imperative. With this in mind, this work aims at investigating the electromagnetic forces and mechanical stresses due to external short-circuit and inrush currents inside the transformer. The studies are carried out using a time domain transformer model based on magnetomotive forces and magnetic reluctances, which allows simulating the transformer transient and steady state behavior regarding the electric, magnetic and mechanical aspects. The methodology is applied in two transformer models operating under rated and short-circuit conditions. Due to the lack of mechanical stress experimental values, a comparative performance analysis is obtained by comparing the simulated results and the well accepted results from finite element program. The results obtained from simulations are evaluated through of the impacts provoked in the variables used to analyze the mechanical stresses which occur in the transformers due to short-circuit and inrush currents. From the mechanical stress calculated it is presented a methodology that establishes a correlation between the phenomena here investigated and the impact in the transformer lifetime. This can assist, previously, in the reduction of the number of unexpected failures and, consequently, in financial damages.

Keywords

Electromagnetic force, mechanical stress, finite element method, short-circuit currents, transformer modeling, time-domain.

Sumário

Sumário	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Símbolos	xiv
1 Introdução Geral	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Contexto da presente tese	2
1.3 Estado da arte	4
1.4 Contribuições da tese	11
1.5 Estrutura da tese	13
2 Falhas em Transformadores Submetidos à Curtos-Circuitos ou Correntes de Energização	16
2.1 Considerações iniciais	16
2.2 Análise de falhas em transformadores	17
2.3 Condições de monitoramento	21
2.4 Curto-circuito	23
2.5 Correntes de <i>inrush</i>	27
2.5.1 Estimativa da amplitude do primeiro pico da corrente de <i>inrush</i>	28
2.6 Técnicas de modelagem	29
2.7 Considerações finais	32
3 Forças Eletromagnéticas e Estresse Mecânico: Abordagem Analítica	34
3.1 Considerações iniciais	34
3.2 Forças eletromagnéticas em transformadores	35
3.3 Campos magnéticos de dispersão em transformadores	37
3.4 Cálculo analítico das forças radiais	43
3.5 Cálculo analítico das forças axiais	47
3.5.1 Condição ideal	48
3.5.2 Condição não-ideal	50
3.6 Estresses eletromecânicos	54

3.6.1	Uma revisão das terminologias comumente utilizadas em estudos de esforços eletromecânicos	54
3.6.2	Falhas devido a forças radiais	57
3.6.3	Tipos de falhas devido a forças axiais	61
3.7	Considerações finais	63
4	Avaliação das Forças Eletromagnéticas em Transformadores Causadas por Curtos-Circuitos Externos Utilizando o MEF	65
4.1	Considerações iniciais	65
4.2	Introdução ao método dos elementos finitos	66
4.3	Estrutura de funcionamento do FEMM	68
4.4	Interação entre grandezas eletromagnéticas	70
4.5	Modelagem de transformadores reais	71
4.6	Resultados das simulações no FEMM	73
4.6.1	Características do transformador de 15 kVA	74
4.6.2	Características do transformador de 100 MVA	84
4.7	Síntese dos resultados	92
4.8	Considerações finais	94
5	Cálculo de Forças Eletromagnéticas e Estresse Mecânico em Transformadores Utilizando Técnicas no Domínio do Tempo	96
5.1	Considerações iniciais	96
5.2	A estruturação e sistematização de modelos eletromagnéticos	97
5.2.1	Determinação da relutância de dispersão a partir das dimensões do dispositivo	100
5.2.2	Cálculo de forças eletromagnéticas para implementação no domínio do tempo	103
5.3	Modelo computacional	106
5.4	Resultados das simulações	108
5.4.1	Resultados das simulações do transformador de distribuição	109
5.4.2	Resultados das simulações do transformador de potência	120
5.5	Síntese dos resultados	129
5.6	Considerações finais	131
6	Metodologia para Avaliação dos Impactos dos Estresses Mecânicos sobre os Transformadores	133
6.1	Considerações iniciais	133
6.2	Generalidades sobre resistência mecânica de transformadores	134
6.3	Proposta de metodologia	135
6.4	Aplicação da metodologia para a avaliação do estresse mecânico	138
6.4.1	Quanto aos aspectos elétricos	139
6.4.2	Quanto aos aspectos mecânicos	139
6.5	Análise dos estresses provocados pelas correntes de <i>inrush</i>	143
6.6	Técnicas para detecção do movimento dos enrolamentos	145
6.7	Softwares de diagnósticos e sistemas inteligentes	146
6.8	Considerações finais	147

7	Conclusões Finais	149
7.1	Sugestões para trabalhos futuros	153
	Referências Bibliográficas	154

Lista de Figuras

2.1	<i>Curva de falhas em transformador “bathtub”.</i>	18
2.2	<i>Gráfico de custos em relação ao número de falhas.</i>	19
2.3	<i>Corrente de curto-circuito de uma falta completamente assimétrica.</i>	25
2.4	<i>Variação da força com o tempo durante uma falta assimétrica.</i>	26
3.1	<i>Campos de dispersão e forças axiais e radiais.</i>	36
3.2	<i>Densidade de campo magnético típico de um transformador a vazio.</i>	38
3.3	<i>Correntes instantâneas nos enrolamentos interno e externo.</i>	39
3.4	<i>Campo magnético devido a corrente nos enrolamentos.</i>	40
3.5	<i>Seção transversal de um lado do transformador mostrando as forças radiais nos enrolamentos e a distribuição da densidade de fluxo axial.</i>	43
3.6	<i>Estresse de tração e de compressão nos enrolamentos concêntricos.</i>	45
3.7	<i>Método para cálculo de estresse de tração médio.</i>	45
3.8	<i>Distribuição de fluxo radial e de força axial em enrolamentos concêntricos iguais.</i>	48
3.9	<i>Forças axiais nos enrolamentos magneticamente balanceados: $F_1=F_2$.</i>	49
3.10	<i>Forças axiais nos enrolamentos com deslocamento axial: $F_1<F_2$.</i>	50
3.11	<i>Seção transversal de um lado do transformador mostrando as forças axiais nos enrolamentos e a distribuição de densidade de fluxo de dispersão radial.</i>	52
3.12	<i>Determinação do diagrama de ampère-espiras residuais para enrolamento com derivação em uma extremidade.</i>	52
3.13	<i>Método para determinação da carga que causará deformação.</i>	55
3.14	<i>Carga de prova do cobre para vários níveis de “dureza”.</i>	56
3.15	<i>a) Ilustração dos espaçadores axiais e outros componentes do transformador e b) Deformação forçada (“forced buckling”) no enrolamento interno.</i>	58
3.16	<i>Deformação “livre” no enrolamento interno: Free buckling.</i>	59
3.17	<i>Inclinação dos condutores entre espaçadores radiais - vista lateral (Bending).</i>	61
3.18	<i>Inclinação de condutores devido a forças axiais - seção transversal.</i>	62
4.1	<i>Vista superior do transformador trifásico (dimensões em mm).</i>	75
4.2	<i>Vistas frontal e lateral do núcleo do transformador utilizado.</i>	75
4.3	<i>Características de magnetização da chapa de aço silício do transformador.</i>	76
4.4	<i>Malha de elementos finitos bidimensional do transformador de 15 kVA.</i>	77
4.5	<i>Curva de magnetização do transformador sob estudo.</i>	78
4.6	<i>Densidade de fluxo magnético no núcleo: condição nominal.</i>	78

4.7	<i>Densidade de fluxo magnético de dispersão em função da altura do enrolamento: condição nominal.</i>	79
4.8	<i>Forças axial e radial no enrolamento externo: condição nominal.</i>	80
4.9	<i>Forças axial e radial no enrolamento interno: condição nominal.</i>	80
4.10	<i>Densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador: curto-circuito.</i>	81
4.11	<i>Densidade de fluxo magnético de dispersão em função da altura do enrolamento: curto-circuito.</i>	81
4.12	<i>Forças axial e radial no enrolamento externo: curto-circuito.</i>	82
4.13	<i>Forças axial e radial no enrolamento interno: curto-circuito.</i>	82
4.14	<i>Densidade de fluxo magnético para transformador com tap's central.</i>	83
4.15	<i>Densidade de fluxo magnético de dispersão em função da altura do enrolamento com tap's.</i>	83
4.16	<i>Forças radial e axial no enrolamento externo com tap's.</i>	84
4.17	<i>Forças radial e axial no enrolamento interno com tap's.</i>	84
4.18	<i>Disposição dos enrolamentos do transformador de potência utilizado nas simulações.</i>	85
4.19	<i>Dimensões do núcleo trifásico do transformador.</i>	86
4.20	<i>Curva de magnetização da chapa de aço E004.</i>	86
4.21	<i>Malha de elementos finitos bidimensional do transformador de 100 MVA.</i>	87
4.22	<i>Curva de magnetização do transformador de potência obtida no FEMM.</i>	88
4.23	<i>Densidade de fluxo magnético no núcleo: condição nominal.</i>	88
4.24	<i>Densidade de fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos 1 e 2: condição nominal.</i>	89
4.25	<i>Forças axial e radial no enrolamento 2 da AT: condição nominal.</i>	90
4.26	<i>Forças axial e radial no enrolamento 1 da BT: condição nominal.</i>	90
4.27	<i>Densidade de fluxo magnético: curto-circuito.</i>	91
4.28	<i>Densidade de fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos 1 e 2: curto-circuito.</i>	91
4.29	<i>Forças axial e radial no enrolamento externo: curto-circuito.</i>	92
4.30	<i>Forças axial e radial no enrolamento interno: curto-circuito.</i>	92
5.1	<i>Diagrama esquemático equivalente do template wind.sin.</i>	97
5.2	<i>Diagrama esquemático equivalente do template core.sin.</i>	99
5.3	<i>Enrolamentos concêntricos utilizados no cálculo da área de dispersão.</i>	101
5.4	<i>Vista superior de uma coluna do transformador</i>	102
5.5	<i>Vista frontal de uma coluna do transformador</i>	102
5.6	<i>Segmento elementar de condutor percorrido por uma corrente I.</i>	103
5.7	<i>Modelo computacional implementado.</i>	106
5.8	<i>Conexão dos templates para cálculo dos esforços.</i>	107
5.9	<i>Distribuição de fluxo no interior de um transformador trifásico.</i>	109
5.10	<i>Modelo eletromagnético do transformador trifásico de três colunas e dois enrolamentos concêntricos por fase.</i>	110
5.11	<i>Tensões trifásicas aplicadas ao transformador de 15 kVA.</i>	111
5.12	<i>Correntes trifásicas em regime permanente: condição nominal.</i>	112
5.13	<i>Densidade de fluxo magnético no núcleo: condição nominal.</i>	112
5.14	<i>Ciclo de histerese da fase R, para o material do núcleo ($V_{FN} = 127V$): condição nominal.</i>	112
5.15	<i>Densidade de fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos: carga nominal.</i>	113

5.16	<i>Forças radiais nos enrolamentos da fase R: carga nominal.</i>	114
5.17	<i>Forças radiais nos enrolamentos da fase S: carga nominal.</i>	114
5.18	<i>Forças radiais nos enrolamentos da fase T: carga nominal.</i>	114
5.19	<i>Tensões nas três fases do transformador: curto-circuito trifásico.</i>	115
5.20	<i>Correntes nas três fases da AT: curto-circuito trifásico.</i>	116
5.21	<i>Correntes nas três fases da BT: curto-circuito trifásico.</i>	116
5.22	<i>Densidade de fluxo de dispersão entre os enrolamentos: curto-circuito trifásico.</i>	116
5.23	<i>Forças radiais nos enrolamentos concêntricos na fase R: curto-circuito.</i>	117
5.24	<i>Forças radiais nos enrolamentos concêntricos na fase S: curto-circuito.</i>	118
5.25	<i>Forças radiais nos enrolamentos concêntricos na fase T: curto-circuito.</i>	118
5.26	<i>Estresses eletromecânicos nos enrolamentos da AT e BT do transformador de 15 kVA: curto-circuito.</i>	118
5.27	<i>Correntes trifásicas resultantes da energização do transformador.</i>	119
5.28	<i>Densidade de fluxo magnético de dispersão durante o regime transitório de energização.</i>	120
5.29	<i>Modelo equivalente do transformador de 100 MVA.</i>	120
5.30	<i>Formas de onda das correntes trifásicas da AT: condição nominal.</i>	122
5.31	<i>Formas de onda das correntes trifásicas da BT: condição nominal.</i>	122
5.32	<i>Densidade de fluxo magnético no núcleo: condição nominal.</i>	122
5.33	<i>Ciclo de histerese na fase R para o material do núcleo: condição nominal.</i>	122
5.34	<i>Densidade de fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos: condição nominal.</i>	123
5.35	<i>Forças radiais nos enrolamentos 2 da AT e 1 da BT: condição nominal.</i>	123
5.36	<i>Formas de onda das correntes trifásicas na BT: curto-circuito.</i>	124
5.37	<i>Formas de onda das correntes trifásicas na AT: curto-circuito.</i>	124
5.38	<i>Densidade de fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos concêntricos: curto-circuito.</i>	125
5.39	<i>Forças radiais nos enrolamentos 2 da AT e 1 da BT: curto-circuito.</i>	125
5.40	<i>Estresses eletromecânicos nos enrolamentos da AT e BT do transformador de 100 MVA: curto-circuito.</i>	126
5.41	<i>Correntes de inrush das fases R, S e T durante os primeiros 500ms de simulação.</i>	127
5.42	<i>Campos magnéticos de dispersão durante o regime transitório de energização.</i>	128
5.43	<i>Forças oriundas da corrente de energização no enrolamento 2 das fases R, S e T.</i>	128
5.44	<i>Estresse de tração produzido pelas correntes de inrush no transformador de 100 MVA.</i>	129
6.1	<i>Metodologia para análise técnica da ocorrência de danos no transformador.</i>	136
6.2	<i>Estresse de tração radial para o transformador de 15 kVA comparado aos estresses de escoamento e estresse admissível: curto-circuito.</i>	141
6.3	<i>Estresse de tração radial máximo para o transformador de 100 MVA comparado aos estresses de escoamento e estresse admissível (BT): curto-circuito.</i>	142
6.4	<i>Estresse de tração radial para o transformador de 100 MVA comparado aos estresses de escoamento e estresse admissível (AT): curto-circuito.</i>	142

6.5	<i>Estresse de tração radial para o transformador de 100 MVA comparado aos estresses de escoamento e estresse admissível: inrush.</i>	144
-----	---	-----

Lista de Tabelas

2.1	<i>Causas típicas de falhas em transformadores.</i>	17
2.2	<i>Custos de falhas.</i>	19
2.3	<i>Percentual de faltas para falhas em transformadores de potência.</i>	20
2.4	<i>Diagnósticos de avarias de falhas em transformadores de distribuição.</i>	21
4.1	<i>Estudos computacionais - FEMM</i>	73
4.2	<i>Características do transformador trifásico de 15 kVA</i>	74
4.3	<i>Pontos específicos da curva B-H da figura 4.3</i>	76
4.4	<i>Características do transformador trifásico de 100 MVA</i>	85
4.5	<i>Pontos específicos da curva de magnetização da figura 4.20</i>	87
4.6	<i>Síntese dos resultados obtidos para o transformador de 15 kVA</i>	92
4.7	<i>Síntese dos resultados obtidos para o transformador de 100 MVA</i>	92
4.8	<i>Comparação entre as simulações e cálculos analíticos: condição nominal e curto-circuito: transformador de 15 kVA</i>	93
4.9	<i>Comparação entre as simulações e cálculos analíticos: condição nominal e curto-circuito: transformador de 100 MVA</i>	93
5.1	<i>Estudos computacionais - Domínio do tempo</i>	108
5.2	<i>Comparação entre as simulações da condição nominal e curto-circuito: transformador de 15 kVA</i>	129
5.3	<i>Comparação entre as simulações da condição nominal e curto-circuito: transformador de 100 MVA</i>	130
5.4	<i>Síntese dos resultados do caso C (inrush): transformador de 15 kVA e 100 MVA</i>	130
5.5	<i>Síntese dos resultados dos estresses de tração radial: transformador de 15 kVA e 100 MVA</i>	131

Lista de Símbolos

I_{cc} - valor de pico da corrente de curto-circuito [A]
 k - fator de assimetria
 S_n - potência nominal de saída do transformador [MVA]
 V - tensão nominal fase-fase [V]
 Z - impedância por unidade do transformador
 $i_{0\max}$ - pico da corrente de *inrush*
 H - intensidade de campo magnético
 n - número de espiras do enrolamento energizado
 h_w - altura do enrolamento energizado
 $\vec{f}$ - densidade volumétrica de força magnética (N/m^3)
 $\vec{J}$ - densidade superficial de corrente (A/m^2)
 B_r - densidade de fluxo magnético na direção radial [T]
 B_a - densidade de fluxo magnético na direção axial [T]
 F_r - força radial [N]
 F_a - força axial [N]
 ϕ - fluxo magnético [wb]
 n - número de espiras
 I_n - corrente nominal [A]
 D_m - diâmetro médio do enrolamento [m]
 h - altura do enrolamento [m]
 F_{rmed} - força radial média [N]
 S - área da seção transversal [m]
 I_{max} - valor de pico da corrente [A]
 σ_{medio} - estresse médio [N/m^2]
 R_{cc} - resistência em corrente contínua [Ω]
 ρ - resistividade do condutor na temperatura de 75° C [$\Omega.m$]
 d_0 - espaço entre os enrolamentos [m]
 d_1 e d_2 - espessura radial dos enrolamentos concêntricos [m]
 h_{eff} - comprimento efetivo do caminho de fluxo radial [m]
 a - comprimento médio da derivação
 σ - tração (ou estresse) aplicada [N/m^2]
 ε - deformação resultante
 σ_{crit} - valor do estresse crítico [N/m^2]
 E - módulo de elasticidade do material [N/m^2]
 e - espessura do condutor [m]
 R - raio do enrolamento [m]
 k - constante para espessura equivalente
 D - diâmetro do enrolamento [m]
 N - número de suportes axiais

- $\vec{A}$ - potencial vetor magnético [$wb.m^{-1}$]
 $\vec{J}_d$ - densidade de corrente de deslocamento
 σ - condutividade elétrica do material [$S.m^{-1}$]
 $\vec{\nabla} \times \vec{A}$ - rotacional de $\vec{A}$
 $\vec{\nabla} V$ - gradiente do potencial elétrico
 V - potencial elétrico
 ρ_v - densidade volumétrica de carga
 $\vec{E}$ - vetor campo elétrico
 $\vec{F}$ - força magnética total
 dV - elemento de volume diferencial
 $d\vec{F}$ - elemento diferencial de força
 $\vec{u}$ - versor unitário à superfície
 ep, em - terminais elétricos, positivo (ep) e negativo(em)
 mp, mm - terminais magnéticos, positivo (mp) e negativo (mm)
 r - resistência elétrica [$\Omega.m$]
 ϕ - fluxo magnético [wb]
 i - corrente instantânea [A]
 v - tensão instantânea [V]
 Fmm - força magnetomotriz [A-espira]
 $\Re$ - relutância do núcleo magnético [$A - espira/wb$]
 p, m - pinos magnéticos
 l - comprimento do núcleo magnético [m]
 μ - permeabilidade do material do núcleo magnético [H/m]
 μ_0 - permeabilidade magnética do vácuo [H/m]
 μ_r - permeabilidade magnética relativa do material do núcleo
 S_{disp} - área do espaço os entre enrolamentos de uma mesma fase [m^2]
 l_m - Comprimento médio de circunferência dos enrolamentos [m]
 S_{AR} : Área efetiva ou equivalente do espaço de ar entre o núcleo ferromagnético e o enrolamento interno [m^2]
 S_c - Área aparente da coluna [m^2]
 $dibi$ - Diâmetro interno da bobina interna [m]
 $dibe$ - Diâmetro interno da bobina externa [m]
 $debi$ - Diâmetro externo da bobina interna [m]
 $debe$ - Diâmetro externo da bobina externa [m]

Capítulo 1

Introdução Geral

1.1 Considerações iniciais

Transformadores são equipamentos essenciais para o funcionamento de sistemas elétricos de potência. São dispositivos de custo significativo, comparativamente aos custos totais de uma instalação. Os procedimentos para sua substituição ou reparo são igualmente onerosos para a empresa proprietária. Neste particular, além dos custos de manutenção/reparo ou substituição, devem ser levados em consideração outros aspectos que, em decorrência da falha de um equipamento, também têm impacto sobre a saúde financeira da empresa. Focando as empresas concessionárias de energia, de um lado, a perda de transformadores ocasiona a redução da receita pela energia não “vendida”, devido à interrupção do fornecimento de energia elétrica e de outro, à possibilidade de sofrer penalidades, também com implicações financeiras, por parte dos órgãos reguladores do setor elétrico, por descumprimento dos índices mínimos de desempenho estabelecidos. Em vista disso, a proteção adequada, principalmente dos grandes transformadores, contra eventuais falhas é uma tarefa que merece atenção especial, constituindo-se numa das mais desafiadoras tarefas da área de proteção [1].

Apesar da importância incontestável deste tipo de dispositivo para a operação dos sistemas elétricos e a grande quantidade de bibliografia e estudos encontrados sobre transformadores, pouco há sobre os efeitos dos esforços mecânicos decorrentes de elevadas correntes transitórias, sejam de correntes de energização ou devido a faltas nos sistemas elétricos. Por outro lado, estudos realizados com concessionárias de diver-

sos países [2], deixam evidente os enormes prejuízos financeiros de empresas do setor elétrico, devido a falhas mecânicas de transformadores. Dentre as causas destacam-se, justamente os esforços mecânicos, ou estresse, verificados nas estruturas internas dos dispositivos, em decorrência dos esforços adicionais provocados pelas correntes transitórias de energização ou a faltas no sistema de potência a jusante do equipamento. Estes tipos de fenômenos figuram entre as maiores razões de ocorrência de falhas internas em transformadores. Dentre os efeitos causados pelas correntes transitórias, pode-se citar as vibrações internas, que provocam deterioração na isolação, fadiga mecânica nos condutores/enrolamentos e danos nas estruturas de sustentação dos enrolamentos.

1.2 Contexto da presente tese

A interrupção do fornecimento de energia elétrica, devido a falha em transformadores, pode ter causas diversas, de natureza tanto interna quanto externa ao dispositivo, ou seja, construtiva, ambiental e/ou operacional.

O projeto de transformadores de potência é realizado prevendo-se as situações mais críticas a que possam ser submetidos no local destinado para sua instalação, ou seja, devem ter a capacidade de suportar as solicitações de naturezas diversas a que possam ser expostos. Um exemplo disto são as forças dinâmicas causadas por correntes transitórias. Para assegurar a sua integridade física, na fase de projeto, os critérios de dimensionamento das partes ativas e das estruturas de sustentação dos transformadores levam em consideração as mais severas correntes de curto-circuito e os maiores picos passíveis de ocorrência. Considera-se que, sob tais condições extremas, estes equipamentos sejam submetidos também às forças máximas. Apesar do extremo cuidado observado na fase de projeto destes dispositivos, a prática tem mostrado um número de ocorrências de falhas significativas, o que se traduz em prejuízos consideráveis [2]. As falhas podem ser atribuídas a fatores diversos, dentre os quais destacam-se: pequenos defeitos na fase de montagem, estimativa incorreta/desatualizada das máximas correntes transitórias, qualidade dos materiais empregados, ferramentas e técnicas de cálculo sem a devida precisão, dentre outros.

Outro fator determinante na ocorrência de falhas diz respeito à deterioração, ao longo de sua vida útil, das características mecânicas e elétricas, dos materiais utilizados na fabricação dos transformadores [3]. Com o envelhecimento, as características

internas do transformador tendem a se degradar o que aumenta as possibilidades de falhas. Adicionalmente ao desgaste natural, a probabilidade de ocorrência de falhas é potencializada por condições adversas naturais ou de operação, tais como, descargas atmosféricas, transitórios de chaveamento, curtos-circuitos, dentre outros. Em outras palavras, um transformador novo tem melhores condições, elétricas e mecânicas, para resistir às condições desfavoráveis mencionadas.

Obviamente, a adoção da manutenção preditiva de transformadores, proteção adequada e, dentro do possível, a prevenção de ocorrência de falhas e condições adequadas de operação são questões de suma importância para as concessionárias de energia elétrica e indústrias. Nessa direção, o monitoramento *on-line* dos transformadores de potência seria um grande aliado num programa de prevenção de falhas, evitando a ocorrência de danos de maiores proporções. Esta questão, no entanto, encontra limitações de ordem financeira, pois, a implementação de métodos de monitoramento existentes implicaria em altos custos para aplicação em transformadores [4].

Uma alternativa às limitações do monitoramento *on-line* são as simulações digitais. Estas surgem como uma das maneiras mais econômicas, convenientes e perfeitamente viáveis para fornecer dados para análise dos fenômenos transitórios e dos efeitos destes sobre a vida dos transformadores. Nas últimas décadas, o cenário da investigação de fenômenos transitórios tem sido bastante influenciado pelos avanços na tecnologia digital, estritamente relacionados ao desenvolvimento da eletrônica digital, dos computadores, da sofisticação dos equipamentos digitais de medição e da facilidade para consecução de tais ferramentas. No que tange aos estudos de dispositivos eletromagnéticos, o desenvolvimento de programas capazes de realizar cálculos complexos, levando em conta as interações elétricas e magnéticas, bem como, o efeito da saturação, possibilita uma investigação mais criteriosa da distribuição de fluxo no interior de equipamentos e dos efeitos decorrentes dessa distribuição, proporcionando análises mais precisas do desempenho dos dispositivos.

Análises relacionadas com fenômenos transitórios dependem, quase que exclusivamente de simulações digitais. No entanto, o uso destes recursos para executar estas investigações requer modelos eficientes e precisos para todos os dispositivos presentes no sistema elétrico. Neste contexto, vários pacotes computacionais destinados à análise de fenômenos transitórios, são atualmente disponíveis. Adicionalmente, para estudos como o aqui proposto, os pacotes computacionais devem, ainda, permitir a avaliação

do desempenho mecânico do dispositivo.

Nesse contexto, a pesquisa aqui focada, propõe-se a contribuir no estudo de uma das possíveis causas de danos físicos em transformadores de potência, valendo-se, para tanto, da simulação digital. A idéia fundamental consiste em realizar investigações sobre os estresses mecânicos causados pelas forças eletromagnéticas provenientes de curto-circuito e corrente de energização utilizando, para isso, a modelagem e implementação computacional de transformadores, empregando duas plataformas distintas. Uma delas utiliza a técnica dos elementos finitos, num pacote computacional dedicado para este tipo de estudo a qual é utilizada para balizar a outra ferramenta que emprega um pacote computacional, utilizando técnicas no domínio do tempo e permite a simulação de fenômenos de regime permanente e transitórios. Complementando os aspectos anteriores, cálculos analíticos para a determinação de grandezas de interesse, tais como correntes, fluxos magnéticos, densidades de fluxo magnético, forças eletromagnéticas e estresse mecânico, são realizados e servem como subsídio para as análises comparativas de desempenho dos modelos desenvolvidos, sob o ponto de vista quantitativo e qualitativo.

A possibilidade de simular os esforços mecânicos adicionais provocados pelas altas correntes de *inrush* e de curto-circuito permitirão antever um potencial de risco para um determinado equipamento. Assim será viável a previsão de interrupções do fornecimento de energia elétrica. Essa informação, disponibilizada com antecedência à ocorrência do fato, pode ser utilizada como subsídio para a tomada de decisões técnicas/gerenciais quanto a melhor oportunidade ou conveniência de se reparar e/ou substituir um equipamento, preventivamente. Estes estudos prévios possibilitarão ainda, tomadas de decisão, por exemplo, no sentido de minimizar os problemas relacionados com a perda da capacidade de transmissão dos concessionários.

1.3 Estado da arte sobre forças eletromagnéticas e estresse mecânico em transformadores

A investigação dos fenômenos oriundos de curto-circuito e a energização de transformadores pode ser realizada de diferentes maneiras, empregando-se, para tanto, técnicas diversas. Dentre elas destacam-se os:

- métodos analíticos para o cálculo das correntes e estimativa das forças;
- métodos que se valem de técnicas do Método dos Elementos Finitos;
- métodos que empregam técnicas no domínio do tempo;
- métodos que fazem uso de sistemas de medição com capacidade para armazenamento/análise em tempo real das informações de interesse.

Ressalta-se que o método que utiliza sistemas de medição foge ao escopo desta proposta de tese, motivo pelo que não é abordado no presente trabalho.

Na seqüência é apresentada uma síntese das publicações consideradas como sendo de maior relevância e que, de alguma forma, serviram para consubstanciar a realização da pesquisa. De maneira a tornar mais didática a apresentação dos resumos, dentro do possível, procurou-se agrupar as referências por assunto pesquisado.

- **Quanto aos curtos-circuitos:**

Investigações referentes a curtos-circuitos e seus efeitos danosos sobre transformadores constitui-se em temas cotidianos para os profissionais do setor há muitas décadas. Porém, foi a partir dos anos 70 que se verificou um aumento significativo do número de falhas nestes dispositivos. Tal fato pode ser relacionado a fatores como: aumento das potências nominais dos transformadores e das capacidades crescentes de curto-circuito dos sistemas elétricos [5].

Sobre esse assunto, diversas publicações utilizam das potencialidades do MEF para desenvolver estudos referentes aos estresses originados pelos curtos-circuitos, seja em transformadores de potência ou de distribuição. As referências [6] e [7] apresentam o cálculo das forças eletromagnéticas devido aos curtos-circuitos utilizando o método mencionado. A referência [6] apresenta, ainda, as fórmulas para cálculos das forças eletromagnéticas axiais e radiais, a partir da expressão da densidade de força e baseado em expressões aproximadas de correntes transitórias que se manifestam durante curtos-circuitos trifásicos. Os resultados das simulações são comparados com as fórmulas utilizadas em cálculos de projetos convencionais de transformadores, referentes aos curtos-circuitos trifásicos. As análises realizadas permitiram concluir que as fórmulas convencionais utilizadas para se efetuar cálculos de forças radiais, na fase de projeto,

podem necessitar de ajustes para os enrolamentos localizados dentro das janelas, devido à influência do núcleo de ferro. É recomendado no artigo, que a força axial seja determinada utilizando métodos numéricos.

A referência [7] faz uso do MEF para efetuar o cálculo das forças eletromagnéticas. Para tanto, utiliza como dado de entrada, o valor do primeiro pico da corrente de curto-circuito trifásico que circula nos enrolamentos. Os resultados dos testes computacionais mostraram que, as componentes axiais das forças, são mais intensas nas extremidades dos enrolamentos e, o deslocamento se dá na direção axial. Por outro lado, as componentes radiais produzem estresses de tração no enrolamento externo e estresses de compressão no enrolamento interno.

A referência [8] utiliza o método conhecido como *Finite Elements Analysis (FEA)* bi e tridimensional, para modelar um transformador monofásico do tipo núcleo envolvente. As análises foram efetuadas levando-se em consideração a influência da curvatura dos enrolamentos, o desalinhamento axial e a localização dos tap's, para verificar o efeito das forças nessas situações. A influência exercida pelos efeitos *Skin* e de proximidade na distribuição das forças também foram consideradas. A confrontação dos resultados obtidos para os modelos 2D e 3D mostraram que existe uma boa correlação para regiões que podem ser modeladas em 2D. Contudo, o modelo 3D permite que se examine assimetrias e se calcule forças na região dos enrolamentos localizada fora da janela do núcleo, o que não é possível em análises 2D. Não foi verificada uma grande influência produzida pelos efeitos *Skin* e de proximidade na força total.

Na referência [9] é utilizado o método conhecido como $T - \Omega$ melhorado (onde T representa o potencial vetor elétrico e Ω é o potencial escalar magnético). Este procedimento é usado para determinar o campo transitório tridimensional das correntes parasitas e as forças eletromagnéticas que agem nos enrolamentos de grandes transformadores. A aplicação desse método permite que T e Ω sejam determinados separadamente dentro de regiões condutoras e não condutoras. A solução do problema torna-se exequível fazendo uso do Método dos Elementos Finitos. As simulações realizadas no MEF para calcular as densidades de força axial e radial ao longo da altura da bobina permitiram concluir que a densidade de força axial perto das extremidades dos enrolamentos é maior do que aquelas próximas à região central da bobina. Isto se deve ao efeito da densidade de fluxo magnético de dispersão na direção radial e da distribuição não-uniforme de Ampère-espiras ao longo dos enrolamentos.

A referência [10] analisa a resistência aos curtos-circuitos de transformadores do tipo núcleo envolvente através de investigações da resistência mecânica de seus condutores e das vibrações de suas bobinas. As vibrações das bobinas são estimadas por meio de um método numérico considerando o movimento do óleo e a não-linearidade da rigidez do grupo de bobinas. Os resultados foram comparados aos dados obtidos em medições realizadas em um transformador modelo, constatando-se que o nível de esforços nos condutores, fornecidos pelos cálculos numéricos, é apropriado para avaliar a resistência mecânica dos condutores às forças originadas em decorrência dos curtos-circuitos.

Cálculos dos estresses de curtos-circuitos são apresentados na referência [11]. É Descrito um método computacional para o cálculo de forças axiais nos enrolamentos sem, no entanto, recorrer a simplificações que comprometam os resultados. Para tanto, as fórmulas mais adequadas para efetuar os cálculos numéricos são implementadas computacionalmente e uma rotina é utilizada para efetuar os cálculos dos estresses.

A resposta dinâmica dos transformadores submetidos a forças axiais de curto-circuito são analisadas em [12] e [13]. Na parte I do estudo, discute-se o efeito sobre os enrolamentos e sobre as estruturas de fixação (*clampings*) de forma individual. Na parte II, a avaliação é feita considerando ambas partes de maneira combinada. As forças dinâmicas encontradas, a partir das forças eletromagnéticas geradas, mostraram-se completamente diferentes para as duas situações analisadas.

As vibrações axiais dos enrolamentos dos transformadores sobre curto-circuito são consideradas em [14] e [15]. Em [14] é apresentado um modelo para estudar as vibrações axiais baseado no sistema massa-mola. Enquanto que [15] propõe um modelo não-linear que varia com o deslocamento dos enrolamentos. As equações de vibração não-lineares são solucionadas fazendo uso de um método numérico. A resposta ao deslocamento foi obtida para o transformador sob condições de forças eletromagnéticas devido aos curtos-circuitos, concluindo-se que condições de altas correntes provocam uma vibração instável dos enrolamentos.

Nas referências [4] e [16] são efetuadas investigações de faltas internas nos transformadores de distribuição utilizando o programa “Finite Elements Analysis” (FEA). A referência [4] apresenta um método para detecção de faltas internas causadas por curtos-circuitos entre espiras. Os estudos contemplaram simulações para a condição de operação normal e para situações de faltas típicas. A análise final do comportamento do transformador foi obtida associando o modelo estabelecido para o dispositivo a um

programa de análise circuital. Para finalizar, os estudos computacionais foram confrontados com dados de campo e os resultados serviram para confirmar a eficácia do *FEA* na simulação de faltas internas em transformadores de distribuição. Na referência [16], dos mesmos autores, foi implementado um novo modelo para simular faltas internas, desta vez, combinando o programa do *FEA* a um modelo de degradação do isolante.

- **Quanto a corrente de *inrush*:**

A corrente transitória de energização de transformadores é um fato conhecido de longa data e que remonta-se à última década do século XIX. As investigações referentes aos esforços eletromagnéticos originados pelas elevadas correntes de *inrush*, no entanto, são mais recentes. Somente a partir das últimas décadas observou-se um crescente interesse de comunidades científicas do mundo, bem como de concessionárias de energia elétrica, na averiguação das forças eletromagnéticas e do estresse mecânico procedentes das altas correntes provenientes destes fenômenos.

As forças eletromagnéticas decorrentes das altas correntes de energização de transformadores a vazio têm efeitos considerados prejudiciais aos enrolamentos desses equipamentos. Essa asserção é sustentada pelos estudos realizados em [17], os quais investigam o impacto das correntes de *inrush* nos estresses eletromecânicos nas bobinas de alta tensão de transformadores de potência. Os estudos realizados indicam que, correntes de *inrush*, cujos valores de pico atingem até 70% dos valores alcançados pelas correntes de curto-circuito, podem originar forças eletromagnéticas com amplitude de mesma ordem de grandeza que as correntes de falta. Assim sendo, os enrolamentos dos transformadores podem ser submetidos à forças de intensidades equivalentes (ou até maiores) que as causadas pelas correntes de falta.

A referência [18] compara as forças decorrentes das situações de curto-circuito e de *inrush* em um transformador monofásico do tipo núcleo envolvente. Os estudos computacionais foram executados através de uma técnica de minimização de energia denominada “*Hopfield Neural Network*”. Os estudos foram conduzidos considerando as piores situações transitórias de curto-circuito e de *inrush*, ou seja, foram utilizados os maiores picos possíveis de ocorrência para ambos fenômenos. A análise comparativa mostrou que as forças nos enrolamentos devidas à ocorrência de transitórios de energização são maiores que as forças estabelecidas para a condição de curto-circuito.

As diferenças encontradas foram atribuídas, principalmente, à magnetização do núcleo. É importante ressaltar que, no projeto mecânico de transformadores, utilizam-se como referência somente os máximos esforços possíveis resultantes de curtos-circuitos trifásicos.

- **Outros:**

A referência [19] aborda a instabilidade axial que ocorre em transformadores de potência cujos condutores dos enrolamentos são construídos utilizando a técnica de transposição de cabos (*CTC*). A instabilidade axial é uma condição que pode vir a causar deformação dos enrolamentos de um transformador, devido à forças de compressão resultantes da interação das correntes de curto-circuito com a densidade de fluxo magnético de dispersão radial. Esta situação se constitui num dos principais tipos de falhas mecânicas em transformadores. O artigo determina as cargas críticas de projeto, que conduzem à instabilidade dos condutores individuais, bem como de todo o conjunto, independentemente, utilizando um programa computacional baseado no MEF. As análises mostraram que, para garantir a integridade física do transformador, o menor desses dois limites deve ser maior do que a força compressiva na bobina, sob a pior condição de corrente de curto-circuito.

A referência [20] apresenta análises teóricas e experimentais dos transitórios eletromagnéticos que ocorrem devido à sincronização fora de fase de um transformador elevador. Essa ocorrência anormal de sincronismo entre o transformador e o gerador origina picos de corrente transitória nos enrolamentos do transformador que podem ser sensivelmente mais elevados que as correntes de falta estimadas convencionalmente. Tais picos transitórios implicam em uma saturação muito alta das colunas de ferro do circuito magnético, situação símile às correntes de *inrush*. O programa computacional “*Electromagnetic Transient Program*”(EMTP) foi utilizado para a implementação e simulação do sistema: gerador - transformador - circuito de potência.

Dando seqüência aos estudos iniciados na referência [20], o autor, em [21], apresenta uma comparação entre as forças axiais nos enrolamentos concêntricos de um transformador elevador, com e sem forças magnetomotrizes balanceadas (fmm's), durante um paralelismo com erro de fase de 180°. Os resultados mostraram que a força axial no enrolamento externo com fmm's desequilibradas é consideravelmente maior (de 2 a 10 vezes) que aquelas calculadas sem desbalanço de fmm's. Isto evidencia a importân-

cia da saturação do núcleo de ferro em alguns tipos de faltas em transformadores e, comprova experiências anteriores, que demonstram que a operação de sincronização defasada é a mais provável causa de altas correntes e de possíveis falhas mecânicas em transformadores elevadores.

A referência [22] mostra estudos comparativos das forças eletrodinâmicas axiais de um grande transformador elevador para três diferentes projetos da bobina de baixa tensão, do tipo helicoidal. A avaliação das forças é feita após realizar-se o cálculo dos campos magnéticos de dispersão, utilizando, para tanto, o Método de Elementos Finitos 3D. Os oscilogramas apresentados evidenciaram, claramente, que as extremidades das bobinas são mais solicitadas pelas forças axiais. Os gráficos de densidade de força mostraram que, a força axial está dirigida para baixo na metade superior da bobina e para cima na metade inferior, sendo que nas proximidades do plano médio torna-se nula. Os resultados das simulações mostraram que existe uma considerável variação angular da força axial para o caso do projeto da bobina de baixa tensão tipo helicoidal de camada única (*single layer helicoidal*), a qual é muito maior que aquelas variações encontradas para o caso de projeto dos enrolamentos de baixa tensão tipo helicoidal de camada dupla (*double layer helicoidal*).

A pesquisa bibliográfica realizada nesta fase dos trabalhos, permitiu algumas constatações que foram decisivas no tocante a definição dos critérios que delineiam a estruturação e o desenvolvimento desta tese. As observações mais relevantes estão descritas a seguir.

- Com relação ao uso de métodos que utilizam técnicas numéricas, constatou-se da literatura pesquisada, a existência de uma série de publicações que contemplam, de forma direta ou indireta, os estudos de curto-circuito através dos elementos finitos - MEF, conforme pôde-se constatar no estado da arte. Outrossim, uma vez que o foco desta tese é a avaliação de esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores, fazendo uso de técnicas numéricas, análises sob o enfoque do MEF serão incorporadas aos trabalhos devido a necessidade de se corroborar/aferir os resultados fornecidos pela outra técnica utilizada nos estudos, considerando que o MEF é uma técnica de grande aceitação por parte da comunidade científica.

- No que tange à utilização de metodologias que fazem uso do MEF para determinação de esforços devido às correntes de *inrush*, verificou-se uma quantidade muito restrita de estudos contemplando essa questão.
- Por outro lado, apesar da exaustiva pesquisa bibliográfica realizada, não foi identificado nenhum trabalho dentro do enfoque desta proposta de tese, quanto à utilização de ferramentas que fazem uso de técnicas no domínio do tempo para realizar estudos de esforços mecânicos em enrolamentos de transformadores.

Diante desses fatos, esse trabalho está direcionado para o desenvolvimento de um modelo computacional, utilizando-se de uma técnica no domínio do tempo, que permita a análise dos esforços eletromecânicos provocados nos enrolamentos de transformadores pelas elevadas correntes transitórias oriundas de eventos de energização e de curtos-circuitos trifásicos e o estabelecimento de uma correlação entre essas correntes transitórias e os seus impactos sobre a integridade física de transformadores de potência e de distribuição.

1.4 Contribuições da tese

O levantamento do Estado da Arte sobre o tema foco desta pesquisa evidenciou a relevância do assunto e os significativos esforços realizados pela comunidade científica na busca do conhecimento dos fenômenos aqui abordados e de soluções para minimizar os efeitos danosos verificados.

Apesar disso, há muito por se fazer, existindo, ainda, uma série de questões que precisam ser respondidas sobre os esforços mecânicos provocados pelos curtos-circuitos e por correntes de energização nos transformadores.

Dentro deste contexto, esta proposta de tese pretende avançar nos seguintes aspectos:

a) Compilação de uma metodologia analítica para cálculo de forças eletromagnéticas:

Muito embora a metodologia clássica destinada ao cálculo analítico das forças eletromagnéticas e dos estresses eletromecânicos já se encontre consolidada, entende-se como contribuição neste sentido, a reunião dos diversos documentos que serviram como base

no desenvolvimento dessa pesquisa, sintetizando-os em um documento único onde são feitas considerações sobre diversos aspectos que envolvem os estudos dos esforços eletromecânicos.

b) Implementação computacional de transformadores utilizando o MEF visando avaliar os esforços mecânicos causados pela corrente de curto-circuito:

O MEF, como constatado pela pesquisa bibliográfica realizada, tem a preferência da maioria dos autores que estuda esforços mecânicos, principalmente, porque oferece uma boa precisão nos resultados. Assim, pretende aproveitar de suas potencialidades para implementar transformadores de distribuição e de potência. Vale ressaltar que, a utilização dessa metodologia disponibiliza dados para confrontação com a técnica no domínio do tempo. Entretanto, nesta etapa dos trabalhos não são propostas modificações no *software* empregado, uma vez que este faz uso de equações diferenciais clássicas no seu processo de cálculo.

c) Aprimoramento de modelos computacionais para representar transformadores utilizando técnicas no domínio do tempo visando avaliar os esforços mecânicos causados pelas correntes de energização e de curtos-circuitos:

Utilizando modelos computacionais no domínio do tempo, frutos de pesquisas anteriores, serão introduzidas alterações que permitam o acesso direto às grandezas requeridas para cálculos de forças eletromagnéticas e do estresse mecânico. A modelagem no domínio do tempo tem conseguido um grande espaço em várias áreas do conhecimento, assim, pretende-se mostrar a sua eficácia e vantagens também para simulação de estresses mecânicos. A análise do estresse eletromecânico a que ficam submetidos os transformadores também será focada nesta etapa dos trabalhos.

d) Estabelecimento de metodologia para avaliação do impacto dos esforços mecânicos sobre os transformadores:

As características dos modelos implementados, tanto nos estudos no domínio do tempo quanto através do MEF, permitem o conhecimento de todas as grandezas envolvidas no processo de transformação de energia, incluindo os esforços dinâmicos adicionais. Isto possibilitará a identificação dos parâmetros a serem monitorados nos transformadores com vistas a subsidiar a avaliação da perda de vida útil devido às cor-

rentes de *inrush* e aos curtos-circuitos “passantes” e, ainda, o estabelecimento de uma metodologia de estudo, via simulação digital, da avaliação do impacto das sobrecorrentes em transformadores.

1.5 Estrutura da tese

Para atingir os objetivos propostos, além deste capítulo introdutório, este trabalho é conduzido obedecendo, fundamentalmente, a seguinte estrutura:

CAPÍTULO 2 - Falhas em Transformadores Submetidos à Curtos-circuitos ou Correntes de Energização

Este capítulo, de caráter introdutório, tem por objetivo principal estabelecer os marcos teóricos com respeito ao assunto proposto, quais sejam, os efeitos de curtos circuitos e correntes de energização sobre a integridade de transformadores. Nesse sentido, são apresentados os tipos e origem das faltas a que são comumente submetidos estes dispositivos. Dados estatísticos da desativação de equipamentos em decorrência dos efeitos de fenômenos transitórios e a sua correlação com as causas são apresentados. Prosseguindo, são feitas considerações teóricas dos fenômenos enfocados neste trabalho, de forma sucinta. Encerra-se este capítulo com a apresentação de uma síntese das modelagens de transformadores existentes, com destaque àquelas que apresentam melhor desempenho para as proposições deste trabalho.

CAPÍTULO 3 - Forças Eletromagnéticas e Estresse Mecânico: Abordagem Analítica

Este capítulo tem por objetivo a definição teórica e a caracterização das componentes de forças eletromagnéticas que se estabelecem nos enrolamentos dos transformadores, sob condições de operação normal e transitórias. As densidades de fluxo magnético de dispersão são analisadas com maiores detalhes, pois trata-se de um parâmetro que afeta diretamente a amplitude das forças atuantes no dispositivo. Na sequência, são apresentadas as formulações para o cálculo analítico das forças radiais e axiais utilizando métodos tradicionais e existentes na literatura sobre o assunto. O capítulo é

concluído, abordando os estresses mecânicos causados pelas forças eletromagnéticas, relacionando-os aos principais tipos de falhas nos enrolamentos concêntricos de transformadores.

CAPÍTULO 4 - Avaliação das Forças Eletromagnéticas em Transformadores Causadas por Curtos-Circuitos Externos Utilizando o MEF

Este capítulo destina-se à apresentação do MEF, uma das alternativas disponíveis para a simulação de dispositivos eletromagnéticos. Preliminarmente, destacam-se as aplicabilidades e facilidades do método e, na sequência, descreve-se a estrutura de funcionamento do MEF. Encerra-se com a apresentação do programa mostrando a forma de implementação dos modelos e conseqüente resolução dos problemas. Para exemplificar a utilização do método, já dentro da pesquisa proposta, primeiramente um transformador de distribuição e, na sequência um transformador de potência tem as suas características físicas e geométricas implementadas no programa utilizado. Após a realização de investigações computacionais sob diversas condições de operação, os resultados para as grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas, para cada um dos casos simulados, são apresentados e discutidos.

CAPÍTULO 5 - Cálculo de Forças Eletromagnéticas e Estresse Mecânico em Transformadores Utilizando Técnicas no Domínio do Tempo

Este capítulo contempla a modelagem e implementação computacional, desta vez num simulador que utiliza técnicas no domínio do tempo. Para atingir tal objetivo, e a partir de modelos já existentes, são efetuadas as modificações/adequações necessárias no modelo do transformador, de maneira a permitir os estudos aqui descritos. Dando sequência, são desenvolvidas novas rotinas computacionais, destinadas à determinação das grandezas mecânicas de interesse para os estudos aqui delineados, a saber: forças e estresses mecânicos a que ficam submetidos os transformadores, em função da condição operativa imposta. Análises do desempenho elétrico, magnético e mecânico do transformador para várias condições de operação são apresentadas com o objetivo de avaliar

os modelos desenvolvidos. Encerra-se o capítulo, com uma análise comparativa entre as estratégias utilizadas na pesquisa, quais sejam: técnicas em regime quase-estacionários (MEF) e técnicas no domínio do tempo.

CAPÍTULO 6 - Metodologia para Avaliação dos Impactos dos Estresses Mecânicos sobre os Transformadores

Este capítulo objetiva o estabelecimento de uma metodologia de estudo, via simulação digital que permite a avaliação dos efeitos eletromecânicos das sobrecorrentes na integridade física das partes ativas dos transformadores. Para tanto, a grandeza que servirá como base para as análises é o estresse mecânico oriundo dos fenômenos já mencionados.

CAPÍTULO 7 - Conclusões Finais

Finalmente, este capítulo destina-se a apresentar as principais discussões e contribuições desta proposta de tese.

Capítulo 2

Falhas em Transformadores Submetidos à Curtos-Circuitos ou Correntes de Energização

2.1 Considerações iniciais

As falhas que acometem os transformadores são bem conhecidas e amplamente divulgadas. E, muito embora os sistemas de proteção existentes sejam eficientes, é importante a implementação de medidas adicionais com o objetivo de minimizar a frequência e a duração das interrupções, principalmente aquelas de caráter intempestivo. Esta questão reveste-se de importância por estar relacionada a aspectos tanto econômicos como de segurança, e também porque pode garantir uma confiabilidade mínima ao sistema ao qual o dispositivo está conectado, em consonância com os padrões estabelecidos pela legislação vigente.

Outra questão a ser observada diz respeito à velocidade de atuação dos sistemas de proteção, cujo tempo de resposta, via de regra, não impede que os equipamentos sejam submetidos aos indesejáveis efeitos transitórios, oriundos de fenômenos naturais ou de faltas no sistema elétrico, aumentando, em consequência, os riscos de falhas em decorrência de esforços eletromecânicos.

Atentando para as questões anteriormente levantadas e tendo em vista que o objetivo principal desta investigação está voltado para a determinação dos esforços eletromecânicos provocados por correntes de energização e de curtos-circuitos, este capítulo tem como propósito avançar nos seguintes tópicos:

- Descrever os aspectos gerais, financeiros e gerenciais que envolvem as falhas mecânicas dos transformadores e apresentar dados estatísticos sobre a ocorrência de eventos de faltas associados aos estresses mecânicos;

- Apresentar, de forma concisa, a definição dos fenômenos de curto-circuito e corrente de *inrush*, considerados nesta tese, associando-os aos esforços eletromecânicos decorrentes de tais fenômenos;
- Apresentar uma síntese das ferramentas disponíveis para efetuar a modelagem de transformadores, dando-se o destaque necessário àquelas que foram utilizadas nos trabalhos descritos nesta tese. Salienta-se que, para a escolha das ferramentas computacionais, dentre outros aspectos, foram consideradas as potencialidades dos programas, enfatizando aqueles que atendessem às necessidades no que se refere aos cálculos das grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas.

2.2 Análise de falhas em transformadores

Falhas em transformadores são decorrentes de diferentes causas e condições tanto de instalação como operativas. De um modo geral, no entanto, estas podem ser classificadas como sendo de origens elétricas, mecânicas e térmicas [3]. Nessa linha de pensamento, a tabela 2.1 relaciona causas típicas de falhas em transformadores, utilizando como forma de classificação a sua natureza, ou seja, se devida a causas internas ou externas ao equipamento.

Tabela 2.1: *Causas típicas de falhas em transformadores.*

Interna	Externa
Deterioração do sistema isolante	Descargas atmosféricas
Perda da pressão dos enrolamentos	Operação de chaveamento
Sobreaquecimento	Sobrecarga
Umidade	Faltas no sistema (curto-circuito)
Contaminação do óleo isolante	
Descargas parciais	
Defeitos de projeto e fabricação	
Ressonância dos enrolamentos	

Adicionalmente às falhas relacionadas na tabela anterior, também podem ocorrer falhas nas buchas, nos tap's e outros acessórios dos transformadores.

A figura 2.1 ilustra a curva que expressa uma estimativa do número das falhas em função do tempo de vida para transformadores de potência. Esta é denominada curva de “modelo de falhas” de transformadores (ou curva “*bathtub*”) e evidencia que os períodos mais críticos, em termos de probabilidade de falha de um transformador, ocorre no início de sua operação e depois de decorridos alguns anos de funcionamento do equipamento.

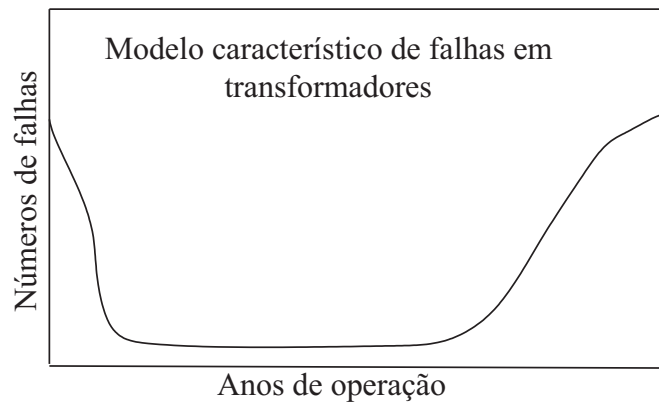


Figura 2.1: *Curva de falhas em transformador “bathtub”.*

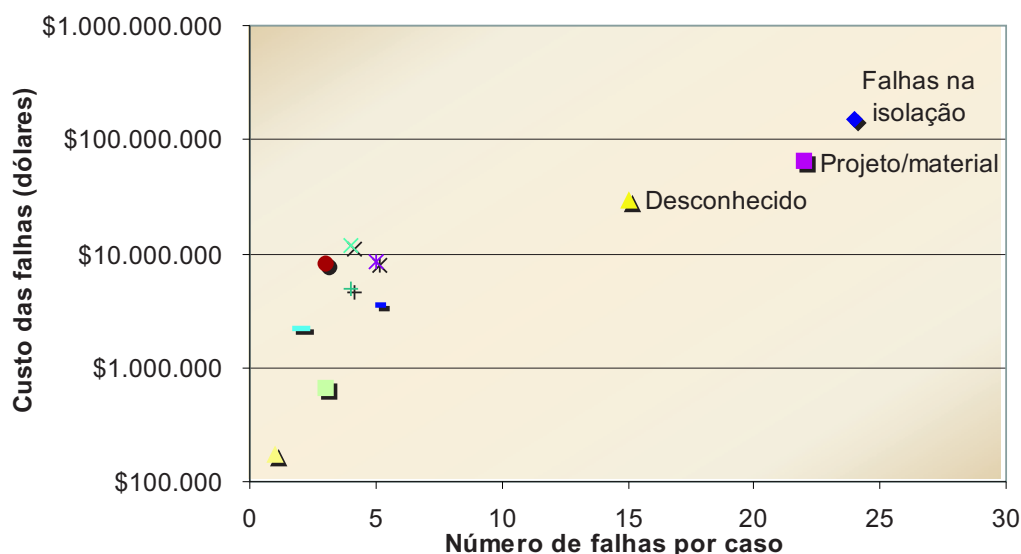
A referência [3] descreve a curva “bathtub” da seguinte forma: a primeira parte refere-se às desativações que sucedem nos primeiros anos de vida e, que podem estar relacionadas com qualquer tipo de falta de natureza interna (como por exemplo, defeitos causados por falhas de projeto ou de construção) ou externa; a segunda parte da curva apresenta uma taxa de ocorrência de falhas baixa e, praticamente, constante que também pode estar associada a qualquer tipo de falta; e a última parte corresponde às falhas devido ao envelhecimento dos dispositivos. Neste caso, os defeitos podem estar relacionados, principalmente, com a perda da resistência mecânica do sistema de isolamento dos enrolamentos, que tendem a degradar-se com envelhecimento.

Os custos relacionados com reparo/substituição das unidades transformadoras avariadas, principalmente as de potência, são muito altos. Para ilustrar essa questão, foi realizado um levantamento entre os anos de 1997 e 2001 com o objetivo de obter informações sobre desativações de transformadores de potência associando-as a causas e custos. Concessionários de diversos países participaram dessa pesquisa enviando as informações requeridas. Do total de casos obtidos junto às empresas colaboradoras, 94 continham informações conclusivas que propiciaram a criação de um banco de dados e os registrados de desativações foram convertidos em gastos anuais. Os resultados desta pesquisa estão sintetizados na referência [2], na forma de gráficos e tabelas. A tabela 2.2 associa o custo total de cada causa de falhas ao número de ocorrências.

Tabela 2.2: *Custos de falhas.*

Causas das falhas	Número	Dólares pagos
Falhas na isolação	24	\$149,967,277
Projeto/material	22	\$64,696,051
Desconhecido	15	\$29.776.245
Contaminação do óleo	4	\$11.836.367
Sobrecarga	5	\$8,568,768
Fogo/explosão	3	\$8,045,771
sobretensão	4	\$4,959,691
Manutenção incorreta	5	\$3,518,783
Inundação	2	\$2,240,198
Perda de conexão	3	\$2,186,725
Descargas atmosféricas	3	\$657,935
Umidade	1	\$175,000
Total	94	\$286,628,811

A figura 2.2 evidencia as maiores causas de falhas mostradas na tabela 2.2 [2] e, portanto, que demandam maiores recursos financeiros. O número de falhas para cada situação está indicado no eixo das abscissas e a ordenada representa a remuneração gasta para os vários tipos de defeitos. Esta tendência apresentada no gráfico é denominada “curva F-N” (“curva frequência - número”).

Figura 2.2: *Gráfico de custos em relação ao número de falhas.*

Pode-se observar no gráfico que a isolação foi o responsável pelo maior número de registros de falhas e, por conseguinte, pelos maiores gastos, alcançando a exorbitante quantia de 150 milhões de dólares. A referência considera que as causas de falhas na isolação podem ser de origem externa (por exemplo, curtos-circuitos) ou interna devido a isolação inadequada ou defeituosa. O custo total envolvendo todas as categorias de

falhas, no período de realização da pesquisa, ultrapassou os 280 milhões de dólares.

A tabela 2.3 apresenta os dados obtidos em uma outra pesquisa [23], envolvendo transformadores de potência. Embora a pesquisa não mostre os recursos financeiros envolvidos, a mesma foi realizada com o objetivo de estabelecer estatísticas de falhas de transformadores de potência relacionando-as com os componentes eletromecânicos atingidos.

Tabela 2.3: *Percentual de faltas para falhas em transformadores de potência.*

<i>Componente</i>	CIGRE	CEA	<i>Doble Engineering</i>	<i>ZTZ-Service clients</i>	África do Sul
Buchas/acessórios	29	29	35	45	14
<i>Tap-changer</i>	15	39	16	9	24
Isolação principal	12	16	9	17	30
Enrolamento (envelhecimento)	31	16	16	12	17
Enrolamento (deformação)	31	16	12	10	17
Núcleo	2	10	7	7	15

* CEA: Canadian Electricity Association - Canadá ;* ZTZ-Service: Scientific and Engineering Centre - Ucrânia.;* Doble Engineering

A tabela permite constatar que, além dos componentes que a princípio seriam mais passíveis de falhas, outros, a exemplo do núcleo magnético, também apresentam um índice significativo de defeito. Quanto às falhas dielétricas, considera-se que algumas delas iniciam-se com os movimentos mecânicos dos enrolamentos que, segundo a referência, poderiam ser evitados por meio do monitoramento das condições mecânicas dos enrolamentos e do núcleo.

Uma outra pesquisa, desta vez focando transformadores de distribuição e, em nível nacional, foi realizado pela COELBA (Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia) [24], objetivando levantar as taxas de falha dos transformadores de suas regionais. O levantamento foi realizado em 1309 transformadores substituídos devido à ocorrência de falhas. O resultado do levantamento está resumido na tabela 2.4, que apresenta o percentual de faltas relacionado com o tipo de falha detectada nas unidades transformadoras analisadas.

Tabela 2.4: *Diagnósticos de avarias de falhas em transformadores de distribuição.*

Avaria/diagnóstico	Número de unidade	Percentual
Penetração de água	60	4,58
Baixo nível de isolamento	80	6,11
Curto-circuito externo	497	37,96
Curto-circuito interno	202	15,43
Descargas atmosféricas	30	2,29
Interrupção no painel	16	1,22
Sobrecarga	320	24,45
Total	1309	100

A tabela permite constatar que o maior número de ocorrência de falhas é devido às faltas consideradas externas ao dispositivo, neste caso curtos-circuitos. Do total de falhas diagnosticadas nos transformadores de distribuição, 37,96% são decorrentes desse tipo de falta.

As pesquisas apresentadas não deixam dúvida quanto às causas de defeitos, tanto em transformadores de potência quanto de distribuição, ou seja, que a maioria dos problemas é atribuída, direta ou indiretamente, à falhas na isolação, provocadas pela diminuição da resistência dielétrica dos isolantes, devido às deformações ocasionadas pelas várias causas típicas de falhas. Em outras palavras, as deformações ameaçam a integridade mecânica dos enrolamentos dos transformadores e são influenciadas por alguns fatores que são, a seguir, descritos.

- Forças excessivas provocadas por curtos-circuitos e corrente de *inrush*;
- Problemas ocasionados durante o transporte (por exemplo, acidentes);
- Forças dinâmicas durante a operação normal, como, por exemplo vibrações;
- Redução da pressão sobre os enrolamentos e estruturas de suporte, implicando em uma redução da resistência mecânica do equipamento.

No entanto, a razão mais comum de deformações mecânicas sofridas pelos condutores utilizados nos enrolamentos, tanto de transformadores de distribuição como de potência, são os esforços mecânicos originados pelos curtos-circuitos.

2.3 Condições de monitoramento

Transformadores de potência são os maiores, os mais pesados, e freqüentemente os mais caros equipamentos em um sistema de potência. Obviamente, cuidados apropriados são necessários durante o transporte, instalação, operação e manutenção destes

equipamentos. Devido aos aspectos mencionados e, principalmente, ao seu elevado custo, unidades para substituição nem sempre estão disponíveis. Assim sendo, e uma vez que o tempo de reparo pode ser relativamente longo, é importante avaliar a condição de cada unidade em operação no sistema elétrico. Uma pesquisa internacional realizada pelo CIGRE [25], sobre grandes transformadores de potência, mostra uma taxa de falha de 1-2% por ano. Este valor pode parecer pequeno, mas como já dito, uma única falta em um grande transformador normalmente resulta em vultosas despesas para a concessionária.

No caso da ocorrência de algum tipo de falha no transformador, é recomendado que uma investigação seja efetuada para se levantar as possíveis causas da falta. Esse procedimento poderá tornar factível a implementação de um sistema de monitoramento *on-line*, caso se julgue conveniente [26].

O monitoramento das condições de unidades transformadoras é uma prática fundamental, pois tal procedimento pode determinar o tempo de vida remanescente do dispositivo. Isto permite que um planejamento de manutenção/troca possa ser executado, evitando interrupções do fornecimento de energia elétrica não programadas e possivelmente mais longas.

Para realizar o gerenciamento de tempo de vida de um transformador é importante que um modelo da estimativa de vida útil seja estabelecido. Como são múltiplos os parâmetros que afetam um modelo do transformador, estes têm que ser investigados a fim de avaliar a sua vida útil.

Um dos fatores a ser considerado é o sistema de isolamento, já mencionado na seção anterior, como sendo um dos mais freqüentes causadores de falhas em transformadores. O sistema isolante utilizado consiste de materiais orgânicos e/ou inorgânicos, essencialmente óleo mineral e papel. A referência [27] atribui a possível ocorrência de falha na isolamento à redução/mudança no comportamento dielétrico e também a redução da resistência mecânica do papel isolante dos enrolamentos.

As condições mecânicas dos enrolamentos, tais como: resistência mecânica, deformações e estruturas de suporte, também se constituem como fatores preponderantes na análise de vida útil dos dispositivos. Além desses fatores, pode-se citar ainda: o sobreaquecimento do núcleo em decorrência de faltas; buchas devido à poluição, vedação, etc; tanque e os componentes associados (conservação, ventilação, etc).

A diversidade das possíveis causas de falhas exige, também, que diversos méto-

dos de diagnóstico sejam desenvolvidos para avaliar as condições dos componentes de um transformador. Nesse sentido, existe uma variedade de ferramentas disponíveis para calcular as condições de serviço destes dispositivos. A referência [3] cita diversos métodos, classificando-os em: métodos de diagnósticos tradicionais, ou seja, métodos que tem uso difundido; e métodos não tradicionais, que são métodos cuja utilização é incipiente ou ainda está em fase de pesquisa.

2.4 Curto-circuito

As correntes de curto circuito, além de ser uma das mais freqüentes causas de falhas em transformadores, encontram-se também, entre as faltas que apresentam maior severidade, em termos de impacto sobre as estruturas de sustentação de transformadores. Os efeitos das correntes de curto-circuito nos enrolamentos são comumente agrupados da maneira seguinte:

- efeitos térmicos;
- efeitos mecânicos.

O impacto que estes efeitos podem causar em unidades transformadoras em função de suas potências nominais é uma questão para a qual ainda não existe um consenso absoluto. Entretanto, segundo a referência [28], os efeitos mecânicos (estresse) tendem a ser predominantes em transformadores de potência, devido às elevadas correntes de curto-circuito envolvidas. Por outro lado, em transformadores de distribuição, os efeitos térmicos determinam os limites operacionais sob curtos-circuitos [24].

Neste contexto, a capacidade de um transformador para resistir aos curtos-circuitos é considerada essencial para garantir a sua segurança e a confiabilidade dos sistemas. E, para operarem satisfatoriamente, estes equipamentos devem ser projetados e construídos para suportar os curtos-circuitos a que possam ser submetidos durante o tempo de vida para o qual foram projetados [29]. Para que isso aconteça, os enrolamentos devem ter resistência mecânica suficiente para suportar as forças eletromagnéticas produzidas pelas altas correntes circulantes, sem se danificar. Ao mesmo tempo, os materiais usados na construção de ambos, condutores e isolamento, devem ser capazes de resistir, sem significativa deterioração, as altas temperaturas produzidas pelas correntes de falta.

A obtenção de um projeto seguro e eficiente requer, portanto, a adoção de uma metodologia para efetuar cálculos da resistência mecânica das várias partes do trans-

formador [29]. Nesse sentido, a seguir, são apresentados os principais aspectos que devem ser observados quando do desenvolvimento de projetos e construção de transformadores.

- 1) Os tipos de faltas verificados nos sistemas elétricos devem ser estudados e as suas características devem ser conhecidas;
- 2) A partir do estudo anterior, do sistema ao qual o transformador será conectado, a corrente de curto-circuito do projeto é determinada;
- 3) As forças eletromagnéticas devido às sobrecorrentes devem ser calculadas;
- 4) Métodos de determinação da resistência mecânica dos enrolamentos devem ser planejados, de forma a garantir que os mesmos possam suportar eventuais esforços adicionais.

Sistemas elétricos de potência estão sujeitos à ocorrência de faltas. Muitas destas faltas, no entanto, alcançarão valores inferiores à máxima corrente de curto-circuito possível de ocorrência, e somente em casos raros, um transformador estará sujeito a uma falta em seus terminais com a capacidade de curto-circuito total do sistema disponível no lado energizado.

Dados estatísticos do setor elétrico mostram que a maioria das faltas nos sistemas elétricos ocorrem entre fase-terra. Seguem, em termos da frequência de ocorrência, as faltas bifásicas e bifásicas à terra e, por último, as faltas trifásicas e trifásicas a terra [30]. Destaca-se que apesar das faltas trifásicas ocorrerem com menor frequência, são as que apresentam maior severidade e, portanto, são as responsáveis pelos maiores esforços mecânicos que acometem transformadores. Por esse motivo, é prática comum projetar transformadores para resistir a esse tipo de falta em seus terminais [29].

A expressão 2.1 permite determinar o valor de crista do primeiro pico da corrente de curto-circuito, completamente assimétrica, para um transformador trifásico conectado a um sistema considerado como sendo um barramento infinito.

$$I_{cc} = \frac{k\sqrt{2} \cdot S_n \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot V \cdot Z} \quad (2.1)$$

sendo:

- I_{cc} : o valor de pico da corrente de curto-circuito (A);

- k : fator de assimetria;
- S_n : potência nominal de saída do transformador (MVA);
- V : tensão nominal fase-fase (V);
- Z : impedância por unidade do transformador.

Uma vez que as forças produzidas são proporcionais ao quadrado da corrente, uma redução moderada da corrente proporciona uma redução substancial do estresse devido ao curto-circuito. A exemplificação a seguir demonstra a importância do fator de assimetria na determinação dos valores máximos da corrente de curto-circuito. Para um fator de assimetria máximo (1,8), as forças correspondentes ao pico do primeiro ciclo da corrente de falta são ($1,8^2 = 3,24$) vezes maiores do que para uma corrente completamente simétrica. É oportuno ressaltar, que o fator de assimetria é calculado a partir dos parâmetros do circuito e do transformador [29].

A figura 2.3 mostra uma situação de máxima assimetria da corrente. O efeito dessa situação é refletido na força adicional mostrada na figura 2.4.

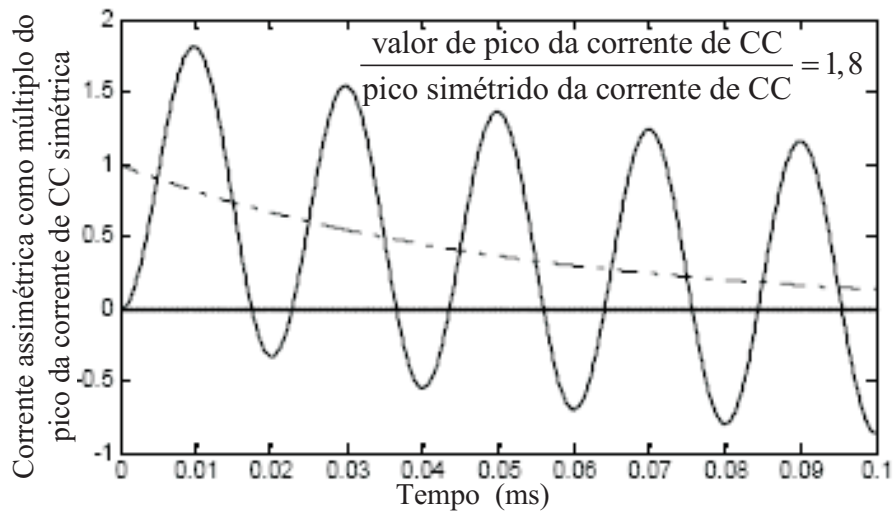


Figura 2.3: *Corrente de curto-circuito de uma falta completamente assimétrica.*

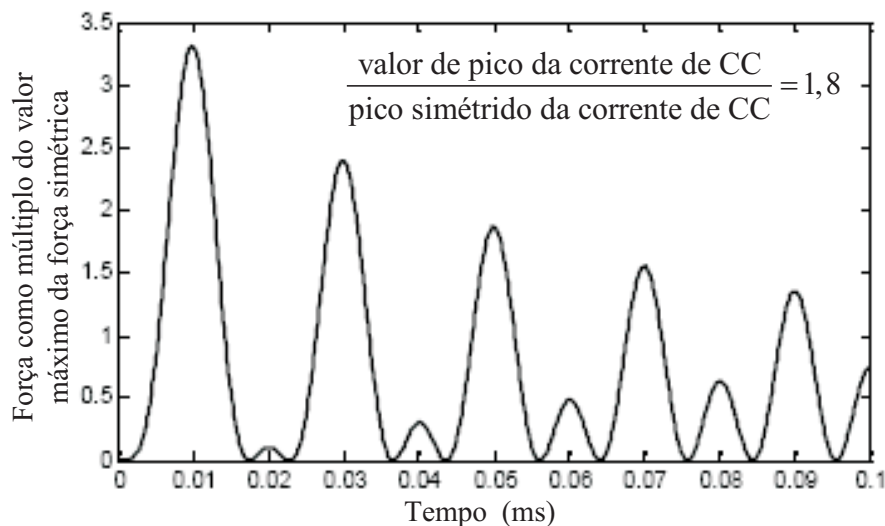


Figura 2.4: *Variação da força com o tempo durante uma falta assimétrica.*

Essas correntes de curto-circuito produzem estresses mecânicos proporcionais ao quadrado das correntes nos equipamentos pelos quais circulam. Embora a amplitude das correntes de curto-circuito possam ser limitadas aumentando-se a impedância do sistema, esta prática, geralmente, não é adotada, tendo em vista que também ocorre o aumento da regulação da tensão, que afeta o desempenho e operação do sistema [31].

Um outro fator importante para a vida de transformadores é a frequência da ocorrência das faltas. Embora as estruturas de suporte e os sistemas isolantes sejam projetados para resistir aos máximos estresses provocados por curto-circuitos, a ocorrência com maior frequência de faltas, tende a prejudicar a isolação, reduzindo gradativamente sua resistência aos esforços mecânicos.

Quanto ao tempo de duração das faltas, considera-se que este não seja um fator agravante dos estresses mecânicos [29], uma vez que as máximas forças se verificam durante a ocorrência do primeiro pico da corrente.

A norma IEC - 60079 [32], em sua parte 5, estabelece que a máxima duração para um curto-circuito é de 2 segundos para transformadores com impedâncias inferiores a 5% e 3 segundos para impedâncias iguais ou superiores a 5%. O documento define, ainda, a máxima temperatura permissível nos enrolamentos, que para o caso do cobre é de 250°C. Esse limite de temperatura é adotado, principalmente, para evitar o envelhecimento do papel isolante, que permanece em contato com os condutores das bobinas. Neste particular, os sistemas elétricos possuem métodos de proteção rápidos e eficazes, que garantem a eliminação de faltas em tempos pequenos, da ordem de dezenas ou no

máximo centenas de milisegundos.

Com respeito ao comportamento da resistência mecânica do material comumente utilizado como condutores de enrolamentos de transformadores, o cobre, este sofre uma sensível redução de sua resistência mecânica em temperaturas superiores à temperatura de operação normal, tais como as que se verificam em decorrência de curto-circuitos, como já dito, da ordem de 250°C. Esta temperatura, no entanto, devido à inércia térmica dos materiais, leva um certo tempo para ser atingida. Dessa forma, pode-se concluir que a ocorrência dos maiores esforços, que acontecem no primeiro pico da corrente, se verifica antes de que o material condutor tenha atingido temperaturas tais que resultem em redução de suas propriedades mecânicas. Na realidade, até que a temperatura dos enrolamentos alcance a temperatura mencionada, a força já terá decrescido a menos de um terço do seu valor inicial. Assim sendo, é comum considerar-se, para fins de cálculo de esforços, que o condutor está na temperatura normal, do ponto mais quente, a qual é função da classe de isolamento do transformador.

Todavia, é importante ressaltar, que a frequência e a duração das correntes de falta são de máxima importância no estabelecimento da coordenação da proteção, quando efeitos térmicos e mecânicos devem ser considerados [28].

2.5 Correntes de *inrush*

As correntes de energização de transformadores ou *inrush* resultam de qualquer variação abrupta na tensão dos enrolamentos [33]. Muito embora estas correntes geralmente sejam consideradas como resultado da energização de um transformador, elas também podem ser causadas pela ocorrência de faltas externas aos transformadores, quando do restabelecimento da tensão, após a eliminação de uma falta [34]. Dentre estas possíveis causas, a corrente de *inrush* de magnetização devido a energização de um transformador é considerada o caso mais severo. Essas altas correntes podem ser entendidas como sendo uma falta interna e provocar o disparo indesejado dos relés de proteção [35].

A amplitude dessa corrente transitória depende de muitos fatores. Dentre os preponderantes, pode-se mencionar: o instante de chaveamento do dispositivo e a existência ou não de magnetismo residual no núcleo. Em casos extremos, a máxima corrente de *inrush* possível de ocorrer pode atingir valores de pico de várias vezes a amplitude da corrente nominal. No entanto, observa-se que as correntes de *inrush* não são tratadas

com o mesmo rigor dado às correntes de curto-circuito durante o projeto mecânico de transformadores [36]. Assim, do ponto de vista de esforços eletromecânicos, pesquisas constataam que as altas correntes de energização podem submeter o enrolamento energizado a estresses mecânicos capazes de danificá-lo [17], [18].

É interessante salientar que, embora as corrente de *inrush* e de curto-circuito possam parecer idênticas quanto aos seus efeitos nos transformadores, estas têm uma influência significativamente distinta, do ponto de vista de magnetização do núcleo [18]. Em diversos eventos envolvendo correntes de *inrush*, os núcleos tornam-se saturados e sua permeabilidade efetiva reduz-se drasticamente. Nessa condição, o núcleo pode ser considerado com características lineares [18]. Em situações de curto-circuito, as distribuições das densidades de corrente em ambos enrolamentos são opostas e praticamente iguais. Neste caso, contrariamente ao anterior, considera-se que o núcleo está bem abaixo da saturação, conduzindo a um elevado valor de permeabilidade. Dessa forma, cálculos envolvendo o núcleo tornam-se obrigatórios a fim de se determinar as forças atuando nos enrolamentos.

Além disso, durante a investigação das piores situações de geração de forças, o foco principal deverá estar dirigido ao enrolamento energizado, pois a corrente no enrolamento sem carga é desprezível em amplitude quando comparada à intensidade da corrente de *inrush*.

O tempo de duração de ambos fenômenos apresenta um outro diferencial. Enquanto as correntes de falta podem ser eliminadas em dezenas de milissegundos, as correntes de *inrush* podem ter duração de dezenas de segundos [17]. Além disso, o procedimento de energização de transformadores a vazio é considerado uma operação normal do sistema, devido à frequência com que elas ocorrem.

2.5.1 Estimativa da amplitude do primeiro pico da corrente de *inrush*

Os responsáveis por instalações que contenham transformadores, principalmente concessionárias de energia elétrica, geralmente estão interessados em conhecer o máximo valor da corrente de *inrush* e, por vezes, a sua taxa de decaimento. Esta última questão encontra-se à margem das investigações propostas neste trabalho, motivo pelo qual não é abordada neste documento.

Uma equação, aplicável a transformadores monofásicos, que permite uma estimativa

da máxima corrente de *inrush* que circula pelo enrolamento energizado do dispositivo, considerando o pior instante de chaveamento, corresponde a expressão 2.2 [36].

$$i_{0\max} = \frac{Hh_w}{n} \quad (2.2)$$

sendo:

- $i_{0\max}$: pico da corrente de *inrush*;
- H : intensidade de campo magnético;
- n : número de espiras do enrolamento energizado;
- h_w : altura do enrolamento energizado.

A expressão anterior também pode ser utilizada em transformadores trifásicos, como parâmetro para avaliar o desempenho das correntes de *inrush*, em função do tipo de conexão dos enrolamentos [36].

Do exposto, torna-se evidente, que o fenômeno de energização de transformadores é um assunto que merece atenção especial, assim como os curtos-circuitos, em função dos elevados valores que pode alcançar a corrente e a possibilidade de conseqüências danosas para estes equipamentos. Esta situação é particularmente importante nos grandes transformadores de potência, que são freqüentemente submetidos a energização sem carga, a corrente de magnetização sendo um importante fenômeno envolvido com os estresses mecânicos [17].

2.6 Técnicas de modelagem de transformadores para análise de transitórios

Nas últimas décadas, muita atenção tem sido dedicada para avaliação das condições de operação de transformadores instalados nos sistemas elétricos. Esta prática tem um caráter econômico e técnico, uma vez que visa reduzir e/ou postergar investimentos através da utilização de métodos de diagnósticos capazes de proporcionar uma avaliação da condição do equipamento e sugerir ações que, quando aplicadas em tempo, tendem a prolongar a estimativa da vida útil dos equipamentos para além do período estabelecido durante a fase de projeto [23].

O uso de programas computacionais confiáveis para a realização do projeto é uma outra alternativa muito importante para antever o desempenho dos equipamentos, uma

vez que, o emprego dessa técnica, evita a efetivação de gastos na construção de protótipos para estudar o comportamento dos dispositivos. Entretanto, o uso de modelos computacionais para a análise de transitórios eletromagnéticos, foco deste trabalho, requer que tais modelos sejam eficazes e precisos. O alto custo, complexidade e o fato de os transformadores serem dispositivos indispensáveis para a operação de sistemas elétricos exige que os mesmos possuam modelos adequados e confiáveis para a realização de estudos dos fenômenos que ocorrem ao longo de sua vida operativa.

Em se tratando de transformadores trifásicos, os esforços para se desenvolver modelos computacionais são ainda maiores, visto que a complexidade da interação entre os fluxos magnéticos nas três fases do equipamento exige qualidade na representação da não linearidade do material ferromagnético do núcleo (histerese e saturação).

Seguindo esse raciocínio, observa-se que existem várias técnicas para modelar estes dispositivos eletromagnéticos, dentre as quais pode-se citar: modelagem através de equações elétricas, modelagem através de equações elétricas e magnéticas, modelos que utilizam técnicas no domínio do tempo, a exemplo dos *software Saber* e ATP (*Alternative Transient Program*), modelagem que empregam o método dos Elementos Finitos. A referência [34] faz uma discussão mais aprofundada das potencialidades e limitações das técnicas mencionadas, voltadas para transformadores, destacando-se as principais diferenças entre elas.

Os modelos computacionais necessitam de métodos adequados para determinação dos parâmetros elementares dos transformadores. Nesse sentido, a seguir, são destacadas algumas informações consideradas de maior relevância para utilização em estudos de transformadores.

1. Indutâncias: a referência [23] resume as principais técnicas para os cálculos de indutâncias, análise e projeto de transformadores em geral. Dentre as principais categorias, pode-se citar:

- modelos fundamentados em indutâncias mútuas e próprias: geralmente, utilizados quando altas frequências estão envolvidas;
- modelagem baseada em indutância de dispersão: normalmente usada para baixas frequências, em cálculos de esforços de curto-circuito de transformadores;

- modelos alicerçados no princípio da dualidade: este método é utilizado para frequências baixas e intermediárias, uma vez que as indutâncias de dispersão não são corretamente representadas. A referência [37] utiliza este método na modelagem de uma condição altamente saturada;
 - análise baseada em campos eletromagnéticos: este método é utilizado por projetistas para calcular parâmetros de projeto através de aproximações de campos eletromagnéticos. A técnica dos elementos finitos é a mais aceita para a solução de problemas deste tipo, ou seja campos magnéticos.
2. Capacitâncias: estas podem ser calculadas fazendo uso de métodos analíticos tradicionais e também com o emprego de métodos computacionais.
 3. Perdas: modelos detalhados das perdas são indispensáveis para o projeto de um transformador.

A modelagem de núcleos de transformadores depende da aplicação que se tem em vista para o dispositivo. Para aplicações em baixas frequências (de 60 Hz até alguns kHz) os modelos devem considerar o efeito da histerese e saturação no núcleo. Por outro lado, a modelagem para frequências elevadas pode ser estabelecida considerando que o núcleo ferromagnético do transformador comporta-se linearmente.

Assim sendo, o método a ser escolhido para modelagem de um transformador depende do tipo de estudo e/ou aplicação que se tem em vista (análise de sobretenções transitórias, resposta em frequência, etc). Nessa perspectiva, e tendo em vista a adequabilidade das ferramentas computacionais para a realização da pesquisa aqui apresentada, optou-se pelo uso de dois simuladores: um no domínio do tempo e outro utilizando o Método dos Elementos Finitos.

Quanto ao simulador no domínio do tempo, salienta-se que além de uma variada biblioteca de modelos, a plataforma selecionada possibilita a modelagem de qualquer componente elétrico, eletrônico, mecânico, eletromagnético, etc. A linguagem para a criação de modelos permite a representação de um dispositivo pela combinação de equações algébricas ou diferenciais, lineares ou não-lineares. Além disso, esta plataforma possui uma grande versatilidade gráfica, capacidade de interconexão com rotinas elaboradas em outras linguagens de programação, a exemplo da linguagem *C* e *Fortran*, e manipulação dos resultados de saída, permitindo a análise mais detalhada dos fenômenos estudados.

A outra ferramenta adotada para a modelagem de transformadores, é Finite Element Method Magnetics (FEMM) que consiste em um pacote computacional baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) dedicado a resolução de problemas eletromagnéticos no domínio 2D. Este programa utiliza técnicas numéricas e proporciona a resolução rápida e direta das complexas equações diferenciais que regem o comportamento de dispositivos eletromagnéticos. Esta técnica constitui-se numa poderosa ferramenta para analisar estruturas eletromagnéticas complexas e irregulares, pois permite que se faça o mapeamento de campos elétricos e magnéticos para diversos dispositivos, tais como: motores, transdutores, transformadores, etc. Além disso, a possibilidade da análise estrutural, evidenciando, sobretudo, seu comportamento eletromagnético, torna o método uma ferramenta eficiente, proporcionando os mais diversos tipos de análises que envolvam campos eletromagnéticos, tais como cálculos de esforços nos enrolamentos [21]. O programa permite a visualização de grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas em qualquer região da estrutura implementada, visto que, admite a pré-seleção dos elementos de contornos, volumes e superfícies que constituem o domínio sob estudo.

Devido as dificuldades de se encontrar valores de referência de cálculos de esforços mecânicos, os resultados obtidos do FEMM serão utilizados para fins de comparação com os obtidos do modelo no domínio do tempo.

2.7 Considerações finais

O presente capítulo foi dedicado inicialmente ao fornecimento de dados estatísticos sobre as principais causas de falhas em transformadores de distribuição e de potência, oriundos de pesquisas realizadas em empresas do setor elétrico de diversos países. Os resultados apresentados se constituem como pontos de balizamento, incentivo e justificativa para a realização dos estudos desta tese, uma vez que, os dados levantados na maioria das pesquisas mostram que as principais causas de falhas em transformadores são devidas à degradação do sistema isolante. Parcela significativa do dano sofrido pela isolação é resultado de faltas externas a que os equipamentos são submetidos ao longo de sua vida, como por exemplo, curtos-circuitos “passantes” e correntes de *inrush*.

Considerando-se a importância dos fenômenos considerados, foi apresentada uma revisão didática com o objetivo de fornecer uma base conceitual sobre estes assuntos. Foi feita uma ligeira descrição sobre os aspectos teóricos dos curtos-circuitos e correntes

de *inrush*, evidenciando-se a importância que deve ser dada às máximas correntes de curto-circuito, em particular aquelas devidas às faltas trifásicas, pois estas são responsáveis pelos maiores esforços mecânicos. Esse fato determina que nos projetos mecânicos dos transformadores, sejam utilizados os valores de pico das correntes de curto-circuito trifásicas.

Encerra-se o capítulo, com a apresentação das principais técnicas disponíveis para realizar a modelagem de transformadores. Dentre as diversas opções encontradas, optou-se pela escolha de duas estratégias distintas que possibilitam a análise do desempenho elétrico, magnético e mecânico dos dispositivos. Uma delas fundamentada no Método dos Elementos Finitos e a outra com o uso de um simulador que utiliza técnicas no domínio do tempo. As técnicas numéricas selecionadas são utilizadas como ferramenta nos capítulos subseqüentes, no tocante aos cálculos dos esforços eletromecânicos.

Capítulo 3

Forças Eletromagnéticas e Estresse Mecânico: Abordagem Analítica

3.1 Considerações iniciais

A modelagem matemática é uma etapa fundamental na implementação computacional de qualquer equipamento. A correta representação de um dispositivo permite a simulação com a reprodução fidedigna do seu desempenho sob as mais diversas condições de operação, sem que haja a necessidade da execução de ensaios, que por vezes, podem ser destrutivos.

Nessa perspectiva, este capítulo tem como proposta apresentar uma metodologia para o cálculo de forças e estresse eletromecânico que se verificam nas partes ativas e estruturais dos transformadores, em consequência das elevadas correntes de curto-circuito “passantes” ou das correntes de “inrush”. As formulações utilizadas para os cálculos analíticos balizarão os trabalhos de validação das estratégias computacionais desenvolvidas, que, por comparação em seus aspectos quantitativos das grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas permitirão aferir o desempenho dos modelos desenvolvidos empregando-se os métodos numéricos selecionados para a modelagem dos transformadores.

Para atender os objetivos aqui propostos, este capítulo aborda, fundamentalmente, os seguintes aspectos:

- Definição e caracterização das forças eletromagnéticas e dos campos de dispersão, evidenciando a influência de tais campos na magnitude dos esforços;
- Apresentação de uma metodologia analítica para cálculo das componentes de forças axiais e radiais e dos estresses originados pelas forças;

- Descrição dos diferentes tipos de estresses eletromecânicos passíveis de ocorrência em transformadores e identificação dos principais tipos de falhas provocados por esses estresses nos enrolamentos concêntricos de transformadores.

3.2 Forças eletromagnéticas em transformadores

De acordo com a teoria eletrodinâmica, a densidade de força num dado volume de uma bobina, de um transformador por exemplo, é igual ao produto vetorial da densidade de corrente na bobina pela densidade de fluxo magnético de dispersão. Esta correlação é dada pela equação 3.1, a qual se fundamenta na expressão básica das forças de Lorentz.

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (3.1)$$

sendo:

$\vec{f}$: densidade volumétrica de força magnética (N/m^3);

$\vec{J}$: densidade superficial de corrente (A/m^2);

$\vec{B}$: densidade de fluxo magnético de dispersão (T).

As forças entre espiras de um mesmo enrolamento (primário ou secundário) de um transformador são de atração. Por outro lado, as forças entre as espiras de enrolamentos distintos são de repulsão, se as correntes que circulam em ambos enrolamentos têm sentidos opostos. Estes efeitos estarão sempre presentes quando um transformador está em operação, independentemente do regime de funcionamento [38].

Sob condições normais de operação as forças e os campos de dispersão são relativamente pequenos e por conseguinte, os esforços são perfeitamente suportáveis pelas estruturas de suporte dos enrolamentos. No entanto, sob ação de fenômenos transitórios, tais como, curtos-circuitos e correntes de energização de transformadores, os campos de dispersão devidos às elevadas correntes também alcançam valores substanciais e, por conseguinte, os esforços originados podem tornar-se grande o suficiente para destruir total ou parcialmente o transformador, caso os condutores não estejam adequadamente sustentados por estruturas de suporte.

Com o intuito de ilustrar os efeitos decorrentes da interação entre as correntes e os campos magnéticos de dispersão nas bobinas de um transformador mostra-se a figura 3.1, a qual representa a distribuição de fluxo na janela de um transformador de

enrolamentos concêntricos. Esta figura foi obtida de simulações utilizando o FEMM. A figura ilustra, além da distribuição de fluxo, os campos de dispersão radial e axial as forças resultantes.

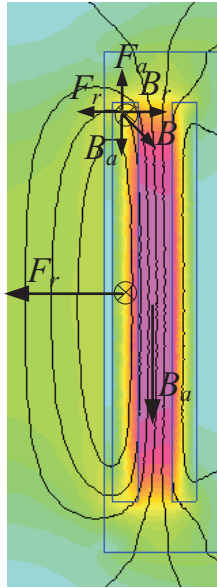


Figura 3.1: Campos de dispersão e forças axiais e radiais.

A figura anterior permite observar, ainda, o comportamento típico da distribuição de fluxo de dispersão na janela de transformadores com enrolamentos concêntricos e com forças magnetomotrizes (ampère-espiras) uniformemente distribuídas e equilibradas. Essa distribuição de fluxo magnético de dispersão é quase que exclusivamente axial (linhas de fluxo paralelas às bobinas) ao longo da maior parte da altura dos enrolamentos (B_a) e inclina-se nas extremidades das bobinas, buscando o menor caminho de retorno. Essa inclinação provoca a decomposição do campo de dispersão em duas componentes: uma axial (B_a) e outra radial (B_r) nas extremidades superior e inferior da bobina.

A equação 3.1 define as forças eletromagnéticas como a interação entre as componentes das densidades de fluxo de dispersão e a corrente que circula nos enrolamentos. O processo de interação entre essas grandezas vetoriais acontece da seguinte forma: a densidade de fluxo magnético de dispersão axial (B_a), interage com a corrente do enrolamento, dando origem a uma *força radial* (F_r), mostrada na figura em questão. Esta é responsável pela mútua repulsão entre os enrolamentos interno e externo do transformador. Por outro lado, a interação entre o campo de dispersão radial com a corrente dá origem à uma *força axial* (F_a), responsável pelos esforços de *compressão axial*. Salienta-se que para enrolamentos perfeitamente alinhados e com uma distribuição

uniforme dos ampère-espiras, a força *axial* é exclusivamente de compressão.

Para a condição em que os enrolamentos encontrem-se desequilibrados e/ou desalinha- dos, as forças radiais praticamente permanecem inalteradas em relação ao caso equilibrado. As forças axiais, no entanto, variam, sofrendo aumento de amplitude. Estas forças agem no sentido de aumentar ainda mais o desequilíbrio existente, submetendo o equipamento a esforços ainda maiores, que, dependendo da severidade do distúrbio, podem vir a comprometer a sua integridade física.

Diferenças construtivas de transformadores, tais como: tipo de núcleo (envolvente ou envolvido), tipo de bobina (camada, disco e tap's), também originam forças diferenciadas nas diversas configurações de enrolamentos. Sendo que, cada tipo construtivo, tem uma capacidade inerente para suportar os esforços nos condutores, evitando seu movimento, quando submetidos a condições adversas extremas [39].

É importante ressaltar, que para o cálculo das forças mecânicas em diferentes partes dos enrolamentos, existe a necessidade de se ter um conhecimento preciso das distribuições das densidades de fluxos magnético de dispersão, pois são de fundamental importância na fase de projeto de transformadores. Destaca-se, que o “caminho” magnético do fluxo tem grande influência também nas perdas magnéticas e nos esforços dinâmicos a que são submetidos os equipamentos, em decorrência dos curtos-circuitos [40].

3.3 Campos magnéticos de dispersão em transformadores

Conforme mencionado, o cálculo das forças eletromagnéticas depende fundamentalmente, do conhecimento das corrente e da trajetória do fluxo magnético de dispersão no espaço localizado entre os enrolamentos. Diante disso, optou-se por realizar uma breve explanação do comportamento dos campos magnéticos no interior dos transformadores. Para tanto, devem ser estabelecidas as relações entre os fluxos concatenados e correntes envolvidas, levando-se em consideração a dispersão e as propriedades magnéticas do material utilizado na confecção do núcleo. Para uma melhor compreensão, as análises serão efetuadas em dois momentos, inicialmente para a situação de operação a vazio e, posteriormente, na condição sob carga.

- Transformador operando a vazio

A figura 3.2 ilustra os fluxos que se estabelecem no interior de um transformador tipo núcleo envolvido, para duas condições de operação em vazio do equipamento.

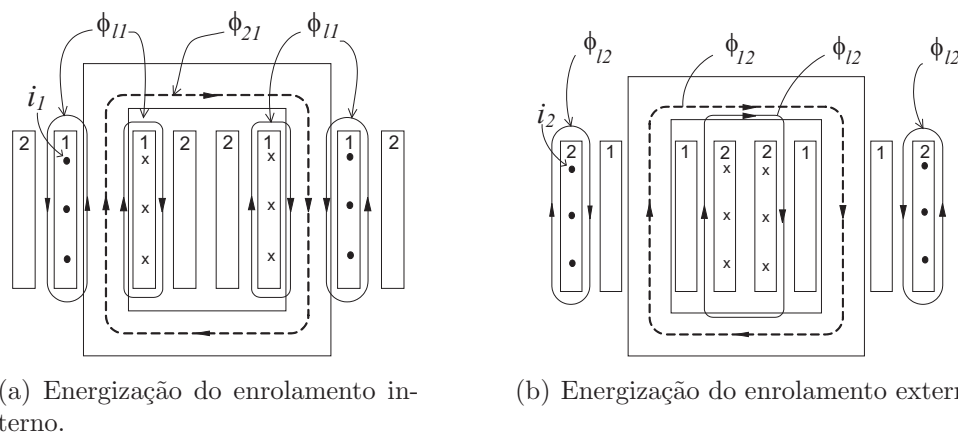


Figura 3.2: Densidade de campo magnético típico de um transformador a vazio.

A figura 3.2(a), refere-se à situação em que o enrolamento 1 (interno) é energizado e o enrolamento 2 (externo) permanece aberto. A segunda condição operativa, figura 3.2(b), analisa a situação contrária, ou seja, o enrolamento 2 encontra-se conduzindo com o enrolamento 1 mantido aberto. Note-se que, as figuras mencionadas mostram as correntes nos enrolamentos (i_1 e i_2) e as principais componentes dos fluxos por elas produzidos.

Observa-se que a maior parte do fluxo mostrado na figura 3.2(a), (ϕ_{21}), está confinada no núcleo e, portanto, concatena todas as espiras de ambos enrolamentos. Outra parte do fluxo concatena somente as espiras do enrolamento 1 (ϕ_{l1}) [41].

Analogamente ao caso anterior, a figura 3.2(b) evidencia que o fluxo ϕ_{l2} está confinado no núcleo ferromagnético e o fluxo ϕ_{l2} concatena apenas as espiras do enrolamento 2.

Sabe-se, que a alta permeabilidade do material ferromagnético quando comparado a outros meios, confere ao núcleo ferromagnético dos transformadores, a preferência no estabelecimento do fluxo magnético (ϕ_{21} e ϕ_{l2}). Entretanto, uma parte deste fluxo segue um caminho combinado entre o ar e o núcleo magnético (ϕ_{l1} e ϕ_{l2}). Neste caso, considerando que a relutância através do material não-linear é pequena quando comparada com a relutância linear (do ar ou óleo, por exemplo), para efeito de cálculo, pode-se considerar que a relutância oferecida ao estabelecimento do fluxo de dispersão

é formado apenas pelo caminho considerado linear.

- **Transformador operando sob carga**

A condição operativa sob carga é caracterizada pela circulação de corrente em os ambos enrolamentos do transformador. Os fluxos totais concatenados são produzidos pelo efeito combinado de ambas correntes e são, em parte, devido ao acoplamento parcial do campo magnético nos espaços entre os enrolamentos. Os fluxos resultantes dependem também do valor instantâneo das correntes em ambos enrolamentos, conforme mostra uma situação ilustrativa analisada a seguir, que descreve o comportamento das correntes e fluxos em um transformador com enrolamentos concêntricos.

Para tanto, considere-se um transformador sob carga, com igual número de espiras em seus enrolamentos interno ou primário e externo ou secundário, cujas formas de onda das correntes são mostradas na figura 3.3.

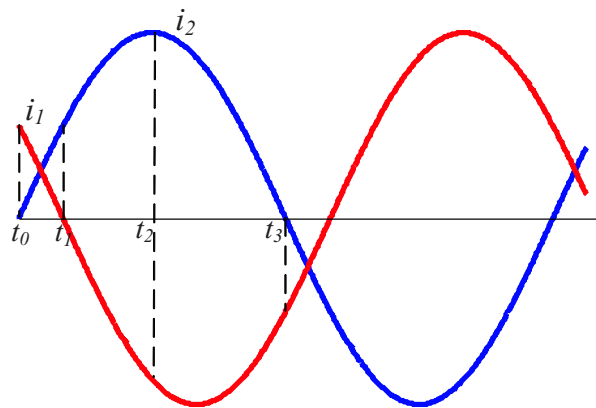


Figura 3.3: *Correntes instantâneas nos enrolamentos interno e externo.*

A força magnetomotriz produzida pela corrente secundária (i_2), mostrada na figura anterior, tende a se opor à força magnetomotriz devida à corrente do enrolamento primário (i_1). Dessa forma, se as direções positivas de ambas correntes são escolhidas na mesma direção do fluxo positivo, as correntes das bobinas interna e externa são aproximadamente iguais em amplitude e estão em oposição de fase, como mostra a figura 3.3. A amplitude e a relação de fase das correntes primária e secundária dependem da natureza da carga, bem como, das características do transformador.

No instante t_0 , a corrente instantânea i_2 é nula e a distribuição de fluxo resultante se comporta como se enrolamento pela qual circula i_2 estivesse aberto, apresentando, dessa forma, um comportamento semelhante ao verificado na figura 3.2(a). Analogamente, em t_1 a corrente instantânea i_1 é nula e a distribuição do fluxo ocorre de maneira

semelhante à figura 3.2(b). Durante a primeira parte do intervalo de tempo de t_0 a t_1 , a corrente instantânea no enrolamento interno é maior que a do externo, e em consequência, tem maior influência na distribuição do fluxo. Assim, o fluxo de dispersão concatena a bobina interna e está dirigido para baixo, no espaço de ar entre os enrolamentos, como mostra a figura 3.2(a). Durante a última parte desse intervalo de tempo, a corrente instantânea da bobina externa é maior que a interna, ou seja, o fluxo de dispersão concatena o enrolamento externo e está dirigido para cima no espaço de ar entre os enrolamentos, como evidencia a figura 3.2(b). É importante observar que, nesse intervalo de tempo, as correntes nos enrolamentos externo e interno apresentam um valor relativamente pequeno e, dessa forma, o fluxo de dispersão também é de pequena amplitude. Tendo em vista que a intenção deste caso ilustrativo é mostrar o comportamento dos fluxos correlacionados com as correntes que os originam, a figura 3.4 mostra diversas configurações para os fluxos resultantes, correspondentes às correntes mostradas na figura anterior e nos períodos respectivos ilustrados na figura 3.3.

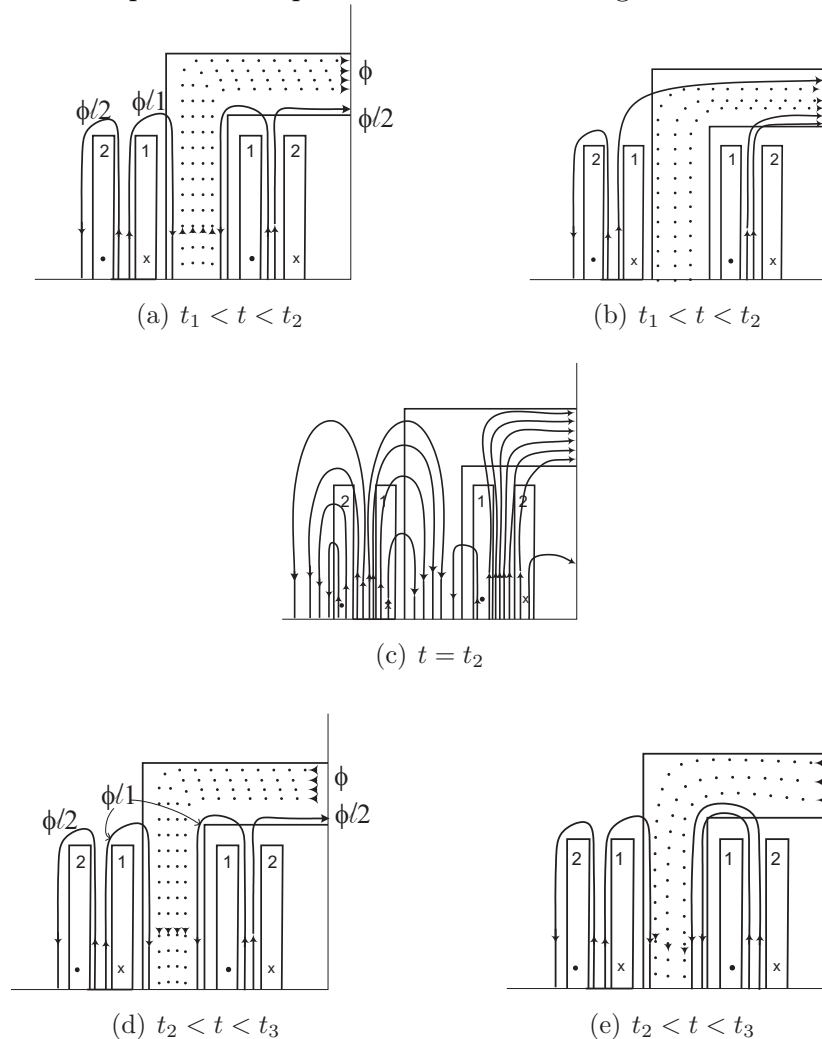


Figura 3.4: Campo magnético devido a corrente nos enrolamentos.

No intervalo de tempo de t_1 a t_2 (figura 3.3) as correntes nos enrolamentos produzem forças magnetomotrizes opostas, sendo predominante a força magnetomotriz devido a corrente i_2 . Dessa forma, o fluxo mútuo resultante ϕ , mostrado na figura 3.4(a), está na direção da força magnetomotriz devido a i_2 , como pode ser observado pelas linhas pontilhadas da mesma. Esta figura ilustra, ainda, através das linhas contínuas, as componentes dos fluxos de dispersão ϕ_{l1} e ϕ_{l2} produzidos pelas correntes individuais. É importante salientar que as componentes de fluxos mencionadas não existem como linhas de forças no diagrama do campo magnético resultante. Todavia, a distribuição real do fluxo é o resultado da combinação dessas componentes. Por exemplo, na figura 3.4(a), o fluxo resultante ϕ e o fluxo de dispersão do enrolamento interno ϕ_{l1} são componentes do fluxo na coluna do núcleo e essas componentes estão em direções opostas como evidencia a figura. O fluxo resultante na coluna é a diferença entre essas componentes. Isto é, a força magnetomotriz da bobina externa, que se opõe a da interna, desvia parte do fluxo do núcleo e força-o a entrar no espaço de ar entre os enrolamentos, como mostrado pelas linhas contínuas na figura 3.4(b). Esta figura permite observar, ainda, que as linhas de fluxo que concatenam ambos enrolamentos, como mostrado pelas linhas tracejadas, não representam a componente mútua resultante ϕ , mostrada pelas linhas tracejadas da figura 3.4(a), e que o fluxo que passa pelo ar (linhas contínuas da figura 3.4(b)), concatena o enrolamento interno, mas não o externo.

À medida que o tempo aumenta de t_1 para t_2 (figura 3.3) o fluxo mútuo resultante vai decrescendo até t_2 . Nesse instante, as forças magnetomotrizes dos enrolamentos externo e interno são iguais e opostas e, conseqüentemente, a força magnetomotriz resultante no núcleo é nula. O fluxo mútuo resultante no tempo t_2 , portanto, é nulo, se os efeitos de histerese e correntes parasitas forem desprezados. Assim, durante o intervalo de t_1 a t_2 as correntes aumentam e o fluxo no ar aumenta de um valor pequeno em t_1 para um valor maior em t_2 . A distribuição do fluxo para esta condição esta mostrada na figura 3.4(c).

No período de t_2 a t_3 da figura 3.3, as correntes dos enrolamentos externo e interno, mais uma vez apresentam-se em oposição, entretanto, a força magnetomotriz da corrente do enrolamento interno negativa (i_1) predomina. O fluxo mútuo resultante ϕ , está portanto na direção da força magnetomotriz devido a i_1 , mostradas pelas linhas pontilhadas da figura 3.4(d). Esta mesma figura mostra também, em linhas contínuas, as componentes de fluxo de dispersão ϕ_{l1} e ϕ_{l2} produzidos por cada uma das correntes

correspondentes. Novamente, salienta-se que os fluxos mostrados na figura mencionada são meramente componentes e não devem ser identificados com qualquer uma das linhas de força do desenho do campo magnético resultante. A distribuição de fluxo resultante é a combinação das componentes conforme mostrado de forma aproximada na figura 3.4(e). Deve-se observar que as linhas de fluxo concatenando instantaneamente ambos enrolamentos, linhas contínuas da figura, não representam a componente mútua resultante ϕ da figura 3.4(d), e a maior parte do fluxo pelo ar (linhas tracejadas da figura 3.4(e)), concatenam o primário, mas não o secundário.

No período de t_2 a t_3 (figura 3.3), as correntes instantâneas decrescem até finalmente, em t_3 , existir tão somente, a corrente no primário, como em t_0 , exceto que as correntes encontram-se com polaridades opostas. A distribuição do fluxo em t_3 é similar mas, está na direção contrária àquela mostrada na figura 3.2(a).

A análise anterior deixa em evidência alguns aspectos relevantes com respeito aos fluxos envolvidos no processo em questão, dentre os quais destacam-se:

- a) o fluxo de dispersão pode ser considerado diretamente proporcional a corrente que o produz;
- b) a distribuição do fluxo em um transformador, depende, além do arranjo geométrico de seu núcleo e enrolamentos, da amplitude e direções instantâneas das correntes;
- c) quando circulam correntes em ambos enrolamentos, a maior parte do fluxo que passa pelo ar, concatena o enrolamento que estiver com a maior força magnetomotriz instantânea.

A primeira constatação descrita anteriormente, é uma importante propriedade do fluxo magnético de dispersão e simplifica, sobremaneira, o tratamento analítico dos transformadores com núcleo de ferro [41]. Essa simplificação é válida, particularmente para o cálculo de forças eletromagnéticas, uma vez que o aumento das correntes de curto-circuito e dos fluxos magnéticos de dispersão é que são os responsáveis pelo agravamento destas forças. Quanto às correntes de energização, essa consideração também é de grande valia, pois, devido às correntes de *inrush*, ocorre a saturação do núcleo ferromagnético tornando a sua relutância muito alta e próxima ao valor da relutância do ar o que aumenta o fluxo de dispersão [42].

3.4 Cálculo analítico das forças radiais em enrolamentos concêntricos

As componentes radiais das forças num transformador com enrolamentos concêntricos podem ser calculadas com precisão através de um método analítico clássico descrito em [29]. Com esse intuito, na sequência faz-se a descrição do método mencionado tendo como foco um transformador, como já dito, dotado de dois enrolamentos concêntricos. É importante salientar, que as formulações apresentadas para o cálculo das forças radiais foram extraídas da referência mencionada.

A figura 3.5 mostra a seção de um dos lados de um transformador de dois enrolamentos, na qual estão ilustradas a distribuição da densidade de fluxo axial e as forças radiais nas bobinas interna e externa. Salienta-se, que com o objetivo de facilitar os cálculos necessários à obtenção das forças, a curvatura do campo próximo às extremidades das bobinas é desprezada (ver figura 3.1). Esta aproximação é perfeitamente justificável, uma vez que é o valor máximo da força que interessa e este ocorre no ponto médio do enrolamento.

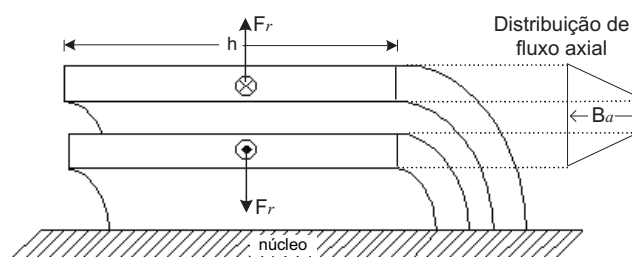


Figura 3.5: Seção transversal de um lado do transformador mostrando as forças radiais nos enrolamentos e a distribuição da densidade de fluxo axial.

A figura exhibe também, o comportamento da densidade de fluxo axial, representado pelo diagrama em forma de trapézio no detalhe constante do lado direito do desenho. Observa-se que esta grandeza apresenta um valor máximo e constante na região entre os enrolamentos e decresce à medida que se aproxima da superfície externa do enrolamento externo e da superfície interna do enrolamento interno. Ainda com respeito à figura anteriormente mencionada e lembrando da simplificação assumida para a curvatura do fluxo axial, pode-se considerar que nestas duas regiões extremas a densidade de fluxo de dispersão axial apresenta um valor nulo. Assim sendo, pode-se assumir que o campo é uniforme ao longo de todo o comprimento das bobinas.

A densidade de fluxo magnético de dispersão no ponto médio entre os enrolamentos

pode ser determinado pela equação 3.2, sendo nI_n o valor eficaz dos ampère-espiras (ou força magnetomotriz) em cada um dos enrolamentos.

$$B_a = \frac{\sqrt{2} \cdot 4\pi \cdot nI_n}{10^7 \cdot h} = \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot nI_n}{h} [T] \quad (3.2)$$

sendo:

B_a : densidade de fluxo de dispersão axial (T);

n : número de espiras do enrolamento;

I_n : corrente nominal do enrolamento (A);

h : altura do enrolamento (m);

μ_0 : Permeabilidade do vácuo ($4\pi 10^{-7}$).

A força magnetomotriz total, nI_n , de cada enrolamento encontra-se imersa em uma densidade de fluxo médio igual a $1/2B_a$. Daí, as forças radiais atuando sobre um enrolamento de diâmetro D_m e altura h podem ser determinadas com auxílio da expressão 3.3.

$$F_r = \frac{2\pi^2(nI_n)^2 D_m}{h} 10^{-7} [N] \quad (3.3)$$

sendo:

F_r : força radial total no enrolamento (N);

D_m : diâmetro médio do enrolamento (m).

A ação dessa força atuando sobre os enrolamentos está ilustrada na figura 3.6. Observa-se na figura, que o enrolamento externo fica sujeito a uma força radial que age para fora e tende a esticar o condutor, produzindo um estresse de tração nas espiras (*hoop stress*). Por outro lado, o enrolamento interno experimenta forças radiais similares, porém dirigidas na direção do núcleo e cuja ação é de comprimir ou esmagar as espiras. Este efeito é denominado estresse de compressão (*compressive stress*).

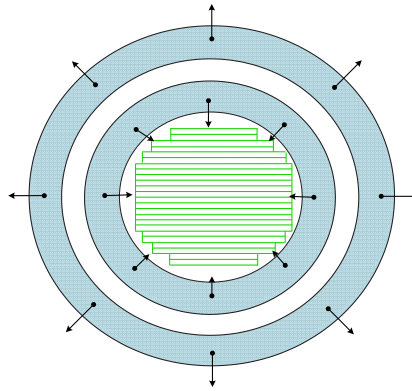


Figura 3.6: *Estresse de tração e de compressão nos enrolamentos concêntricos.*

Para o enrolamento externo, os condutores mais próximos ao diâmetro interno experimentam forças mais elevadas quando comparadas àquelas próximas ao diâmetro externo [36]. De forma semelhante ao comportamento evidenciado para a densidade de fluxo magnético de dispersão axial, as forças radiais também sofrem uma redução linear, a partir de um valor máximo que ocorre próximo ao diâmetro interno alcançando um valor nulo no diâmetro externo. Como os condutores das bobinas estão firmemente montados, a força é transferida do condutor que experimenta a maior força para aquele que é menos solicitado, justificando-se, portanto, a determinação de um valor médio, dado pela expressão 3.3.

O estresse de tração médio no enrolamento externo é calculado considerando-se uma camada cilíndrica, conforme mostra a figura 3.7, à qual o enrolamento externo pode ser comparado. Muito embora a força não seja aplicada no interior do enrolamento, mas sim distribuída linearmente através de sua dimensão, a força equivalente pode ser obtida fazendo o produto da pressão exercida vezes a área da superfície interna total.

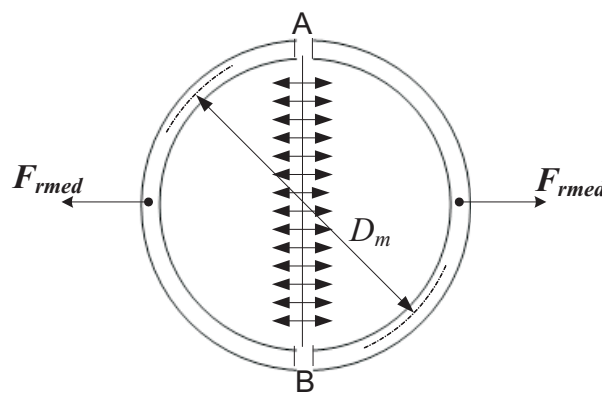


Figura 3.7: *Método para cálculo de estresse de tração médio.*

A força radial média F_{rmed} , mostrada na figura anterior, que age nas duas metades

do enrolamento é equivalente a pressão sobre o diâmetro, enquanto que a força total radial (F_r dada pela equação 3.3) é equivalente a pressão sobre a circunferência de comprimento πD_m . Assim, tem-se que $F_{rmed} = F_r/\pi$ e é dada por:

$$F_{rmed} = \frac{2\pi(nI_{\max})^2 D_m}{h} 10^{-7} [N] \quad (3.4)$$

Esta força age em ambas extremidades do diâmetro AB da figura 3.7, isto é, na seção reta do condutor, igual a duas vezes aquela de todo o enrolamento.

Assim, se o enrolamento tem n espiras de seção transversal S , o estresse de tração médio no enrolamento externo pode ser calculado pela equação 3.5.

$$\sigma_{medio} = \frac{(nI_{\max})^2 \pi D_m}{h \cdot n \cdot S} 10^{-7} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (3.5)$$

Ou ainda,

$$\sigma_{medio} = \frac{I_{\max}^2}{h} \cdot \frac{n\pi D_m}{S} 10^{-7} \quad (3.6)$$

Pode-se notar que $n\pi D_m$ é o comprimento total do condutor no enrolamento. Assim, multiplicando-se o numerador e o denominador da equação 3.6 pela resistividade do condutor na temperatura de 75° C, chega-se a equação 3.7.

$$\sigma_{medio} = \frac{I_{\max}^2}{\rho h} \cdot \frac{R_{cc}}{10^7} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (3.7)$$

sendo:

R_{cc} : resistência em corrente contínua do condutor (Ω);

ρ : resistividade do condutor na temperatura de 75° C ($\Omega.m$).

O estresse de tração no primeiro pico da corrente de curto-circuito, assumindo um fator de assimetria igual a 1,8, é obtido substituindo $I_{max} = 1,8\sqrt{2}I_n/Z_{pu}$ na equação 3.7, onde I_n e $Z(pu)$ são, respectivamente, a corrente nominal do enrolamento e a impedância percentual do equipamento. Assim tem-se:

$$\sigma_{medio} = \frac{(1,8\sqrt{2})^2 I_n^2 \cdot R_{cc}}{Z^2 \cdot \rho \cdot h \cdot 10^7} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (3.8)$$

A equação 3.8 fornece bons resultados de estresse para enrolamentos do tipo disco rigidamente enrolados, uma vez que, embora o estresse seja maior nos condutores internos do enrolamento externo, estes não podem se deformar sem pressionar os condutores

externos. Isto resulta em um estresse de tração aproximadamente uniforme em todo o enrolamento. Em enrolamentos tipo camada/helicoidal com duas ou mais camadas, estas não são firmemente sustentadas uma pela outra e, portanto, não há transferência de carga entre elas. Assim, o estresse de tração é maior na camada mais interna e decresce na direção das camadas externas. Para enrolamentos de dupla camada, o estresse médio na camada próxima ao gap é 1,5 vezes maior que o estresse médio dos dois enrolamentos juntos. Generalizando, se existem L camadas, o valor do estresse na k -ésima camada, a partir do gap, é $[2 - ((2k - 1)/L)]$ vezes o estresse médio de todas as camadas consideradas juntas [36].

Deve-se considerar ainda que, as expressões das forças radiais e do estresse de tração radial evidenciadas anteriormente, podem ser utilizadas para o cálculo analítico das forças e estresses tanto no enrolamento interno quanto no externo, devendo-se apenas atentar para uso do diâmetro correto do enrolamento que estiver sendo analisado. Entretanto, o cálculo dos estresses para o enrolamento interno exige considerações de projeto mais detalhadas que as mencionadas nesta seção. Esses aspectos serão abordados, juntamente com os tipos de falhas, nas seções posteriores.

3.5 Cálculo analítico das forças axiais em enrolamentos concêntricos

O cálculo analítico das componentes radiais da densidade de fluxo magnético de dispersão em um transformador com enrolamentos concêntricos não é tão simples e nem tão preciso quanto o cálculo da densidade de fluxo de dispersão na direção radial. Contudo, alguns métodos existentes podem fornecer resultados aproximados para arranjos de enrolamentos menos complexos onde possam ser efetuadas simplificações, como por exemplo, a desconsideração da curvatura. As equações para cálculos de forças eletromagnéticas axiais e estresse mecânicos foram obtidas das referências [29], [31] e [36].

As forças axiais devem ser analisadas sob duas condições distintas as quais geram componentes de forças também diferenciadas. Essas duas situações, designadas por condição ideal e não-ideal, são apresentadas na seqüência.

3.5.1 Condição ideal

Em transformadores que têm distribuição uniforme de forças magnetomotrizes em enrolamentos concêntricos de igual comprimento, situação definida na referência [36] como condição ideal, as forças axiais que ocorrem devido aos campos radiais nas duas extremidades das bobinas estão dirigidas para o ponto médio dos enrolamentos. Essas forças surgem como resultado do fluxo produzido pelos próprios condutores em paralelo que transportam corrente na mesma direção.

A figura 3.8 ilustra as densidades de fluxo magnético e as forças axiais em ambos enrolamentos para a situação mencionada. Pode-se observar na figura, que embora exista uma elevada força por unidade de comprimento nas extremidades dos enrolamentos, a força compressiva cumulativa é máxima na metade da altura das bobinas nos enrolamentos externo e interno.

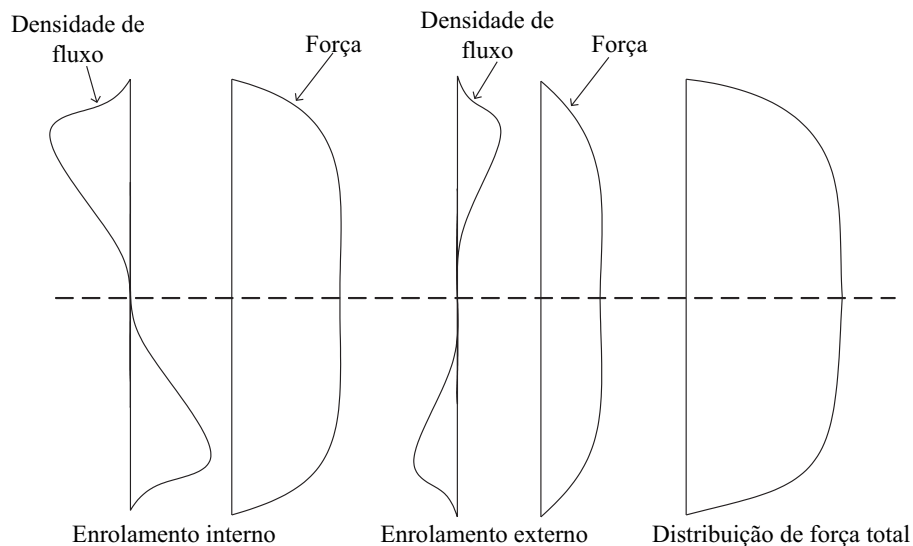


Figura 3.8: *Distribuição de fluxo radial e de força axial em enrolamentos concêntricos iguais.*

Para essa condição ideal pode-se obter, diretamente, a soma das compressões axiais próximo ao ponto médio para ambos enrolamentos. O resultado final é dado pela equação 3.9.

$$F_a = \frac{2\pi^2 (nI_{max})^2 D_m}{10^7 h^2} \left[d_0 + \frac{d_1 + d_2}{3} \right] [N] \quad (3.9)$$

sendo:

nI_{max} : força magnetomotriz dos enrolamentos (A-espiras);

D_m : diâmetro médio do transformador, ou seja, considerando ambos enro-

lamentos (m);

h : altura dos enrolamentos (m);

d_0 : espaço entre os enrolamentos (m);

d_1 e d_2 : espessura radial dos enrolamentos (m).

O enrolamento interno, por estar mais próximo das colunas e em virtude do alto fluxo radial, experimenta uma força compressiva maior, quando comparada ao enrolamento externo. De acordo com a referência [29], na ausência de uma análise mais detalhada, pode-se considerar que cerca de $2/3$ a $3/4$ desta força é aplicada no enrolamento interno e os $1/3$ a $1/4$ restantes estão aplicados no enrolamento externo.

Uma segunda componente da força axial é definida na referência [31], também para a condição ideal. Esta componente surge como resultado da interação entre a corrente de um enrolamento e o fluxo de dispersão produzido pelo outro enrolamento que concatena o primeiro, e vice-versa. A figura 3.9 ilustra essa situação. Pode-se notar na figura que, a inclinação do fluxo na região próxima às partes superior e inferior do enrolamento externo favorece o surgimento de uma componente da densidade de fluxo de dispersão radial e, em consequência da interação deste campo com a corrente, surge uma componente axial da força eletromagnética.

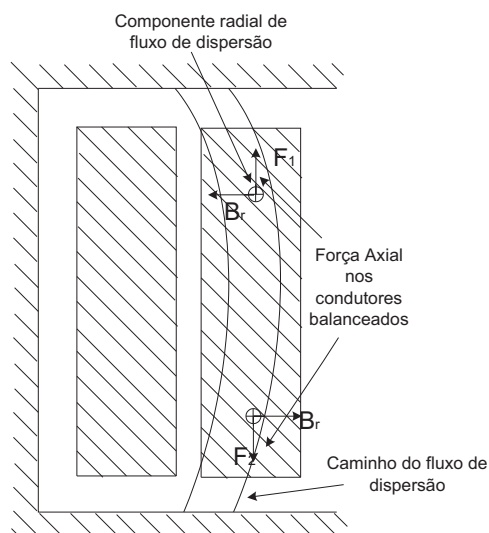


Figura 3.9: *Forças axiais nos enrolamentos magneticamente balanceados: $F_1 = F_2$.*

Pode-se observar também na figura anterior, que as forças axiais nas duas metades da bobina estão em direções opostas, uma vez que a corrente está na mesma direção. Tendo em vista a suposição de condições ideais definidas anteriormente, onde os ampère-espiras estão balanceados de modo que o fluxo de dispersão mantém simetria,

essas forças serão iguais e opostas. Em decorrência disso, a força resultante, quando se considera o enrolamento como um todo, será nula.

3.5.2 Condição não-ideal

Situações distintas das anteriores, que proporcionam acréscimo significativo na força axial são consideradas condições não-ideais. Nestas circunstâncias, as forças axiais são difíceis de serem calculadas através de métodos analíticos. Isso ocorre, principalmente, pela dificuldade de se levar em conta a curvatura dos enrolamentos e a presença do núcleo ferromagnético, o que é possível desde que se faça uso de soluções complexas derivadas de modelos computacionais [29].

As condições não-ideais que contribuem para o aumento das forças axiais nos enrolamentos são diversas, dentre elas pode-se citar: o desbalanceamento dos ampère-espiras dos enrolamentos concêntricos; o deslocamento axial dos enrolamentos; o encolhimento axial do papel isolante que pode vir a ocorrer durante a secagem e montagem dos enrolamentos e, o uso de derivação (tap's).

O deslocamento axial entre os enrolamentos concêntricos constitui-se num aspecto construtivo que dificulta o pleno balanceamento das forças magnetomotrizes dos enrolamentos, alterando a distribuição do fluxo de dispersão no interior do transformador e produzindo forças axiais desiguais e opostas, atuando em cada metade do enrolamento. Essa situação não-ideal está ilustrada na figura 3.10.

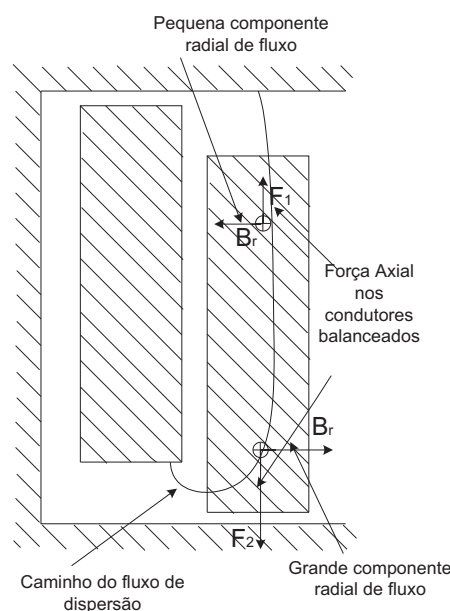


Figura 3.10: Forças axiais nos enrolamentos com deslocamento axial: $F_1 < F_2$.

Observa-se na figura, que para essa condição tem-se que $F_1 < F_2$ e portanto, existirá uma força líquida no enrolamento que tenderá a aumentar o deslocamento ainda mais.

Situação similar é observada quando existe a presença de tap's utilizados na regulação da tensão. O uso de tap's altera a distribuição de fluxo magnético no interior do transformador. Essa situação também pode ocasionar o aparecimento de forças axiais desiguais nas metades superior e inferior das bobinas, causando uma força resultante capaz de danificar as estruturas de suporte dos enrolamentos.

Apesar das dificuldades e imprecisões que os métodos analíticos impõem aos cálculos das forças axiais para as condições não ideais, alguns métodos aproximados são úteis na fase de projeto do transformador, pois permitem ao projetista determinar, prontamente, se um dado arranjo de enrolamentos resultará ou não em altas forças axiais. Um exemplo de método analítico que produz resultados confiáveis é apresentado na seqüência.

- **Método dos ampère-espiras residuais**

O método dos ampère-espiras residuais disponibiliza fórmulas de razoável precisão e que conduzem a resultados confiáveis. Este se fundamenta no princípio de que qualquer arranjo de enrolamentos concêntricos, no qual a soma de forças magnetomotrizes é nula, divide-se em dois grupos, cada um tendo ampère-espiras balanceados, um produzindo um campo axial e o outro um campo radial [31]. Os ampère-espiras radiais originam os fluxos radiais e por conseguinte, as forças axiais entre os enrolamentos. Este método é usado para estimar as forças axiais em arranjos com enrolamentos assimétricos como ilustrado pela figura 3.11, que mostra uma configuração onde o enrolamento externo possui derivação em uma extremidade. Pode-se notar que, a assimetria causa uma concentração de fluxo na região em que ocorre o desequilíbrio de ampère-espiras e portanto, nesse local, as forças serão mais intensas.

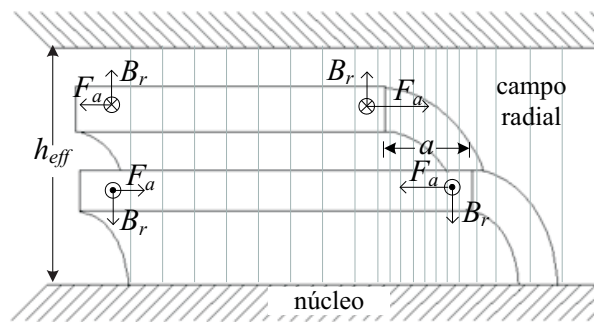


Figura 3.11: Seção transversal de um lado do transformador mostrando as forças axiais nos enrolamentos e a distribuição de densidade de fluxo de dispersão radial.

Deve-se ressaltar que, transformadores que apresentam condições ideais, ou seja, enrolamentos concêntricos sem derivação, sem deslocamento axial e de igual comprimento, não possuem ampère-espiras residuais e nem forças entre os enrolamentos, embora exista uma força de compressão interna em ambos enrolamentos, conforme descrito na seção anterior.

O método para determinação da distribuição de ampère-espiras radiais é ilustrado na figura 3.12.

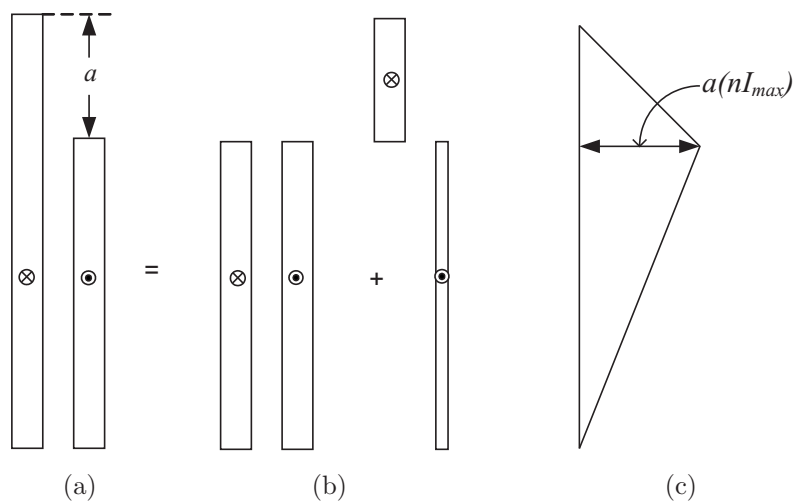


Figura 3.12: Determinação do diagrama de ampère-espiras residuais para enrolamento com derivação em uma extremidade.

A figura 3.12(a) mostra um enrolamento concêntrico com uma derivação em uma das extremidades do enrolamento externo, de comprimento a , relativa ao comprimento total sem derivação. Os dois arranjos da figura 3.12(b) representam grupos de ampère-espiras balanceados que, quando superpostos, reproduzem a configuração original de ampère-espiras. O diagrama das forças-magnetomotrices radiais, plotado em função da altura do enrolamento, esta ilustrado na figura 3.12(c), apresentando um formato

triangular. O valor máximo alcançado é de $a(nI_{max})$, em que (nI_{max}) representa a força-magnetomotriz do enrolamento interno ou do externo.

Para o cálculo das forças axiais é necessária a determinação da densidade de fluxo radial produzido pelos ampère-espiras radiais. Em outras palavras, deve-se conhecer o comprimento efetivo do caminho para a densidade de fluxo radial para todos os pontos ao longo do enrolamento. Para essa finalidade, considera-se que esse comprimento é constante e que não varia com a posição axial do enrolamento [29]. Mesmo com essa simplificação obtém-se resultados com precisão satisfatória.

Assim, pode-se efetuar o cálculo das forças de compressão axial pelo método mencionado, sendo necessário para tanto, o conhecimento das seguintes grandezas:

- O comprimento efetivo do caminho do fluxo radial, h_{eff} , (ver figura 3.11), que é diferente para cada arranjo de tap;
- A densidade do fluxo radial médio no diâmetro médio do transformador (B_r), dado pela equação 3.10, mostrada na seqüência;
- O valor médio dos ampère-espiras é igual a $(1/2)a(nI_{max})$, sendo a o comprimento do tap (ou derivação), expresso como uma fração do comprimento total do enrolamento sem derivação.

A densidade de fluxo médio no diâmetro médio do transformador é dada pela equação 3.10.

$$B_r = \frac{4\pi}{10^4} \cdot \frac{a(nI_{max})}{2h_{eff}} [T] \quad (3.10)$$

A força axial no outro enrolamento do transformador de (nI_{max}) ampère-espiras máximos pode ser determinada de através da equação 3.11.

$$F_a = \frac{2\pi a(nI_{max})^2}{10^7} \cdot \frac{\pi D_m}{h_{eff}} [N] \quad (3.11)$$

O tipo de derivação mostrado anteriormente tem a finalidade tão somente de evidenciar a influência da inserção de tap's no desempenho dos campos de dispersão e forças eletromagnéticas em transformadores. Outros arranjos de tap's podem ser utilizados, inclusive possibilitando um melhor balanceamento das forças magnetomotrizes ao longo da coluna e, conseqüentemente, originando forças de menor intensidade [31].

3.6 Estresses eletromecânicos e tipos de falhas em transformadores

Os estudos conduzidos anteriormente, a respeito das forças eletromagnéticas e densidade de fluxo magnético de dispersão que ocorrem num transformador, são a base para a determinação dos esforços (ou estresses) a que um equipamento possa ser submetido em decorrência de uma determinada condição operativa.

Assim sendo, este item propõe-se a abordar os aspectos relacionados com os estresses mecânicos originados em decorrência das forças eletromagnéticas, bem como, os tipos de falhas associados aos estresses. Entretanto, objetivando uniformizar o entendimento sobre a terminologia existente sobre o assunto, muitos deles na língua inglesa, preliminarmente, é feita uma breve revisão dos termos e definições comumente empregados em estudos da mecânica dos materiais.

É importante destacar, que os mecanismos de falhas em transformadores de núcleo envolvido diferem dos mecanismos de falhas em transformadores de núcleo envolvente. Tipos de falhas para ambos tipos de configuração dos enrolamentos podem ser encontrados em [39]. A referência analisa, também, a capacidade inerente de resistência ao movimento dos condutores dos enrolamentos para esses dois tipos de arranjo das bobinas. Fatores como: rigidez do sistema de isolamento, firmeza dos sistemas de fixação das bobinas, resistência mecânica dos condutores e a elasticidade do corpo das bobinas, são destacados como sendo fundamentais na determinação da resposta dos enrolamentos às forças eletromagnéticas.

3.6.1 Uma revisão das terminologias comumente utilizadas em estudos de esforços eletromecânicos

As propriedades mecânicas compreendem a resposta dos materiais às influências mecânicas externas. Essas características são geralmente avaliadas por meio de ensaios que indicam a capacidade de desenvolver, para a carga utilizada para o teste, deformações reversíveis ou irreversíveis, ou de resistirem à ruptura. A execução desse tipo de teste consiste em submeter uma amostra do material a um contínuo e unidirecional aumento da força de tração ou de compressão. Simultaneamente, são feitas observações e apontamentos sobre o comportamento da amostra. Os resultados das deformações sofridas pelo material são traduzidos em curvas denominadas *estresse x deformação* ou curva *tensão x deformação*. Para fins ilustrativos, a figura 3.13 mostra uma curva

típica do comportamento de um material submetido a esforços mecânicos.

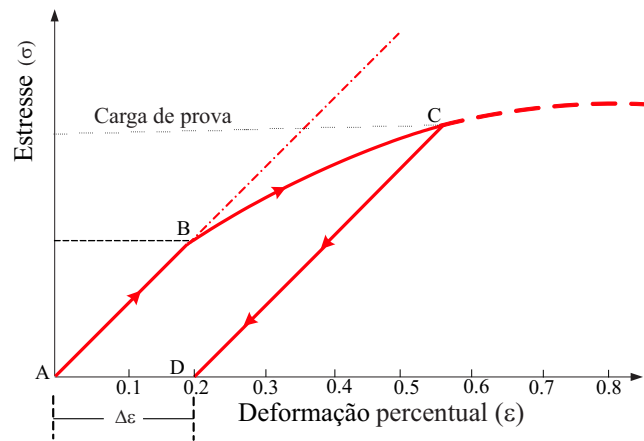


Figura 3.13: *Método para determinação da carga que causará deformação.*

A curva *estresse x deformação* mostrada anteriormente apresenta duas regiões bem definidas. A primeira delas, do ponto A ao ponto B, é uma região linear, onde a deformação aumenta proporcionalmente à tensão mecânica aplicada. Nesta região a deformação é reversível, portanto, o material apresenta um comportamento perfeitamente elástico, ou seja, retorna ao seu formato original após a retirada da carga aplicada. Na segunda região, do ponto B ao ponto C, o material tem um comportamento não-linear. Nesta, as trações aplicadas podem ocasionar o escoamento macromolecular do material sob prova, com o rompimento de ligações secundárias entre cadeias adjacentes. Dessa forma, quando o carregamento é retirado, o material retorna à condição de tensão nula (ponto D), paralelamente à condição de carregamento, permanecendo, entretanto, uma deformação residual ($\Delta\epsilon$), ou seja, o material perde a capacidade de retornar ao seu comprimento original. Neste caso, diz-se que o material apresenta um comportamento plástico.

O coeficiente angular na região de linearidade da referida curva é denominado módulo de elasticidade. Este coeficiente é definido matematicamente através da lei de Hooke, dada pela equação 3.12.

$$\sigma = E\epsilon \quad (3.12)$$

sendo:

σ : tração (ou estresse) aplicada;

ϵ : deformação resultante;

E : módulo de elasticidade.

É importante ressaltar que, a lei de Hooke é válida somente para a região linear da curva *estresse x deformação*.

Para determinar a resistência mecânica do enrolamento de um transformador, além do módulo de elasticidade definido anteriormente, outra propriedade de importância direta do material condutor é o seu limite de escoamento ou limite elástico (do inglês *yield stress*) [29].

O valor, conhecido como “limite de escoamento” (ponto B da figura anterior), representa o valor da tensão nominal de tração verificado no ponto de transição do regime elástico para o regime plástico, isto é, o valor da tensão a partir da qual ocorre a deformação plástica do material (escoamento). Em muitos materiais é difícil localizar esta tensão na curva *estresse x deformação*. Fabricantes, normalmente, fornecem valores de estresses críticos básicos para materiais e arranjos de condutores, denominados carga de prova ou *proof stress*. O valor de carga de prova corresponde à interseção entre uma linha reta, construída paralela a porção elástica, e a curva estresse x deformação (ponto C da figura 3.13).

Um outro exemplo típico de carga de prova, desta vez utilizando o cobre como corpo de prova para diferentes níveis de “dureza” ou *hardness* do material condutor, é mostrado na figura 3.14 [25].

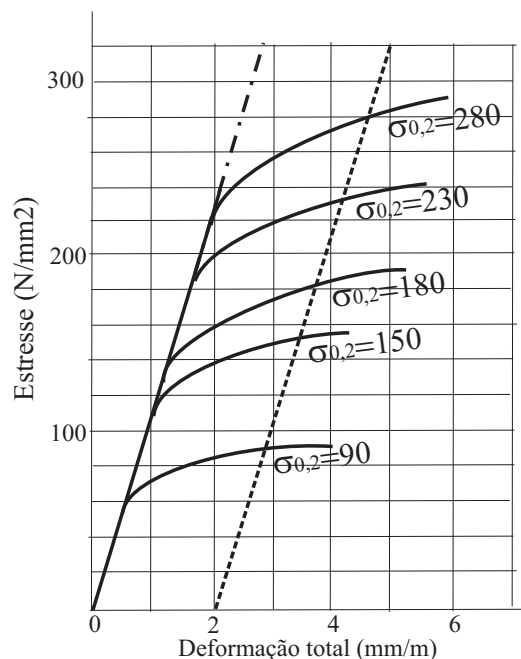


Figura 3.14: Carga de prova do cobre para vários níveis de “dureza”.

A figura indica um valor de 0,2% de carga de prova para a amostra de cobre. Dessa

forma, a carga de prova pode ser entendida como o valor do estresse que produz uma deformação permanente no condutor de 0,2% (2mm em 1000mm). Contudo, para fins práticos é comum usar somente 80% desse valor, sendo que alguns fabricantes utilizam 85% da carga de prova de 0,1% [25].

Encerra-se esta parte sobre as terminologias utilizadas sobre resistência dos materiais, salientando que o nível crítico de deformação de um material é uma função da área da seção transversal, do tipo de material e do tipo do condutor utilizado na construção dos enrolamentos. As várias formas e tipos de condutores disponíveis comercialmente, requerem também fórmulas distintas para cálculo dos estresses permissíveis correspondentes.

3.6.2 Falhas devido a forças radiais

Forças radiais produzem efeitos diferentes nos enrolamentos externo e interno de transformadores. As forças dirigidas para fora, provocam estresse de tração no enrolamento externo, enquanto que, estresses de compressão são desenvolvidos nos enrolamentos sujeitos à forças dirigidas para o centro da coluna (ver figura 3.6). Para enrolamentos concêntricos, a suportabilidade mecânica do enrolamento externo, depende da resistência à força de tração do condutor. Por outro lado, a resistência mecânica do enrolamento interno, depende das estruturas de suporte providenciadas para os condutores. É comum a ocorrência da deformação radial do enrolamento interno, enquanto que, o rompimento do enrolamento externo, é mais difícil de ocorrer.

3.6.2.1 - Enrolamentos sujeitos a estresses de tração

Em decorrência de forças radiais, o enrolamento externo de um transformador é o que fica sujeito ao estresse de tração ou *hoop stress*. A intensidade do estresse pode ser estimada de acordo com equação 3.8, apresentada na seção 3.6. Sobre este quesito é importante destacar alguns aspectos relacionados à resistência mecânica dos condutores submetidos à forças de tração.

Nos condutores utilizados em enrolamentos compactos, tipo disco ou em qualquer uma das camadas de enrolamentos multi-camadas, se verifica uma força de tração uniforme. Essa força, dependendo de seu valor, poderá causar danos à isolação do condutor, caso o estresse de tração exceda o limite de escoamento do condutor. Contudo, a probabilidade de falha nos enrolamentos sujeitos a esse tipo de estresse é pequena, uma

vez que, normalmente são usados condutores dimensionados para um valor de carga de prova de 0,2 % [36].

3.6.2.2 - Enrolamentos sujeitos a estresses de compressão

Este tipo de esforço é experimentado pelos enrolamentos internos de um transformador, em decorrência das cargas de compressão radial a que podem ficar expostos. A compressão pode manifestar-se de duas maneiras distintas. Uma delas ocorre quando o enrolamento interno está firmemente sustentado por espaçadores, conforme ilustra a figura 3.15(a). Os espaçadores neste caso estão localizados axialmente, e a estrutura de suporte como um todo tem rigidez mecânica maior que a dos condutores [29]. Neste caso, os condutores podem apresentar uma deformação entre todos os suportes ao longo da circunferência do enrolamento, com a curvatura voltada para dentro, desde que o valor do estresse exceda o limite elástico do material condutor. Esse tipo de falha, denominado “deformação forçada” (*forced buckling*), está ilustrada na figura 3.15(b), assemelhando-se a uma estrela de várias pontas.

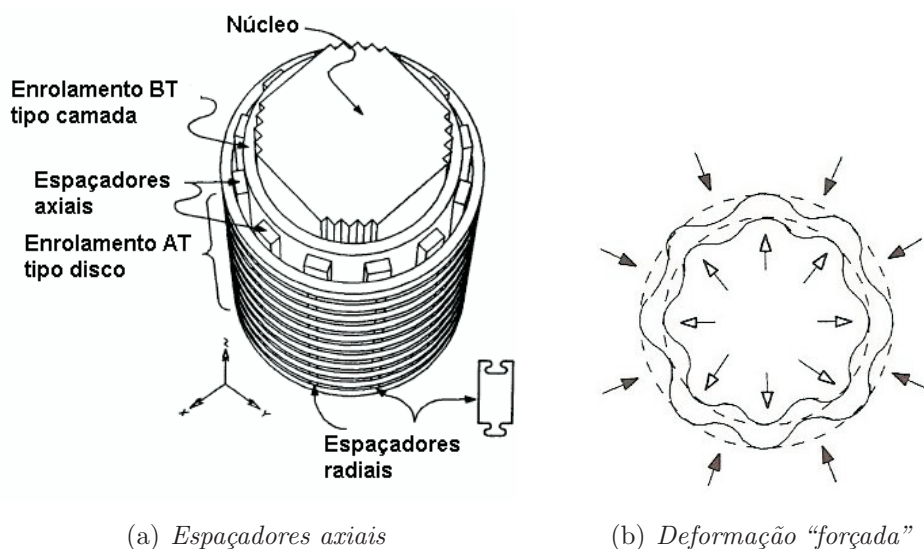


Figura 3.15: a) Ilustração dos espaçadores axiais e outros componentes do transformador e b) Deformação forçada (*“forced buckling”*) no enrolamento interno.

A outra forma de deformação que afeta o enrolamento interno é chamada “deformação livre” (*free buckling*). Para este caso, diferentemente do primeiro, a inclinação dos condutores não está relacionada com os espaçadores axiais, sendo que a resistência mecânica dos condutores é maior do que aquela proporcionada pela estrutura de suporte. Nessa condição, a projeção do condutor pode se dar tanto para dentro quanto para fora, em um ou mais pontos da circunferência, conforme ilustra a figura 3.16 [29].

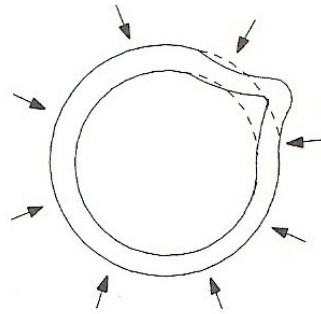


Figura 3.16: Deformação “livre” no enrolamento interno: *Free buckling*.

Os dois tipos de deformações relatados podem ser vistos como um conjunto sequencial de falhas, que iniciam no condutor mais externo do enrolamento interno e caminha no sentido do condutor mais interno deste enrolamento (próximo ao núcleo) [36]. Existem muitos fatores que podem favorecer a ocorrência da deformação dos enrolamentos, dentre os quais pode-se citar: enrolamentos “frouxos”, uso de materiais com características inferiores às mínimas requeridas, excentricidade dos enrolamentos, baixa resistência das estruturas de suporte em relação ao condutor, etc.

A técnica utilizada para conferir aos enrolamentos uma suportabilidade mecânica suficiente para resistir às forças radiais é obtida pelo uso de um número adequado de suportes, que estejam em contado direto com o núcleo e uniformemente espaçados ao redor da circunferência [29].

Um condutor sujeito à forças radiais normalmente é modelado como um anel circular, sujeito a uma carga radial uniformemente distribuída. Neste caso, o valor de estresse crítico é determinado com base na utilização ou não de suportes axiais [25]. Para os casos de enrolamentos desprovidos de estruturas de sustentação axial, ou seja, que não possuem espaçadores axiais para aumentar a resistência aos esforços de compressão, o valor do estresse crítico pode ser calculado pela equação 3.13.

$$\sigma_{crit} = \frac{E \cdot e^2}{4 \cdot R^2} \left[N/m^2 \right] \quad (3.13)$$

sendo:

σ_{crit} : valor do estresse crítico (N/m^2);

E : módulo de elasticidade do material (N/m^2);

e : espessura do condutor (m);

R : raio do enrolamento (m).

De outro lado, a determinação do valor do estresse crítico em enrolamentos providos de suportes axiais, e que sejam causados por esforços de compressão, pode ser realizada pela equação 3.14.

$$\sigma_{crit} = \frac{E(\delta) \cdot (ke^2) \cdot N^2}{12 \cdot D^2} \left[\text{N/m}^2 \right] \quad (3.14)$$

sendo:

$E(\delta)$: módulo de elasticidade incremental no valor crítico (N/m^2);

e : espessura do condutor (m);

k : constante para espessura equivalente;

D : diâmetro do enrolamento (m);

N : número de suportes axiais.

Salienta-se, que enrolamentos internos que estejam sujeitos à forças radiais que possam provocar deformação do tipo “forçada” (ver figura 3.15(b)), necessitam de suportes internos, de maneira a prevenir qualquer movimento do enrolamento para dentro. O estresse nesta situação é função da distância entre os suportes e da dimensão dos condutores, cujo valor é dado pela equação 3.15.

$$\sigma = \frac{F_{rmed} \cdot l^2}{2 \cdot h \cdot e^2} \left[\text{N/m}^2 \right] \quad (3.15)$$

sendo:

σ : estresse crítico do enrolamento (N/m^2);

F_{rmed} : força radial (N/m);

l : distância entre os suportes (m);

h : altura do condutor (m);

e : espessura do condutor (m).

O projeto de enrolamentos, com resistência mecânica suficiente para suportar os estresses de tração, é relativamente mais fácil do que o projeto mecânico do estresse de compressão. Isto decorre do fato que, o estresse de tração é mantido abaixo do limite do escoamento do material condutor [36]. Os enrolamentos internos, por outro lado, necessitam de estruturas de suporte internas para assegurar a sua resistência mecânica (como espaçadores axiais, por exemplo) e podem danificar-se também devido à inclinação dos condutores entre as estruturas de suporte. A técnica para estabelecimento de

critérios de projeto para determinar a resistência mecânica dos enrolamentos internos sujeitos à compressão é complexa e pode variar de fabricante para fabricante.

3.6.3 Tipos de falhas devido a forças axiais

Um dos tipos de falhas devido à ação de forças axiais compressivas, ocorre quando um enrolamento tipo camada não está firmemente enrolado e amarrado, facilitando a transposição do condutor adjacente. Esse efeito pode danificar a isolamento do condutor e, eventualmente, levar a um curto-circuito entre espiras. Um outro tipo de falha ocorre quando um enrolamento vibra sob a ação de forças axiais. Nessa situação, a isolamento do condutor pode danificar-se devido ao movimento relativo entre enrolamento e os espaçadores isolantes localizados axialmente.

Altas forças de compressão axial nas extremidades das bobinas podem causar deformação nas estruturas de fixação (*clamping*) das extremidades dos enrolamentos. Os elementos de fixação têm como função exercer uma pressão efetiva sobre os enrolamentos durante os curtos-circuitos para garantir a resistência às forças axiais.

Adicionalmente, às falhas devido às forças axiais descritas anteriormente, existem outros dois importantes tipos de falhas, a saber: inclinação entre espaçadores radiais (*bending*) e a inclinação dos condutores (*tilting*), os quais são analisados na sequência.

3.6.3.1 - Inclinação de condutores entre espaçadores radiais (*Bending*)

Sob a ação de forças axiais, o condutor de um enrolamento pode inclinar-se entre os espaçadores isolantes localizados radialmente, como ilustra a figura 3.17. Essa inclinação do condutor pode, também, resultar em danos à sua isolamento. Contrariamente ao que se verifica com os esforços devidos às forças radiais, neste caso, a curvatura da deformação se dá num plano vertical e não horizontal como ocorre naquele caso.

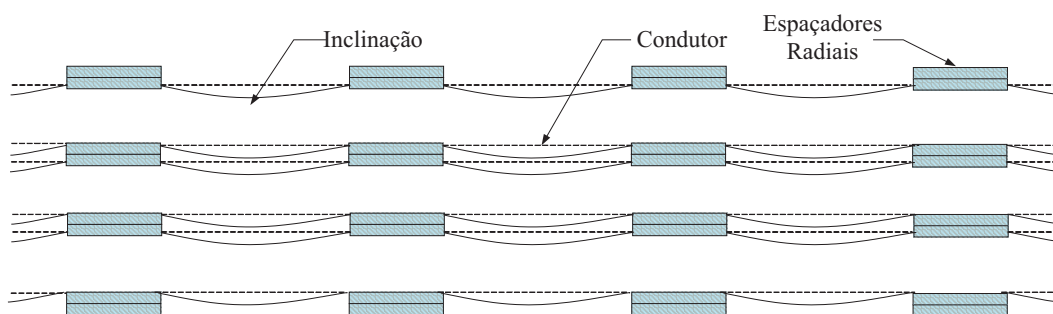


Figura 3.17: Inclinação dos condutores entre espaçadores radiais - vista lateral (*Bending*).

Os estresses relacionados com a inclinação devido às forças axiais podem ser calculados utilizando a equação 3.16 [25].

$$\sigma = \frac{F_a \cdot L^2}{2 \cdot e \cdot h^2} \left[\text{N/m}^2 \right] \quad (3.16)$$

sendo:

F_a : força axial (N/m);

L : distância entre espaçadores axiais (m);

e : dimensão radial do condutor (m);

h : dimensão axial do condutor (m).

O máximo estresse que se verifica no condutor, devido à inclinação, ocorre nos cantos dos espaçadores radiais. O valor máximo do esforço nessa região deve ser menor que o limite suportável pelo tipo de condutor utilizado (cerca de 1.200 kg/cm^2 para o cobre) [36].

3.6.3.2 - Inclinação dos condutores devido à carga axial (*Tilting*)

Este tipo de falha, devido também a ação de forças compressivas axiais, *tilting*, é um dos principais tipos de defeitos em grandes transformadores. Quando essas forças são maiores que a carga limite suportável pelos enrolamentos do equipamento, uma falha pode ocorrer, caracterizando-se pela inclinação dos condutores em forma de zig-zag. A figura 3.18(a) mostra os condutores na posição normal e a figura 3.18(b) ilustra a inclinação dos mesmos condutores deformados devido a ação de forças axiais críticas.

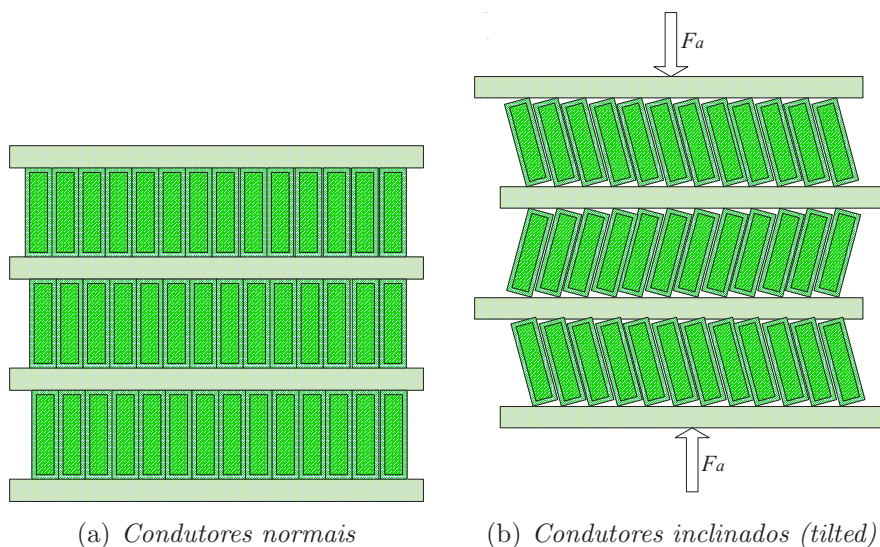


Figura 3.18: Inclinação de condutores devido a forças axiais - seção transversal.

Nota-se na figura 3.18(b) que, devido à força imposta, ocorre um deslocamento da seção transversal dos condutores em torno do eixo de simetria perpendicular.

Esse tipo de inclinação é causado pela compressão axial cumulativa, aplicada aos condutores e que é transmitida através dos espaçadores e estruturas de fixação. A carga crítica que o enrolamento pode tolerar é, portanto, não somente função dos parâmetros do condutor, mas também, da construção do enrolamento, incluindo a isolamento entre condutores [25]. Esta carga crítica pode ser determinada pela equação 3.17.

$$\sigma_{crit} = \frac{E \cdot h^2}{14 \cdot R^2} + \frac{m \cdot s \cdot c \cdot e^2}{12 \cdot \pi \cdot R \cdot h^2} \left[\text{N/m}^2 \right] \quad (3.17)$$

sendo:

E : módulo de elasticidade (N/m^2);

h : dimensão axial do condutor (m);

R : raio do enrolamento (m);

m : número de cunhas;

s : comprimento dos espaçadores;

c : módulo equivalente de elasticidade do papel isolante (N/m^2);

e : dimensão radial do condutor.

Para cabos construídos utilizando a técnica de transposição (*continuously transposed cable*), dois possíveis tipos de falhas são descritos na referência [19]. O primeiro tipo ocorre entre dois cabos adjacentes, que inclinam-se um contra o outro. Este é denominado *cable-wise tilting*. E o segundo, chamado de *strand-wise tilting*, ocorre quando dois fios localizados axialmente ao cabo, inclinam-se um contra o outro.

3.7 Considerações finais

Os objetivos delineados para este capítulo foram concretizados através do estabelecimento, inicialmente, de uma base teórica consistente e bem fundamentada sobre forças eletromagnéticas e estresses mecânicos. Foram abordados os aspectos conceituais e de cálculo relacionados com densidade de fluxo magnético, forças eletromagnéticas e estresses mecânicos atuantes nos enrolamentos de transformadores.

Dando seqüência, os estudos se concentraram na conceituação e caracterização de forças eletromagnéticas e densidade de fluxo magnético de dispersão, tendo em vista os fenômenos compreendidos neste trabalho. A seguir foi feita a conceituação das

forças e densidade de fluxo magnético de dispersão necessários à abordagem analítica das forças, identificando-se as componentes *densidade de fluxo magnético de dispersão radial* e *densidade de fluxo magnético dispersão axial*, responsáveis pelas componentes das *forças axiais* e *forças radiais*, respectivamente. Foi evidenciada a importância do projeto na vida útil de um transformador, que deverá estar apto a suportar os maiores esforços a que possa ser submetido ao longo de sua vida operativa.

Num segundo momento foi apresentada uma metodologia para a realização do cálculo analítico das componentes axiais e radiais da densidade de fluxo magnético de dispersão e das respectivas forças radiais e axiais, resultantes da interação entre as densidades de corrente e de fluxo magnético de dispersão correspondentes. Observa-se que estas grandezas servem como base para o cálculo das forças eletromagnéticas, que são confrontadas com os valores obtidos por métodos numéricos.

Encerra-se o capítulo fazendo uma abordagem dos tipos de estresses mecânicos que surgem nos enrolamentos de transformadores, como resultado das forças eletromagnéticas atuantes. Este tópico teve como finalidade a análise dos principais tipos de falhas que podem ocorrer nas partes estruturais e ativas dos transformadores decorrentes dos esforços mecânicos.

Capítulo 4

Avaliação das Forças Eletromagnéticas em Transformadores Causadas por Curtos-Circuitos Externos Utilizando o MEF

4.1 Considerações iniciais

No capítulo 3 foram abordados métodos analíticos para cálculo de forças eletromagnéticas e os estresses mecânicos decorrentes, nas partes ativas e estruturais de transformadores. Muito embora os cálculos analíticos tenham a sua importância na estimativa de valores, esta estratégia somente conduz a resultados satisfatórios quando aplicadas a dispositivos físicos de geometria simples e homogênea.

A superação das limitações dos métodos analíticos foi conseguida com o surgimento dos métodos numéricos, que se afirmaram como uma alternativa válida, pois permitem a resolução de problemas físicos de geometrias complexas, com contornos de diferentes permissividades. Dentro desta filosofia, os fenômenos como os enfocados nesta tese, podem ser descritos por equações diferenciais parciais, tal como ocorre com os dispositivos eletromagnéticos. A manipulação de equações diferenciais parciais, no entanto, introduz uma complexidade maior nos cálculos, que são contornadas através da utilização de programas computacionais destinados a resolução dos métodos numéricos, como é o caso do Método dos Elementos Finitos (MEF).

Assim sendo, o MEF é uma técnica de análise numérica destinada à obtenção de soluções de problemas regidos por equações diferenciais. Este método, foi desenvolvido originalmente para a análise estática de sistemas estruturais, porém, estendeu-se ra-

pidamente a outros campos do conhecimento, como o da transferência de calor e da mecânica dos fluidos, do eletromagnetismo, das vibrações mecânicas e acústicas, da computação gráfica, da realidade virtual, etc.

Diante do exposto e, uma vez que a geometria de transformadores reais torna de maior complexidade as aproximações analíticas, o MEF constitui-se numa alternativa para tais projetos complexos, pois detalhes e variações construtivas podem ser facilmente incluídas na modelagem deste tipo de dispositivo [43].

O presente capítulo destina-se pois, à apresentação da modelagem de transformadores, utilizando o MEF e também, à análise dos resultados alcançados pelas simulações computacionais realizadas.

Salienta-se que os resultados obtidos por este método, na realidade, são utilizados apenas como balizamento no processo de validação da outra técnica proposta nesta tese e que é objeto de estudo no capítulo seguinte. Não se pretende a inclusão de inovações na estrutura de modelagem utilizada pelo FEMM e na implementação e simulação de dispositivos eletromagnéticos, mas sim, fazer uso de suas facilidades e, sobretudo, da eficácia oferecida por essa técnica numérica de maneira a servir como parâmetro para fins de comparação, conferindo assim uma maior confiabilidade aos resultados almejados.

4.2 Introdução ao método dos elementos finitos

Este item destina-se a oferecer subsídios para uma melhor compreensão do método dos elementos finitos. Para tanto, na seqüência é feita uma abordagem dos conceitos principais empregados por esta técnica numérica.

O método dos elementos finitos objetiva a obtenção de uma formulação que permita a análise de sistemas complexos e/ou irregulares, por intermédio de programas computacionais, de forma automática. Para atingir tal objetivo, o método considera o sistema global como sendo equivalente a um agrupamento de elementos finitos, no qual cada um destes é uma estrutura contínua mais simples.

Apesar do método dos elementos finitos considerar os elementos individuais como contínuos é, na sua essência, um procedimento de *discretização*, que visa transformar um problema infinito-dimensional em finito-dimensional, ou seja, num sistema com um número finito de incógnitas.

A resolução do problema consiste em discretizar ou decompor o domínio sob estudo

em pequenos sub-domínios chamados de “*elementos finitos*” que são conectados entre si por meio de pontos discretos, denominados “*nós*” [44]. O conjunto de elementos utilizados na discretização é denominado *malha*. Uma vez que a *malha* e seus respectivos *nós* são obtidos, soluções aproximadas podem ser introduzidas para as variáveis de campo dependentes no interior de cada elemento. Essas variáveis são expressas como funções arbitrárias dos valores que as incógnitas assumem nos *nós*, e são chamadas de *funções de interpolação*. Também são impostas condições para garantir a continuidade da solução nos *nós* compartilhados por vários elementos. As incógnitas do problema, que são denominadas *graus de liberdade* (g.d.l.), passam a ser os valores das variáveis de campo nos pontos nodais, sendo que o número de graus de liberdade (agora finito) é dependente da ordem, do número de elementos e também do número de variáveis dependentes. Dependendo da natureza do problema, após a discretização, o modelo matemático regente é representado por um número finito de equações diferenciais ordinárias ou de equações algébricas, cuja resolução numérica conduz aos valores das incógnitas nodais. Uma vez determinadas estas incógnitas, os valores das variáveis de campo no interior dos elementos podem ser avaliados empregando-se funções de interpolação.

O método dos elementos finitos não fornece, em princípio, soluções exatas. No entanto, admite-se que à medida que mais e mais elementos são usados na modelagem, a solução obtida para o problema discretizado, convirja para uma solução precisa do problema contínuo.

A principal exigência para se modelar geometrias mais complexas é manter a dimensão da malha em um nível razoável, de modo que o problema possa ser resolvido. A utilização de uma simetria axial em 2D é dependente unicamente de uma variável (o potencial vetor magnético A), enquanto que, soluções em 3D requerem três variáveis dependentes (ou seja, campo magnético em todas as direções H_x , H_y e H_z).

A implementação da técnica de elementos finitos é, em geral, realizada através da utilização do método variacional ou do método de Galerkin (resíduos ponderados). O método variacional fundamenta-se no princípio da minimização da energia associada ao campo elétrico presente no domínio de cálculo. O método de Galerkin é utilizado para a resolução de problemas mais complexos, onde a busca por um funcional energético torna-se mais complicada. Ao contrário do método variacional, a formulação numérica para resolução dos problemas é obtida diretamente da equação que define o fenômeno

físico.

As vantagens principais associadas à utilização do MEF em relação a outras técnicas numéricas estão descritas a seguir.

- elementos de diferentes formas e tamanhos podem ser associados para discretizar domínios de geometria complexa, uma vez que a sua formulação depende somente da classe do problema e é independente de geometria [36];
- a divisão do domínio em regiões onde as propriedades físicas variam em função das coordenadas espaciais facilita a modelagem de problemas envolvendo domínios não homogêneos. O MEF também pode levar em conta, facilmente, a descon-tinuidade do material;
- o método pode ser todo formulado matricialmente, facilitando sua implementação computacional.

O MEF possui um pacote denominado *Finite Element Method Magnetics* (FEMM) cuja função é a resolução de problemas eletromagnéticos. Como tal, esse programa atende a todos os procedimentos descritos para o MEF. Assim sendo, como o estudo em tela trata de um dispositivo eletromagnético, optou-se pela utilização desse programa para dar prosseguimento aos desenvolvimentos.

4.3 Estrutura de funcionamento do *Finite Element Method Magnetics*

O FEMM ou Método de Elementos Finitos Magnéticos é um programa livre que proporciona um completo conjunto de ferramentas para resolver problemas estáticos e de baixa frequência ou problemas axissimétricos em eletrodinâmica, no domínio 2D. É um programa útil porque manipula internamente complicadas equações diferenciais que necessitam ser resolvidas quando se trabalha com magnetismo.

Como qualquer outro pacote típico de Elementos Finitos, a resolução de problemas físicos utilizando o FEMM é dividido nas três etapas descritas a seguir:

Pré-processamento: consiste na definição da estrutura que permite des-crever a geometria do problema, as propriedades físicas dos materiais, a densidade das malhas e as condições de contorno. A malha de elementos finitos pode ser criada e visualizada nesta fase.

Processamento: esta etapa consiste na interpretação das informações definidas durante a etapa de pré-processamento e na aplicação das equações de Maxwell pertinentes à resolução do problema, através da montagem de um sistema de equações diferenciais que descrevem o comportamento da estrutura sob análise.

Pós-processamento: trata-se de um programa gráfico que disponibiliza os resultados sob a forma de contornos e densidades. O usuário pode inspecionar a solução pontualmente, plotar resultados de interesse na forma de gráficos e calcular certas integrais.

A etapa de processamento emprega um conjunto de equações desenvolvidas por James Maxwell, as quais proporcionam uma descrição completa e unificada de todos os fenômenos eletromagnéticos. Essa descrição é baseada nos trabalhos de Gauss, Ampère, Faraday e Lenz. A contribuição de Maxwell propriamente dita, está no conceito das “*correntes de deslocamento*” que generaliza a lei de Ampère para incluir os fenômenos que envolvem altas frequências.

Fundamentalmente, a formulação do FEMM utiliza os potenciais V e $\vec{A}$ para a resolução de problemas eletrostáticos e magnetostático, fazendo uso do fato de que a equação diferencial parcial de Poisson (4.1) é satisfeita quando a função energia magnética total é minimizada. Outra importante consideração diz respeito à densidade de fluxo dentro de cada elemento resultante da divisão da geometria, a qual deve ser assumida constante, de modo que o potencial vetor magnético varie linearmente dentro de cada elemento. Para se obter melhor precisão, considera-se que o potencial vetor varia como um polinômio de grau superior a 1.

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = -\sigma \frac{\partial}{\partial t} \vec{A} + \vec{J}_d - \sigma \vec{\nabla} V \quad (4.1)$$

sendo:

$\vec{B}$: densidade de fluxo magnético ($Wb.m^{-2}$);

$\vec{A}$: potencial vetor magnético ($Wb.m^{-1}$);

$\vec{J}_d$: densidade de corrente de deslocamento (A/m^2);

σ : condutividade elétrica do material ($S.m^{-1}$);

$\vec{\nabla} \times \vec{A}$: rotacional de $\vec{A}$;

$\vec{\nabla} V$: gradiente do potencial elétrico.

Para aplicações em baixas frequências desconsidera-se a densidade de corrente de deslocamento $\vec{J}_d$, uma vez que, por definição, problemas em baixa frequência se caracterizam por desprezar estas correntes [45].

4.4 Interação entre grandezas eletromagnéticas

A interação entre grandezas eletromagnéticas e mecânicas presentes em dispositivos eletromagnéticos é uma operação que exige cuidado e deve ser abordada com prudência. Não existe um tratamento global que possa, de maneira simples, definir de forma única essa interação. Assim sendo, para cada tipo de dispositivo existe uma maneira conveniente de abordar o problema. Dentro do contexto desta proposta de tese, qual seja, cálculo de forças e estresses mecânicos, o FEMM utiliza dois recursos para efetuar o cálculo das grandezas mecânicas e eletromagnéticas que atuam sobre os enrolamentos de transformadores, a saber: um método designado no programa por “Força de Lorentz” e outro denominado “Tensor de Maxwell”. Ambos métodos são descritos na sequência.

A lei da força de Lorentz afirma que a força por unidade de volume, que um campo eletromagnético exerce sobre uma densidade volumétrica de carga e uma densidade superficial de corrente, é dada pela equação 4.2.

$$\vec{f} = \rho \vec{E} + \vec{J} \times \vec{B} \quad (4.2)$$

sendo:

- $\vec{f}$: densidade volumétrica de força (N/m^3);
- ρ_v : densidade volumétrica de carga (C/m^3);
- $\vec{E}$: vetor campo elétrico (V/m);
- $\vec{J}$: densidade superficial de corrente (A/m^2);

A primeira parcela do lado direito da equação 4.2 é chamada de densidade volumétrica de força elétrica e a segunda é a densidade volumétrica de força magnética. Assim, a força magnética que é a grandeza de interesse é um caso particular da força de Lorentz e é definida como a força por unidade de volume que o campo eletromagnético exerce sobre uma densidade volumétrica de corrente [45], cuja amplitude é dada pela equação 4.3.

$$\vec{F} = \int \vec{J} \times \vec{B} dV \quad (4.3)$$

sendo:

- $\vec{F}$: força magnética total;
- dV : elemento diferencial de volume.

Para a determinação das forças magnéticas em domínios físicos compostos por materiais que possuem permeabilidade relativa unitária, como por exemplo as bobinas de um transformador, o pacote FEMM dispõe de um bloco específico denominada “Força de Lorentz”.

O “Tensor de Maxwell” é uma outra maneira de se determinar a força por unidade de área produzida pelo campo magnético sobre uma superfície. A expressão do “Tensor de Maxwell” é obtida a partir da equação da força de Lorentz mostrada anteriormente onde manipulações são efetuadas através das equações de Maxwell para eliminar ρ e $\vec{J}$ em favor dos campos. Assim, a parcela do Tensor de Maxwell relativa ao cálculo das forças magnéticas é dada pela expressão 4.4.

$$d\vec{F} = \frac{1}{2} \left(\vec{H} \left(\vec{B} \cdot \vec{u} \right) + \vec{B} \left(\vec{H} \cdot \vec{u} \right) - \left(\vec{H} \cdot \vec{B} \right) \vec{u} \right) \quad (4.4)$$

sendo:

- $d\vec{F}$: elemento diferencial de força;
- $\vec{u}$: vetor unitário à superfície, no ponto de interesse.

O FEMM utiliza a equação 4.4 para calcular a força magnética líquida em um objeto, criando uma superfície que envolve totalmente a área de interesse do objeto e, integrando a força magnética sobre esta superfície. Ressalta-se que, os cálculos obtidos da integração de contornos que englobam interface entre dois materiais de permissividades diferentes, conduzem a resultados errôneos. Contudo, resultados condizentes são alcançados quando os contornos escolhidos envolverem o corpo de interesse e o ar ou regiões com permeabilidade constante.

4.5 Modelagem de transformadores reais

Os principais passos para estruturação e análise dos problemas eletromagnéticos foram descritos anteriormente. Entretanto, é oportuno que se descreva mais detalhada-

mente algumas etapas para a montagem e resolução do problema de um transformador.

Basicamente, os procedimentos para o estudo de transformadores consistem nas etapas seguintes:

1. **Criação da geometria:** geometrias simples podem ser traçadas utilizando as ferramentas de desenho do próprio FEMM. Geometrias mais complexas, por outro lado, podem ser importadas de ferramentas apropriadas para desenho, como por exemplo, o AUTOCAD. Estruturas bidimensionais, podem ser resolvidas em sistemas de coordenadas cartesianas ou axissimétricas. Os transformadores são estruturas eletromagnéticas tridimensionais. Assim sendo, a utilização de sistemas em duas dimensões torna necessária a introdução de aproximações nos modelos, que, contudo, conduzem a resultados suficientemente precisos.
2. **Criação de malhas:** este passo envolve a divisão da geometria em pequenos elementos, como já mencionado. Para que a solução do problema seja mais precisa, existe a necessidade de um refinamento das malhas em regiões onde exista uma apreciável variação dos valores de densidade de fluxo, do equipamento sob análise. Estas malhas devem ser refinadas até que não mais ocorram variações consideráveis na densidade de fluxo em qualquer ponto.
3. **Propriedades dos materiais:** o núcleo é definido com uma permeabilidade relativa (μ_r) da ordem de algumas dezenas de milhares. Outras partes são definidas com μ_r igual a 1. Para estudos onde as correntes parasitas podem ser desprezadas, a condutividade não precisa ser definida.
4. **Definição das fontes de corrente:** nesta etapa, a densidade de ampère-espiras de cada enrolamento/seção deve ser definida.
5. **Condições de contorno:** dois tipos de condições de contorno são definidas: Dirichlet e Neumann. A condição de contorno na qual o potencial é definido é chamada condição de Dirichlet. A condição na qual a derivada normal do potencial é definida, é chamada condição de Neumann. Neste caso, as linhas de fluxo são ortogonais a essas fronteiras. Em um contorno para o qual a condição de Dirichlet não é definida, a condição de Neumann é automaticamente fixada. Se o núcleo não é modelado, o potencial vetor magnético deverá ser definido na fronteira *efgh*.

6. Solução: esta etapa consiste na representação matricial de cada elemento, formação da matriz de coeficientes global e na imposição das condições de contorno. Contudo, esta fase é realizada internamente, pelo próprio *software*.

7. Pós-processamento: consiste na disponibilização dos resultados gráficos e numéricos para as análises pertinentes, como mencionado anteriormente.

Os enrolamentos são modelados como blocos triangulares. Entretanto, caso exista uma distribuição não uniforme de ampère-espiras, os enrolamentos deverão ser divididos em seções adequadas, de modo que a distribuição da força magnetomotriz seja uniforme em cada seção.

4.6 Resultados das simulações no FEMM

Este item destina-se a apresentar e discutir os principais resultados oriundos das simulações computacionais com os transformadores de potência e de distribuição enfiados.

O FEMM foi utilizado para implementar dois transformadores, sendo um de distribuição (15 kVA) e outro de potência (100 MVA). Para avaliar o desempenho dos modelos implementados e verificar a eficácia do FEMM foram efetuadas simulações nos modelos sob situações normais de funcionamento, bem como sob condições adversas. As condições operativas dos transformadores sob estudo, para os casos simulados, estão descritas na tabela a seguir.

Tabela 4.1: *Estudos computacionais - FEMM*

Caso	Descrição dos casos	
Caso A	Simulações com o transformador sob carga nominal operando em regime permanente	15kVA
		100MVA
Caso B	Simulações com o transformador operando durante uma situação transitória de curto-circuito trifásico	15kVA
		100MVA
Caso C	Simulações com o transformador operando sob novo arranjo de tap's submetido a um curto-circuito trifásico	15kVA

Os estudos do caso C são realizados somente com o transformador de 15 kVA e tem como objetivo ilustrar a influência da inserção de derivações (tap's) no desempenho dos esforços eletromecânicos. Maiores detalhes são oferecidos oportunamente.

4.6.1 Características do transformador de 15 kVA

Um transformador trifásico de 15 kVA e com relação de tensão de 220/220V foi implementado e simulado no FEMM para se analisar o desempenho elétrico, magnético e mecânico do dispositivo. O transformador possui três colunas, é do tipo núcleo envolvido e com dois enrolamentos por fase. Para efetuar a modelagem utilizando o FEMM, o equipamento foi dividido em quatro regiões, conforme descrito a seguir, em função de suas características elétricas e magnéticas [7].

- (1) Núcleo ferromagnético ($\mu \neq \text{constante}$ e $J=0$);
- (2) Enrolamentos ($\mu=0$ e $J \neq 0$);
- (3) Janela do transformador ($\mu=1$ e $J=0$) e;
- (4) Tanque do transformador.

Como dado adicional, considerou-se, ainda, que as correntes são igualmente distribuídas ao longo da seção reta dos condutores.

Salienta-se que a implementação computacional utilizando o método dos elementos finitos, exige o conhecimento da geometria e características elétricas e magnéticas do dispositivo, para a completa caracterização do equipamento. Nesse sentido, apresenta-se na tabela 4.2 as principais características geométricas, elétricas e magnéticas do transformador em estudo.

Tabela 4.2: *Características do transformador trifásico de 15 kVA*

Potência do trafo [kVA]	15	
Número de fases	3	
Impedância percentual	3,47%	
Perdas no ferro [W]	87,55	
Frequência [Hz]	60	
	Enrolamento externo	Enrolamento interno
Tensão [V]	220	220
Dimensão cobre [mm ²]	3,5x4,5	3,5x4,5
Densidade corrente [A/mm ²]	2,58	2,58
Número de espiras	66	66
Perdas nos enrolamentos [W]	190	132
Resistência enrolamentos [Ω]	0,040	0,029
Diâmetro externo [m]	151x10 ⁻³	106x10 ⁻³
Diâmetro interno [m]	132x10 ⁻³	87x10 ⁻³
	Coluna	Culatra
Área aparente [m ²]	49,996x10 ⁻⁴	52,826x10 ⁻⁴
Área líquida [m ²]	47,496x10 ⁻⁴	50,185x10 ⁻⁴
Largura [m]	80x10 ⁻³	66x10 ⁻³
Densidade de fluxo magnético [T]	1,55	1,44

A figura 4.1 mostra uma vista superior do transformador utilizado, detalhando os enrolamentos interno e externo, o núcleo de ferro e suas principais dimensões. Complementarmente, a figura 4.2 ilustra as vistas frontal e lateral do núcleo de ferro do transformador. A figura 4.2(a) exibe o comprimento médio do caminho do fluxo magnético no núcleo (linha tracejada).

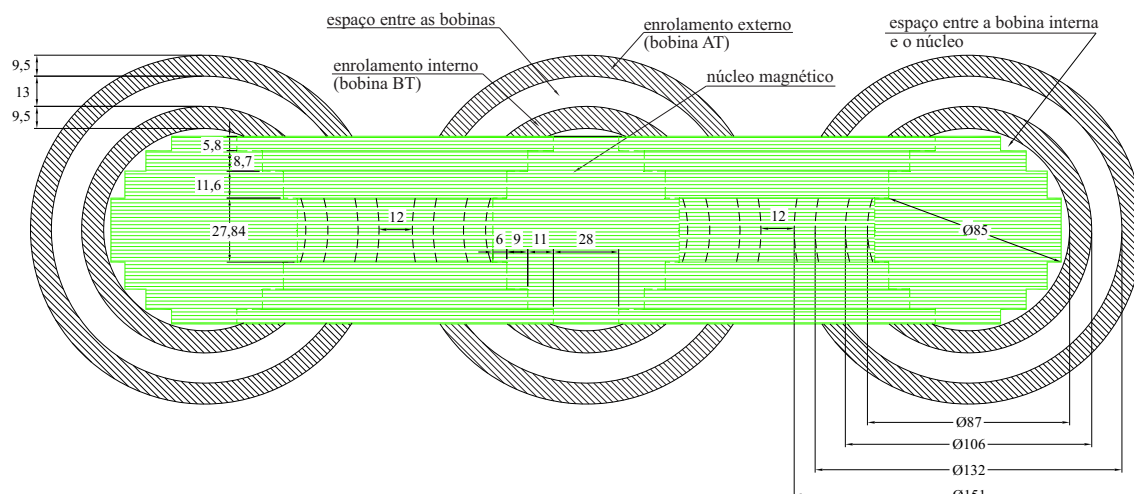


Figura 4.1: *Vista superior do transformador trifásico (dimensões em mm).*

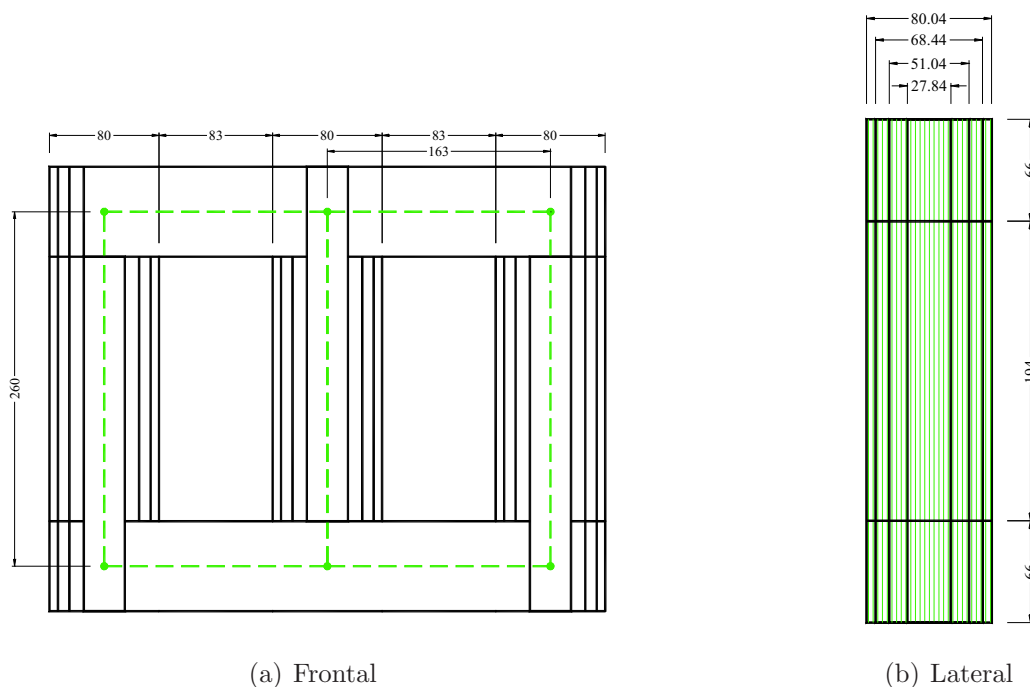


Figura 4.2: *Vistas frontal e lateral do núcleo do transformador utilizado.*

A figura 4.3 mostra a correspondente curva de magnetização da chapa de aço silício utilizada no núcleo do transformador sob estudo.

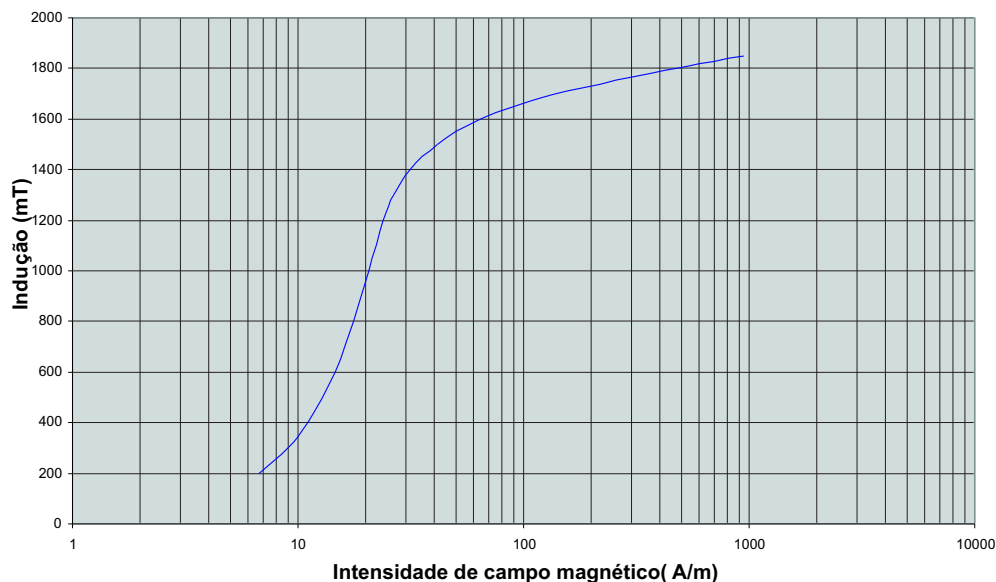


Figura 4.3: Características de magnetização da chapa de aço silício do transformador.

A tabela 4.3 apresenta alguns pontos representativos da curva de magnetização anteriormente exibida.

Tabela 4.3: Pontos específicos da curva B-H da figura 4.3

Indução magnética [B] (T)	Intensidade de fluxo magnético [H] (A.esp/m)
0,20	8,4328
0,30	10,8990
0,40	12,9674
0,50	14,9165
0,60	16,7064
0,70	18,4964
0,72	18,6953
0,76	19,5704
0,8	20,2864
0,90	21,6786
1,00	22,8719
1,10	24,2641
1,20	26,4121
1,30	30,2307
1,40	36,1973
1,44	39,2999
1,50	46,9372
1,52	50,1193
1,60	76,3723
1,70	159,1090
1,80	572,7924
1,86	1431,9810
1,98	7955,4500

Uma vez identificado o transformador, a seguir, são descritos e discutidos os resultados obtidos das simulações. Vale ressaltar que, todos os casos foram simulados em regime quase-estacionário, ou seja, quando a corrente em uma das fases atinge o seu valor máximo.

4.6.1.1 Resultados das simulações do transformador de 15 kVA

Os casos selecionados para apresentação, em conformidade com a tabela 4.1, para o transformador de 15 kVA, encontram-se descritos e analisados a seguir.

- **Caso A:** Simulações com o transformador sob carga nominal operando em regime permanente

Como dados de entrada para as simulações deste primeiro caso foi utilizado um conjunto de correntes trifásicas equilibradas, determinadas de acordo com dados de placa do transformador. O valor de pico nominal obtido para as correntes trifásicas é igual a 55,7 A.

A malha de elementos finitos gerada para a estrutura do transformador em estudo está mostrada na figura 4.4.

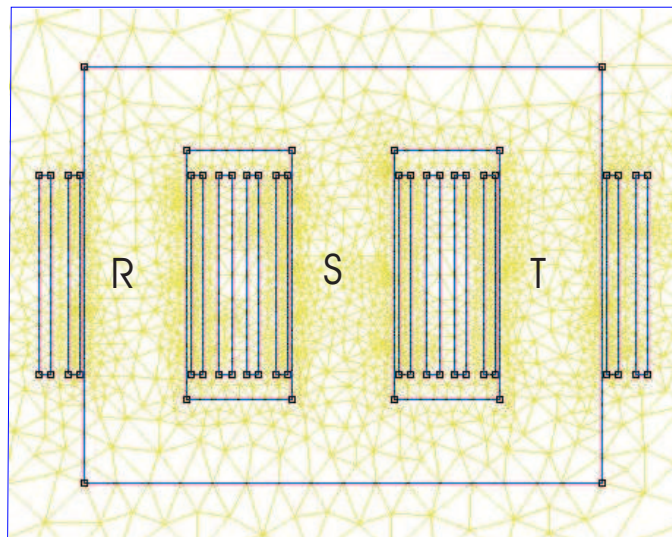


Figura 4.4: *Malha de elementos finitos bidimensional do transformador de 15 kVA.*

A figura 4.5 ilustra a curva de magnetização da chapa de aço silício do transformador, gerada pelo FEMM, a partir dos pontos obtidos da curva de magnetização fornecida pelo fabricante.

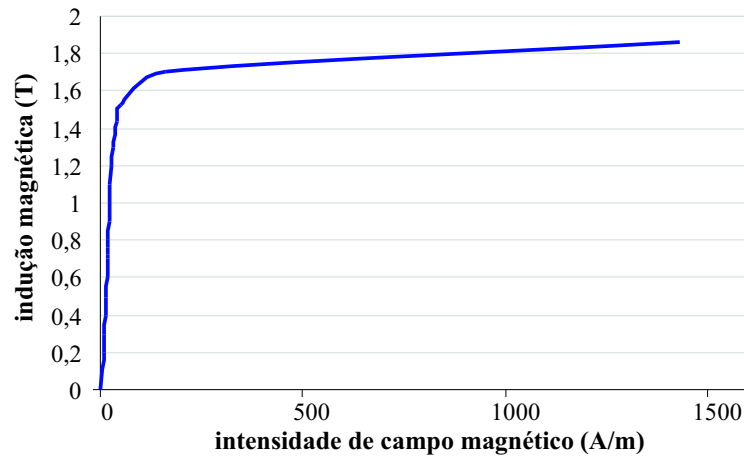


Figura 4.5: *Curva de magnetização do transformador sob estudo.*

Para exemplificar o funcionamento do programa, a figura 4.6 ilustra a distribuição da densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador para a condição normal de regime permanente, para o instante quando o fluxo magnético é máximo na fase central.

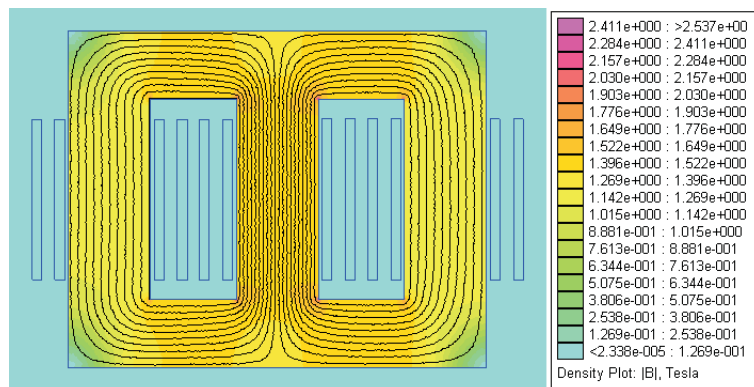


Figura 4.6: *Densidade de fluxo magnético no núcleo: condição nominal.*

Para apresentação neste trabalho, foram seleccionadas as simulações nos instantes em que a corrente apresenta valor máximo na fase central. Nessas condições, a densidade de fluxo magnético no núcleo é de 1,5 T e nas culatras 1,4 T. Destaca-se, que os valores alcançados estão bastante próximos aos constantes na tabela 4.2, fornecidos pelo fabricante do equipamento.

É importante salientar, que as simulações para a condição de operação em vazio do transformador não são mostradas neste documento, por tratar-se de uma situação que não apresenta relevância para o tipo de análise enfocado nesta tese. No entanto, registra-se, que tal condição operativa foi simulada e que os resultados obtidos mostraram uma boa correlação com aqueles obtidos através do método analítico. Destaca-se, as distribuições de fluxo no núcleo para a condição nominal, as quais são

semelhantes, tanto qualitativa quanto quantitativamente, às verificadas para o caso a vazio.

A figura 4.7 ilustra a variação da densidade de fluxo magnético de dispersão em função da altura dos enrolamentos externos.

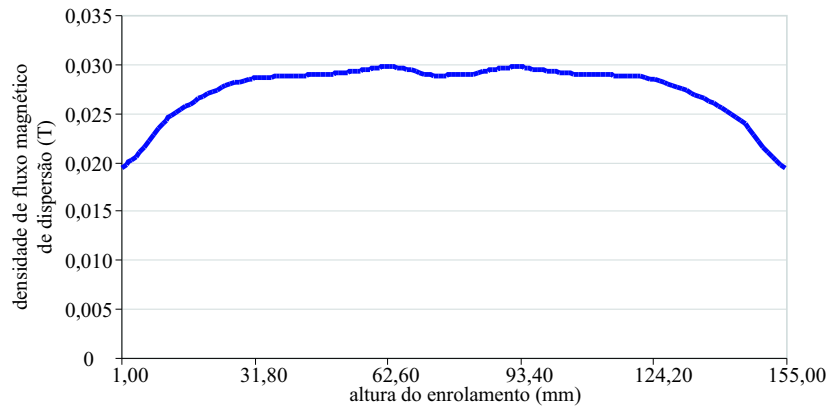


Figura 4.7: *Densidade de fluxo magnético de dispersão em função da altura do enrolamento: condição nominal.*

Observar-se que a densidade de fluxo magnético de dispersão é praticamente constante ao longo da altura dos enrolamentos, sofrendo uma variação nas extremidades superior e inferior. Para esta condição operacional, o valor de pico encontrado é igual a 29 mT na região próxima ao centro dos enrolamentos.

As forças radiais e axiais, determinadas de acordo com a equação 4.3 da “Força de Lorentz”, estão mostradas nas figuras 4.8 e 4.9, para os enrolamentos externo e interno, respectivamente. O desempenho das forças eletromagnéticas para condição nominal que são mostradas neste ponto, são utilizadas como referência para fins de comparação com os outros casos estudados, e que são descritos na seqüência.

Para a presente condição operativa, a força radial agindo no enrolamento externo da figura 4.8, calculada pelo FEMM, atinge um valor de 6,89 N, enquanto que a força axial apresenta um valor praticamente nulo. Já o enrolamento interno da figura 4.9 experimenta uma força radial de 5,73 N, e a força axial praticamente inexistente. Naturalmente, como era de se esperar para esta condição operativa, os valores obtidos para as forças radiais e axiais são de pequena significação para os dois enrolamentos concêntricos, notadamente para as forças axiais.

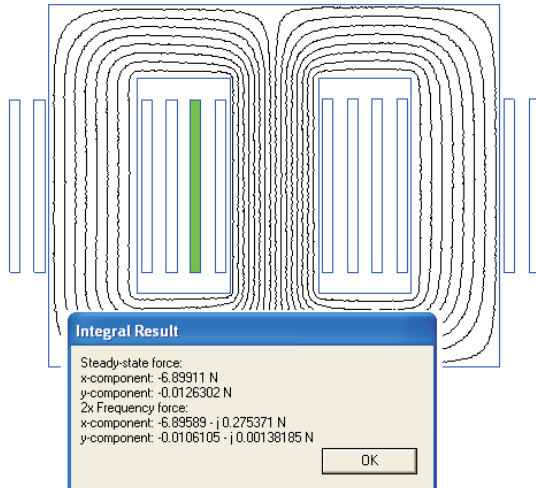


Figura 4.8: Forças axial e radial no enrolamento externo: condição nominal.

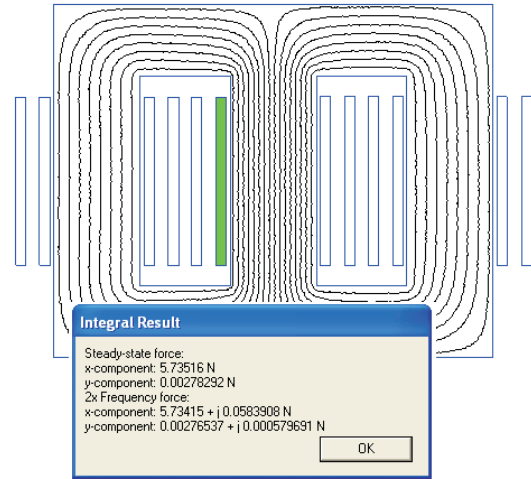


Figura 4.9: Forças axial e radial no enrolamento interno: condição nominal.

Deve-se esclarecer que, embora o programa ofereça a possibilidade de determinação das forças nas três fases, optou-se por apresentar, tão somente, os resultados obtidos pelos enrolamentos da fase que experimenta o maior esforço em um determinado instante, por se considerar que estas análises são suficientes para proceder com as investigações propostas para esta fase da tese.

- **Caso B:** Simulações com o transformador operando durante uma situação transitória de curto-circuito

Este caso retrata os estudos computacionais do transformador quando submetido a um curto-circuito trifásico externo, ou como definido anteriormente, curtos-circuitos “passantes”. Para a simulação deste caso, utilizou-se um valor de pico de corrente de curto-circuito igual a 2558 A, calculada de acordo com a equação 2.1, utilizando-se um fator de assimetria de 1,6. A figura 4.10 ilustra a distribuição da densidade de fluxo magnético do transformador, perante esta nova condição operativa.

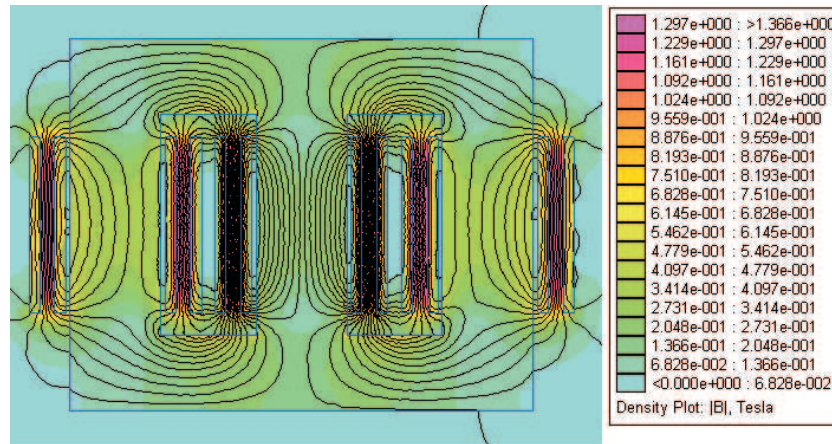


Figura 4.10: *Densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador: curto-circuito.*

Nota-se na figura 4.10, que a distribuição de fluxo magnético no interior do transformador sofre alteração do seu caminho preferencial (núcleo magnético), passando a circular quase que totalmente pelo ar. Este fato também é corroborado pela figura 4.11, a qual ilustra o aumento significativo ocorrido na densidade de fluxo de dispersão, comparativamente ao caso nominal. O valor de pico obtido para esta grandeza para condição de curto-circuito é de aproximadamente 1,36 T, contra os 29 mT da condição nominal. Por outro lado, a densidade de fluxo magnético no núcleo magnético experimenta uma sensível redução, alcançando um valor da ordem de 0,3 T, evidenciando, mais uma vez, que a maior parte do fluxo praticamente se fecha pelo ar.

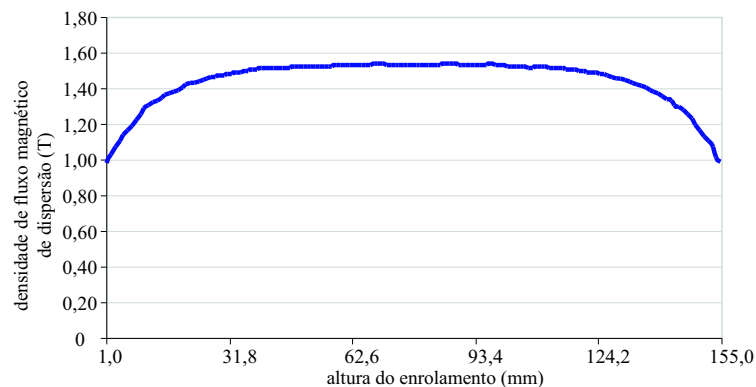


Figura 4.11: *Densidade de fluxo magnético de dispersão em função da altura do enrolamento: curto-circuito.*

As figuras 4.12 e 4.13 ilustram as forças eletromagnéticas radiais e axiais, nos enrolamentos externo e interno, correspondentes às condições anteriormente descritas.

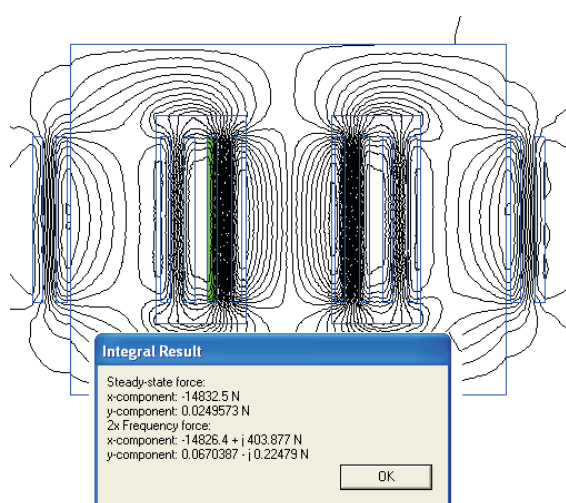


Figura 4.12: Forças axial e radial no enrolamento externo: curto-circuito.

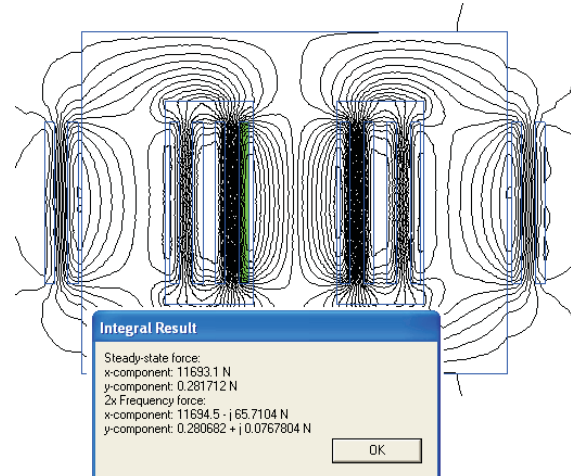


Figura 4.13: Forças axial e radial no enrolamento interno: curto-circuito.

Observa-se que, devido ao aumento da corrente elétrica e do fluxo de dispersão ocorre um acentuado aumento das forças eletromagnéticas, em relação ao caso nominal. Os valores obtidos para as forças radiais e axiais no enrolamento externo foram de aproximadamente 14,832 kN e 0,02 N, respectivamente. A intensidade da força radial do enrolamento interno é cerca de 11,693 kN e da força axial é 0,28 N.

- **Caso C:** Simulações com o transformador operando sob novo arranjo de tap's submetido a um curto-circuito trifásico

Esta situação corresponde a uma condição semelhante àquela mostrada no caso anterior, diferenciando-se pela inclusão de uma seção de tap's no enrolamento externo. A utilização de tap's, como mencionado anteriormente, provoca um desbalanço de forças magnetomotrizes dos enrolamentos. Todavia, salienta-se que os projetos desenvolvidos para este tipo de arranjo são executados de tal forma a manter o equilíbrio das fmms e também procurando minimizar o efeito das forças através do re-arranjo das derivações.

Dessa forma, a apresentação deste caso tem um caráter sobretudo ilustrativo, cujo propósito é o de investigar a influência desta nova configuração dos enrolamentos na distribuição do fluxo de dispersão e conseqüentemente, sobre as forças eletromagnéticas internas atuantes no dispositivo, preservando, no entanto, o equilíbrio entre as forças magnetomotrizes.

A figura 4.14 mostra o desempenho do fluxo magnético do transformador, com uma seção de tap's central no enrolamento externo e operando sob a condição de curto-circuito.

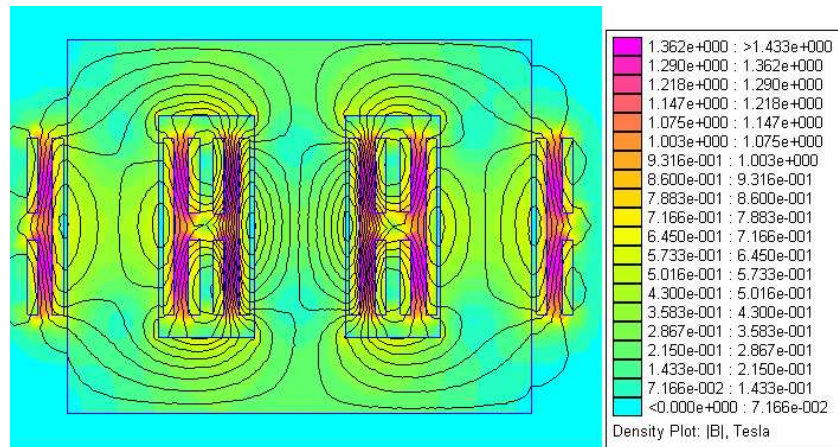


Figura 4.14: *Densidade de fluxo magnético para transformador com tap's central.*

Observa-se que o comportamento da densidade de fluxo magnético apresenta-se semelhante ao caso B, com a densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador permanecendo com um valor aproximado de 0,3 T. Entretanto, devido à derivação, ocorre uma alteração da direção da densidade de fluxo de dispersão, como mostra a figura 4.15. Esta ilustração mostra a variação sofrida pela densidade de fluxo magnético de dispersão ao longo da altura do enrolamento externo.

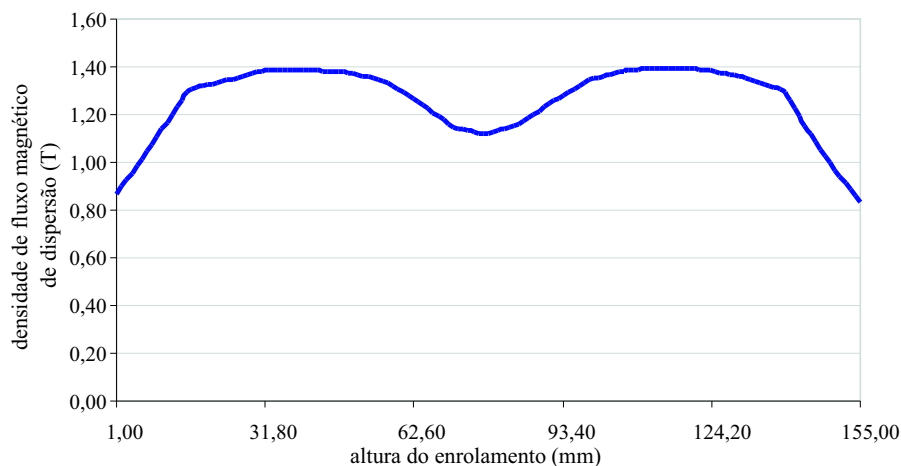


Figura 4.15: *Densidade de fluxo magnético de dispersão em função da altura do enrolamento com tap's.*

A figura 4.15, torna evidente a alteração do fluxo de dispersão na região próxima ao tap's, que causa uma concentração do fluxo nas espiras imediatamente adjacentes à derivação. O valor máximo calculado para a densidade de fluxo magnético de dispersão para este caso é de 1,4 T.

Naturalmente, a variação do fluxo magnético de dispersão tem como consequência aumentos substanciais das componentes axiais das forças eletromagnéticas dos dois enrolamentos, como pode ser observado nas figuras 4.16 e 4.17. Numericamente, para o enrolamento externo, os valores encontrados para as forças radiais e axiais foram, respectivamente, 13,3 kN e 49,49 N, enquanto que, para o enrolamento interno as mesmas grandezas foram estimadas em 11,66 kN e 33,19 N.

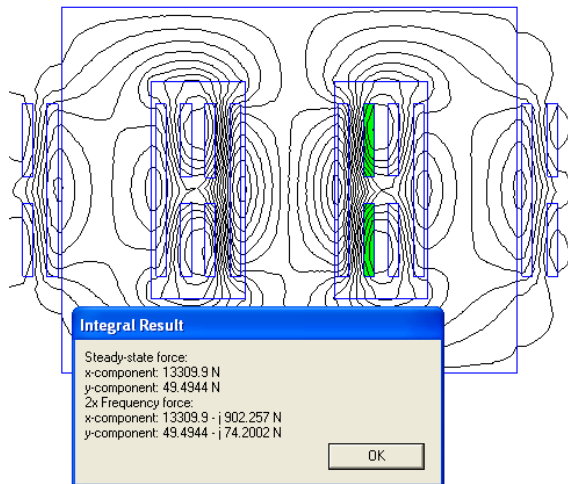


Figura 4.16: *Forças radial e axial no enrolamento externo com tap's.*

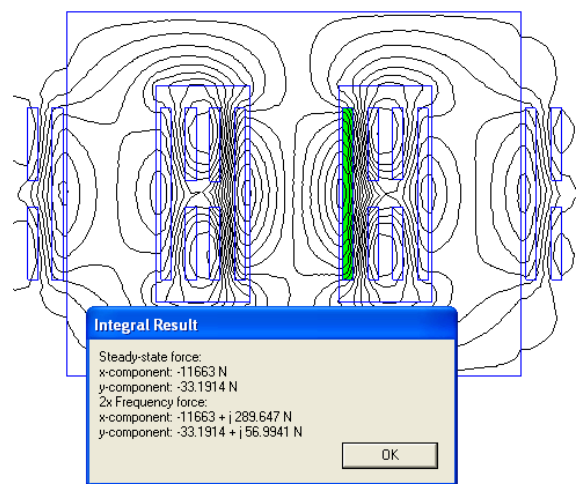


Figura 4.17: *Forças radial e axial no enrolamento interno com tap's.*

Os resultados atingidos, como poderia ser previsto, mostram que a maior variação ocorre com a componente da densidade de fluxo de dispersão radial o que provoca um acréscimo substancial da componente axial da força, tanto no enrolamento externo quanto no interno.

4.6.2 Características do transformador de 100 MVA

O transformador de 100 MVA utilizado para os estudos realizados nesta fase dos trabalhos é do tipo trifásico, com quatro enrolamentos por fase, cujas principais características físicas, construtivas e elétricas estão mostradas na tabela 4.4.

Tabela 4.4: *Características do transformador trifásico de 100 MVA*

Potência do trafo [MVA]	100			
Número de fases	3			
Impedância percentual	9,32%			
Perdas no ferro [kW]	53			
Frequência [Hz]	60			
Tensão [kV]	Enrolamento de Alta Tensão		Enrolamento de Baixa Tensão	
	230		138	
Enrolamentos	2	4	1	3
Número de espiras	756	64	394	98
Resistência [Ω]	0,68	0,06	0,13	0,04
Raio interno [mm]	556	755	409	705
Raio externo [mm]	645	787	494	730
		Coluna	Culatra	
Área [m^2]	0,38		0,38	
Densidade de fluxo magnético [T]	1,61		1,61	

A figura 4.18 mostra a disposição dos enrolamentos do dispositivo, para cada uma das fases e, complementarmente, cujas dimensões foram estão apresentados na tabela 4.4, ilustrada anteriormente.

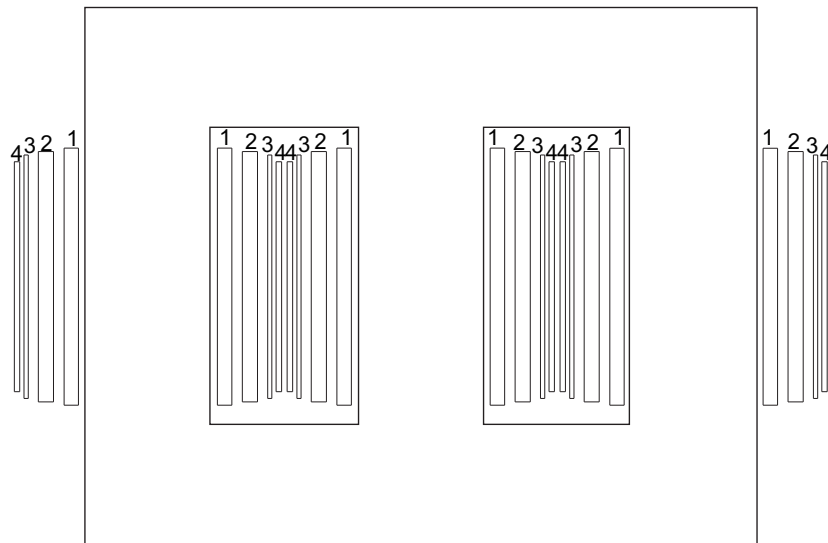


Figura 4.18: *Disposição dos enrolamentos do transformador de potência utilizado nas simulações.*

O enrolamento de 138 kV é formado por duas bobinas ligadas em série (1 e 3), enquanto que o enrolamento de 230 kV é constituído pelas bobinas 2 e 4, também conectadas em série. O enrolamento 3 é acessível somente nos testes em fábrica, por meio dos quais são feitos os ensaios em vazio e de perdas do transformador. O enrolamento 4 corresponde a bobina de derivação (tap's) [46].

A figura 4.19 indica a constituição física/geométrica do núcleo trifásico do trans-

formador.

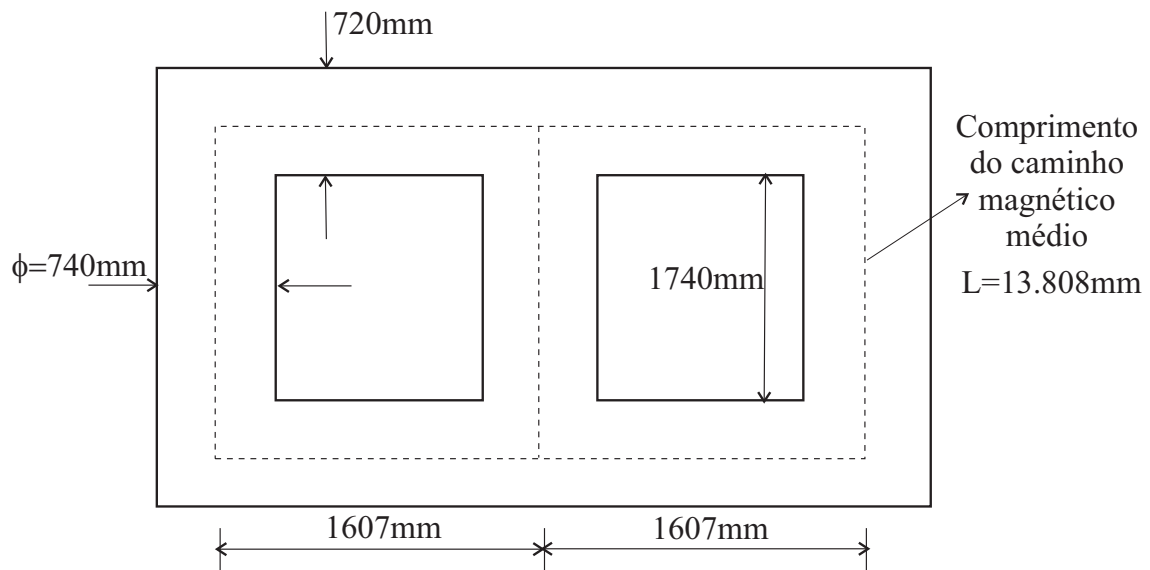


Figura 4.19: Dimensões do núcleo trifásico do transformador.

A característica magnética da chapa de aço silício utilizada na montagem do núcleo do transformador de 100 MVA está mostrada na figura 4.20.

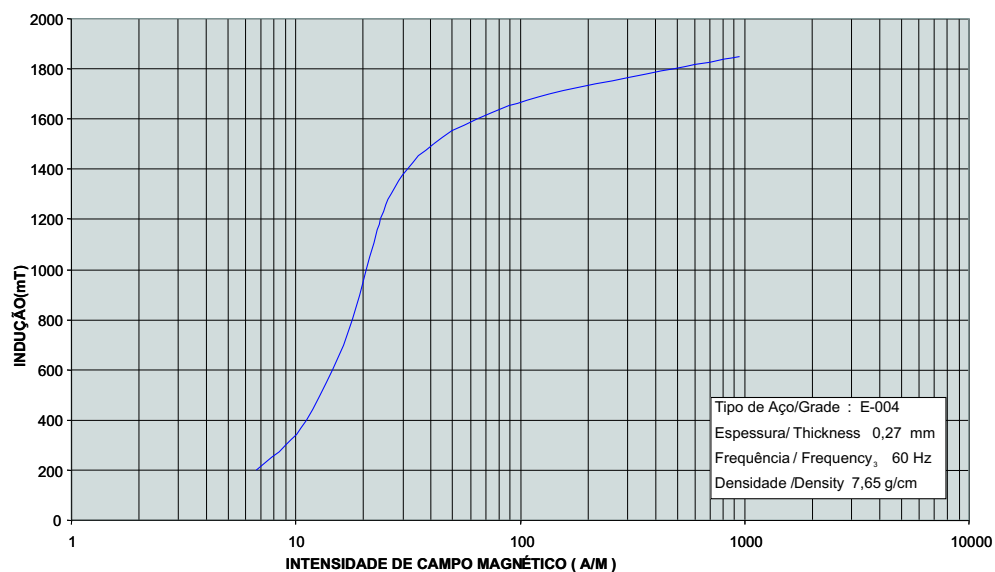


Figura 4.20: Curva de magnetização da chapa de aço E004.

A tabela 4.5 apresenta alguns pontos da curva de magnetização do material utilizado no núcleo do transformador.

Tabela 4.5: Pontos específicos da curva de magnetização da figura 4.20

Indução magnética [B] (T)	Intensidade de fluxo magnético [H] (<i>A.esp/m</i>)
0,20	6,684
0,30	9,056
0,40	11,099
0,60	14,634
0,80	17,729
1,00	20,605
1,20	23,805
1,30	26,511
1,40	31,495
1,50	41,348
1,60	64,166
1,70	136,311
1,80	484,729

4.6.2.1 Resultados das simulações do transformador de 100 MVA

O transformador de 100 MVA foi implementado no FEMM a partir das características físicas e elétricas descritas na tabela 4.4. Posteriormente, simulações foram realizadas para condições diversas de operação, constantes na tabela 4.1. Os resultados obtidos nos estudos computacionais são descritos e analisados na sequência.

- **Caso A:** Simulações com o transformador operando sob carga nominal em regime permanente

As simulações para esta condição operativa foram executadas utilizando correntes trifásicas equilibradas, calculadas em função dos dados de placa do equipamento, cujo valor de pico nominal é de 355 A na AT. Na BT a corrente utilizada é de 591 A.

A figura 4.21 ilustra a malha de elementos finitos triangulares gerada para o domínio do transformador.

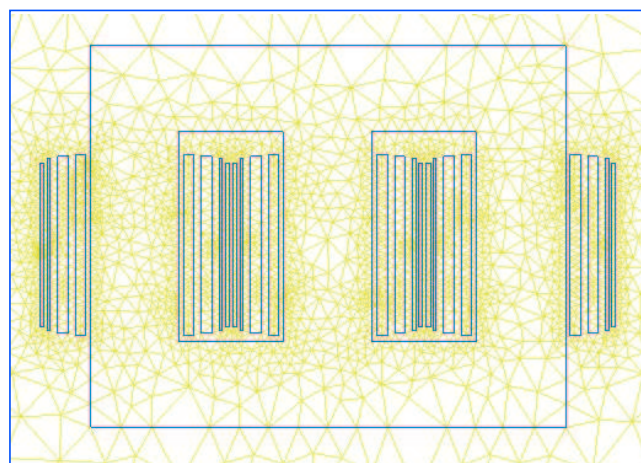


Figura 4.21: Malha de elementos finitos bidimensional do transformador de 100 MVA.

A figura 4.22 apresenta a curva de magnetização da chapa de aço silício do núcleo, plotada com o auxílio do FEMM, a partir dos pontos obtidos da figura 4.20.

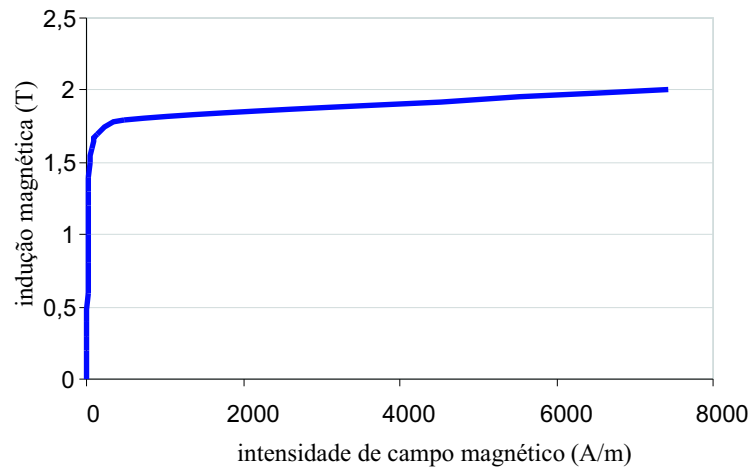


Figura 4.22: Curva de magnetização do transformador de potência obtida no FEMM.

A distribuição de fluxo magnético no interior do transformador é ilustrada na figura 4.23. A densidade de fluxo magnético encontrado para o núcleo ferromagnético neste caso, é de 1,61 T. Para a condição a vazio, apesar de não serem apresentados os resultados das simulações, destaca-se que foi verificada uma boa coerência com os resultados alcançados para a condição nominal.

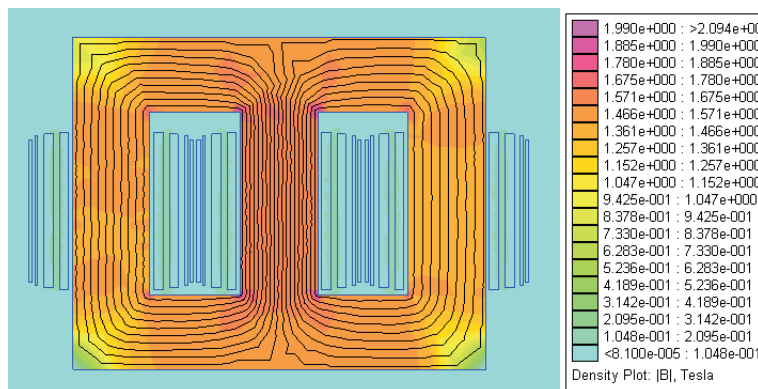


Figura 4.23: Densidade de fluxo magnético no núcleo: condição nominal.

A figura 4.24 ilustra a variação da densidade de fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos 1 e 2 em relação a altura do enrolamento 1 da BT.

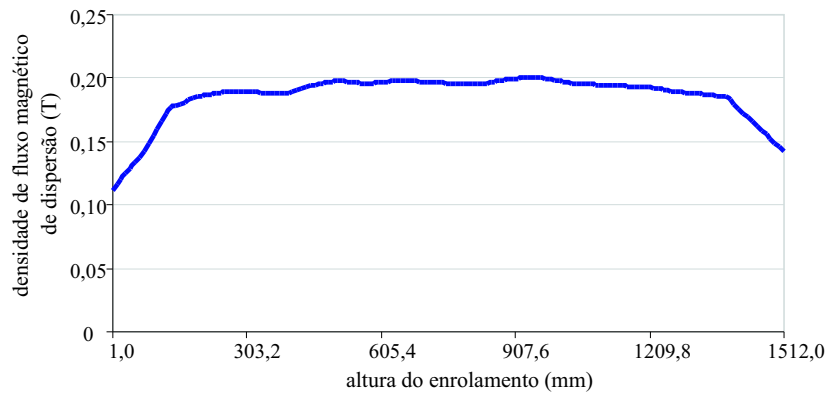


Figura 4.24: *Densidade de fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos 1 e 2: condição nominal.*

Nota-se, que as observações feitas para o transformador de 15 kVA também são válidas para o de 100 MVA, ou seja, a densidade de fluxo magnético de dispersão apresenta-se praticamente constante ao longo da altura dos enrolamentos, predominando nessa região a componente axial da densidade de fluxo e inclina-se a medida que se caminha na direção das extremidades dos enrolamentos. Nestas regiões, a inclinação da densidade de fluxo magnético de dispersão sugere o espalhamento do mesmo e o aparecimento também de uma componente radial da densidade de fluxo. O valor obtido para a componente axial dessa grandeza é de aproximadamente 200 mT. Ressalta-se que, a não apresentação dos desempenhos da dispersão magnética nas outras duas regiões entre os enrolamentos, é devido ao fato de terem valores muito pequenos. Os valores atingidos pela dispersão nestas regiões, entre os enrolamentos 2 e 3 é de aproximadamente 30 mT e entre os enrolamentos 3 e 4 é de 18 mT.

As forças radiais e axiais estão mostradas nas figuras 4.25 e 4.26 para os enrolamentos 2 da AT e 1 da BT, respectivamente. Estes enrolamentos apresentam os maiores esforços em virtude de sua maior força magnetomotriz. Mais uma vez, as forças eletromagnéticas são apresentadas para a condição nominal, para assim serem confrontadas com os outros casos estudados.

Ressalta-se que o transformador em questão não possui uma simetria entre os enrolamentos concêntricos, como pôde ser observado na figura 4.18. Dessa forma, pode-se constatar que as forças axiais também alcançam valores mais significativos nos enrolamentos, como mostram as figuras 4.25 e 4.26.

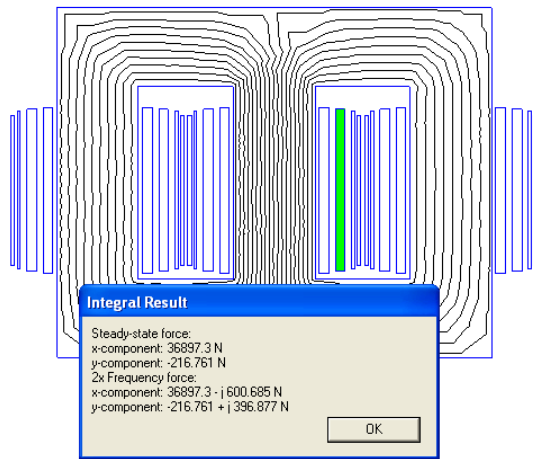


Figura 4.25: Forças axial e radial no enrolamento 2 da AT: condição nominal.

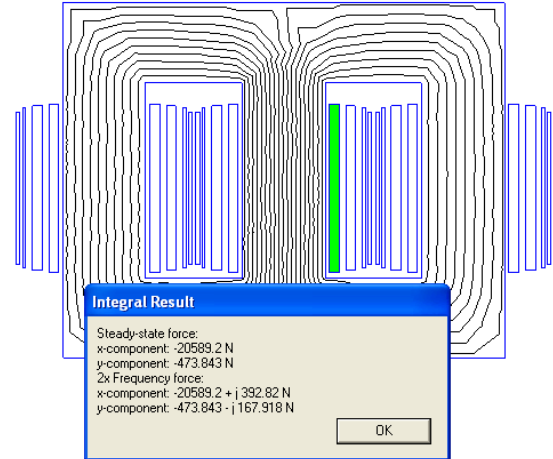


Figura 4.26: Forças axial e radial no enrolamento 1 da BT: condição nominal.

Os cálculos das forças realizadas com o FEMM forneceram, para o enrolamento de AT, uma componente radial de 36,897 kN e uma componente axial de 216,76 N. Para o enrolamento de BT obteve-se 20,589 kN para a força radial e 473,84 N de força axial. Observa-se, que os valores encontrados para as forças agindo neste transformador são bem maiores do que aquelas encontradas para o transformador de 15 kVA, para a mesma condição operativa, que se explica pelas maiores amplitudes das correntes envolvidas.

- **Caso B: Simulações com o transformador operando sob curto-circuito trifásico**

Os estudos computacionais do transformador de potência operando sob uma condição de curto-circuito trifásico equilibrado foram conduzidos utilizando valores de pico para as correntes iguais a 6640 A para a AT e 11061 A na BT.

A figura 4.27 ilustra a distribuição da densidade de fluxo magnético no interior do transformador, correspondente à operação sob curto-circuito. O valor encontrado para a densidade de fluxo magnético no núcleo é de aproximadamente 1,32 T.

Assim como foi observado para o caso do transformador de distribuição operando sob curto-circuito, no presente caso, como não podia ser diferente, ocorre uma redistribuição das linhas de fluxo magnético no interior do equipamento, que resulta em um aumento substancial da densidade de fluxo de dispersão.

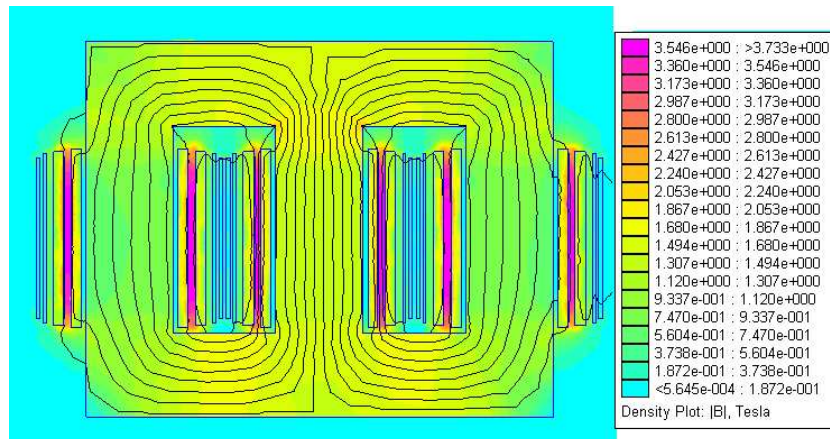


Figura 4.27: *Densidade de fluxo magnético: curto-circuito.*

A figura 4.28 ilustra a densidade de fluxo magnético de dispersão obtida entre os enrolamentos 1 e 2. O valor de pico da densidade de fluxo magnético de dispersão obtido para a condição de curto-circuito nessa região é de aproximadamente 3,7 T, enquanto que, para a condição nominal, o valor é de 200 mT.

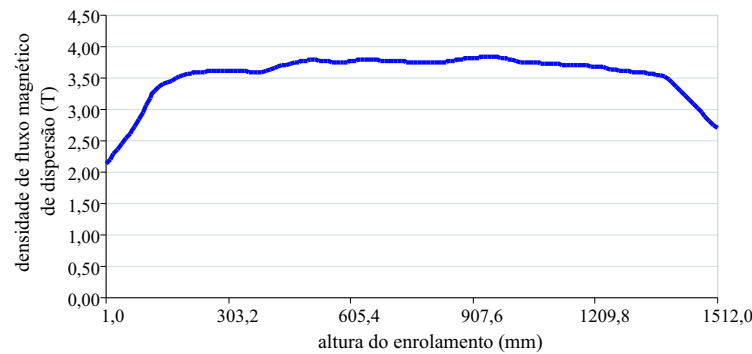


Figura 4.28: *Densidade de fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos 1 e 2: curto-circuito.*

As figuras 4.29 e 4.30 mostram as forças eletromagnéticas radiais e axiais nos enrolamentos 2 e 1, respectivamente.

Observa-se nas figuras que as componentes das forças nos dois enrolamentos têm valores muito elevados comparativamente ao caso nominal. O valor da componente radial é de aproximadamente 12,631 MN e de componente axial é de 33,60 kN, ambos para o enrolamento 2. Para o enrolamento 1 foram obtidos 7,076 MN e 178,988 kN para as forças radiais e axiais, respectivamente.

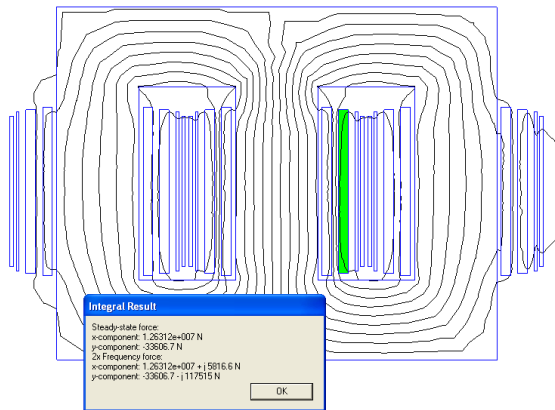


Figura 4.29: Forças axial e radial no enrolamento externo: curto-circuito.

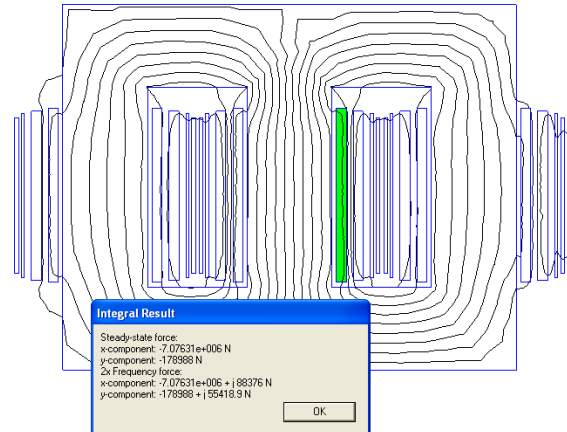


Figura 4.30: Forças axial e radial no enrolamento interno: curto-circuito.

4.7 Síntese dos resultados

Este item destina-se à consolidação dos resultados apresentados ao longo deste capítulo, para os dois transformadores investigados. Neste sentido, a tabela 4.6 apresenta as grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas, obtidas via simulação, para o transformador de 15 kVA. Da mesma forma, os valores alcançados para as grandezas mencionadas para o transformador de 100 MVA, estão mostrados na tabela 4.7. Os resultados consolidados permitem evidenciar a variação dos valores obtidos das diversas grandezas, para cada um dos três casos simulados.

Tabela 4.6: *Síntese dos resultados obtidos para o transformador de 15 kVA*

		<i>Caso A</i>	<i>Caso B</i>	<i>Caso C</i>
B_{disp} [T]		29×10^{-3}	1,36	1,4
B_{nucleo} [T]		1,5	0,3	0,3
Força radial [N]	Enrol. externo	6,89	14832	13309
	Enrol. interno	5,73	11693	11663
Força axial [N]	Enrol. externo	0,013	0,02	49,49
	Enrol. interno	0,003	0,28	33,19

Tabela 4.7: *Síntese dos resultados obtidos para o transformador de 100 MVA*

		<i>Caso A</i>	<i>Caso B</i>
B_{disp} [T]		200×10^{-3}	3,76
B_{nucleo} [T]		1,61	1,32
Força radial [N]	Enrol. 2 (AT)	36897	12631×10^3
	Enrol. 1 (BT)	20589	7076×10^3
Força axial [N]	Enrol. 2 (AT)	218,76	33600
	Enrol. 1 (BT)	473,84	178988

Vale ressaltar, que os valores encontrados para as forças axiais e radiais, para todas as condições de operação, são relativos às “Forças de Lorentz”. No entanto, como foi

mencionado anteriormente, o FEMM utiliza uma segunda estratégia para determinar as forças eletromagnéticas via “Tensor de Maxwell” que, contudo, fornece resultados bastante próximos aos obtidos pela “Forças de Lorentz” e desta forma, não foi contemplado nesta tese.

Objetivando avaliar o desempenho do modelo implementado no FEMM, a seguir são mostradas tabelas que congregam os valores obtidos via simulação e os decorrentes de cálculos analíticos, cujas representações matemáticas foram apresentadas no capítulo precedente. Assim, as tabelas 4.8 e 4.9 apresentam os resultados do transformador de 15 kVA e 100 MVA, respectivamente. É importante enfatizar, que somente os resultados das forças eletromagnéticas na direção radial estão mostrados na tabela. Justifica-se este fato, pela dificuldade em se obter os dados para os cálculos analíticos das forças axiais necessários para utilização nas formulações apresentadas no capítulo 3 [29]. Portanto, os resultados do caso C não são apresentados na tabela.

Tabela 4.8: *Comparação entre as simulações e cálculos analíticos: condição nominal e curto-circuito: transformador de 15 kVA*

		<i>Método Analítico</i>		<i>Método numérico</i>	
		<i>Caso A</i>	<i>Caso B</i>	<i>Caso A</i>	<i>Caso B</i>
B_{disp} [T]		$29,74 \times 10^{-3}$	1,36	29×10^{-3}	1,36
B_{nucleo} [T]		1,54	-	1,50	0,30
<i>Força radial</i> [N]	Enrol. externo	7,74	16350	6,89	14832
	Enrol. interno	5,28	11150	5,73	11693

Tabela 4.9: *Comparação entre as simulações e cálculos analíticos: condição nominal e curto-circuito: transformador de 100 MVA*

		<i>Método Analítico</i>		<i>Método numérico</i>	
		<i>Caso A</i>	<i>Caso B</i>	<i>Caso A</i>	<i>Caso B</i>
B_{disp} [T]		194×10^{-3}	3,6	200×10^{-3}	3,76
B_{nucleo} [T]		1,61	-	1,61	1,32
<i>Força radial</i> [N]	Enrol. 2 (AT)	36924	13700×10^3	36897	12631×10^3
	Enrol. 1 (BT)	20351	7600×10^3	20589	7076×10^3

Os valores constantes nas tabelas anteriores mostram que, em seus aspectos quantitativos, os resultados alcançados via simulação com o simulador FEMM, de uma forma geral, apresentam uma boa correspondência com os derivados dos cálculos analíticos, para todas as condições de operação estudadas, tanto para o transformador de distribuição quanto para o transformador de potência. Essa afirmativa é válida para todas as grandezas avaliadas passíveis de comparação pelos dois métodos empregados confrontados.

4.8 Considerações finais

Este capítulo foi dedicado à apresentação de simulações computacionais utilizando o FEMM. Para tanto, o capítulo foi iniciado com uma síntese desse pacote computacional, que se baseia em métodos numéricos para a solução das equações diferenciais parciais que descrevem os fenômenos eletromagnéticos investigados. Ainda nessa parte inicial, foram destacados os procedimentos para a montagem, sistematização e implementação das estruturas físicas de dispositivos no simulador utilizado.

Dando seqüência aos desenvolvimentos, e como forma de exemplificar a utilização e potencialidades do programa, foram implementados os modelos de dois transformadores, um de distribuição com arranjos de enrolamentos simétricos e outro de maior porte, com enrolamentos assimétricos.

Dando prosseguimento, os equipamentos foram submetidos a diversas condições operativas, para que se pudesse concluir sobre os esforços ocorridos nos enrolamentos através de observação e comparação dos resultados.

No caso da primeira configuração, observou-se que a simetria entre os enrolamentos torna as forças radiais dominantes, enquanto que as forças axiais são relativamente pequenas.

De outro lado, para a segunda configuração, viu-se que, a assimetria entre os enrolamentos do transformador de potência, provoca um aumento substancial das forças axiais. Neste caso, tanto as forças radiais quanto as forças axiais devem ser levadas em conta na etapa de projeto dos transformadores, ou mais precisamente, as estruturas de suporte deverão ser adequadamente providenciadas, de maneira a conferir a necessária resistência mecânica do dispositivo aos fenômenos a que possam ser submetidos.

Quanto aos aspectos qualitativos, o mapeamento das distribuições de fluxo magnético no interior dos equipamentos mostrou que as altas correntes que circulam nos enrolamentos concêntricos, causadas pelos curtos-circuitos externos, provocam uma alteração no caminho do fluxo magnético proporcionando um aumento significativo do fluxo magnético de dispersão e, conseqüentemente, das forças eletromagnéticas nos enrolamentos.

As simulações efetuadas para enrolamentos em derivação mostraram que o uso dessa estratégia para regular a tensão, altera a distribuição de fluxo magnético no interior do transformador, provocando um significativo aumento da densidade de fluxo

de dispersão radial e, por conseguinte, da força axial. Esse efeito também foi constatado nos enrolamentos assimétricos do transformador de 100 MVA.

Quanto aos aspectos quantitativos, de um modo geral, observou-se uma grande correspondência entre os resultados computacionais e analíticos para todas as condições de operação estudadas. Isto permite dizer que os resultados obtidos nas simulações do FEMM podem ser usados como valores de referência para avaliar o desempenho de outros métodos numéricos.

No tocante às simulações empregando-se as correntes de energização do transformador, é importante salientar que estas não foram executadas neste capítulo, uma vez que o modelo empregado nos estudos utiliza a curva de magnetização e não o ciclo de histerese que é necessário para esta finalidade.

Finalmente, ressalta-se que o objetivo maior deste capítulo foi fundamentalmente o de estabelecer uma base computacional confiável, que possa oferecer sustentação aos estudos de desempenho dos equipamentos sob investigação em um programa que utiliza técnicas no domínio do tempo e que será apresentado no próximo capítulo.

Capítulo 5

Cálculo de Forças Eletromagnéticas e Estresse Mecânico em Transformadores Utilizando Técnicas no Domínio do Tempo

5.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem por objetivo o desenvolvimento, a modelagem e implementação computacional de modelos apropriados para cálculos de grandezas mecânicas nos enrolamentos de transformadores utilizando técnicas no domínio do tempo.

Para tanto, modelos de transformadores explorados nas referências [34] e [46] são utilizados como ponto de partida. A técnica no domínio do tempo empregada nas referências permite a modelagem de transformadores utilizando forças magnetomotrizes e relutâncias magnéticas. Para calcular as forças eletromagnéticas e os estresses mecânicos, a partir do modelo “base”, foram introduzidas alterações na topologia, de maneira a tornar acessíveis algumas grandezas necessárias para a realização do cálculo de grandezas mecânicas envolvidas. Novas rotinas foram desenvolvidas e acopladas ao programa modificado, destinadas fundamentalmente à determinação das grandezas mecânicas enfocadas neste trabalho.

Para alcançar os objetivos propostos, inicialmente são abordados aspectos relacionados com a forma de estruturação e sistematização de modelos do simulador empregado neste capítulo e são realizadas simulações para diversas condições de operação dos mesmos transformadores de potência e de distribuição apresentados no capítulo 4. A eficácia dos modelos implementados é avaliada tomando-se os cálculos do FEMM como valores de referência.

Pretende-se, com esta ferramenta realizar estudos de desempenho do equipamento tendo como foco o cálculo das forças eletromagnéticas e a estimativa dos estresses mecânicos devido, principalmente, aos curtos-circuitos.

5.2 Estruturação e sistematização de modelos eletromagnéticos utilizando técnica no domínio do tempo

Através dos recursos originalmente encontrados na biblioteca do simulador empregado, constata-se que esta ferramenta oferece grandes atrativos para a modelagem de dispositivos eletromagnéticos com componentes elétricos (enrolamentos) e magnéticos (núcleos). Estes recursos viabilizam a modelagem de transformadores, variando desde os arranjos mais simples até os mais complexos, constituídos de unidades trifásicas do tipo núcleo envolvido ou envolvente, de três ou cinco colunas, dois ou mais enrolamentos por fase.

No que tange a utilização deste simulador, a biblioteca da plataforma, para fins de estudos de sistemas e dispositivos faz uso dos recursos/rotinas, designadas por *templates* ou modelos. Visando ilustrar a forma de modelagem de componentes individuais e a constituição de um modelo mais complexo, a seguir, são descritos os modelos dos principais componentes elétricos e magnéticos que formam os transformadores.

- **Enrolamentos**

O *template* representativo de um enrolamento de um transformador é referenciado por *template wind.sin*, o qual está esquematicamente ilustrado na figura 5.1

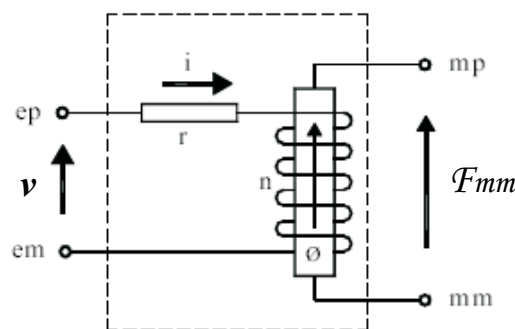


Figura 5.1: Diagrama esquemático equivalente do *template wind.sin*.

Os principais parâmetros de conexão e entrada, destacados na figura anterior, são:

ep , em : terminais elétricos, positivo (ep) e negativo (em);
 mp , mm : terminais magnéticos, positivo (mp) e negativo (mm);
 n : número de espiras da bobina;
 r : resistência elétrica da bobina.

A tensão entre os terminais ep e em é descrita pela equação 5.1.

$$v = ri + n \frac{d\phi}{dt} \quad (5.1)$$

sendo:

ϕ : fluxo magnético (wb);
 i : corrente instantânea (A);
 v : tensão instantânea (V).

Reportando-se ainda à figura 5.1, a corrente elétrica (i) que circula na bobina, produz uma força magnetomotriz (Fmm) entre os terminais magnéticos do enrolamento, dada pela equação 5.2. Estes terminais são conectados aos terminais magnéticos correspondentes do núcleo.

$$Fmm = ni \quad (5.2)$$

sendo:

Fmm : força magnetomotriz (A-espira).

• Caminho magnético

A Fmm aplicada ao núcleo dá origem ao fluxo magnético (ϕ), cuja intensidade e características dependerão das propriedades magnéticas do material e da geometria do núcleo, isto é, da relutância magnética do núcleo ($\mathfrak{R}$). A relação entre Fmm , ϕ e ($\mathfrak{R}$) é dada pela expressão:

$$Fmm = \mathfrak{R}\phi \quad (5.3)$$

Sendo:

$\mathfrak{R}$: relutância do núcleo magnético ($A - espira/wb$).

O caminho oferecido para a passagem do fluxo magnético, de maneira análoga ao enrolamento, pode ser representado por um modelo que, dependendo das características do meio, terá uma representação linear ou não-linear.

Caso a relutância do caminho magnético seja linear, ela é representada pelo *template core.sin*. Os principais parâmetros de entrada requeridos pelo referido *template* são a área da seção transversal, o comprimento e a permeabilidade do material do núcleo, mostrados na figura 5.2.

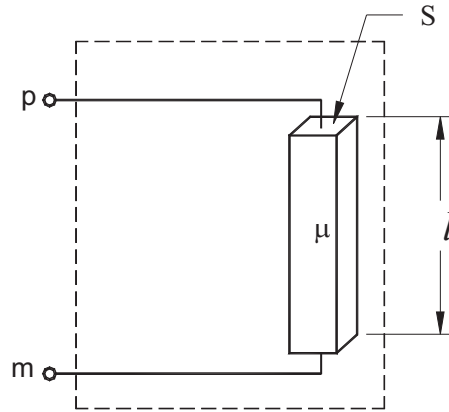


Figura 5.2: Diagrama esquemático equivalente do *template core.sin*.

Sendo que, na figura tem-se:

p, m : pinos magnéticos;

l : comprimento do núcleo magnético (m);

S : área transversal do núcleo magnético (m^2);

μ : permeabilidade do material do núcleo magnético (H/m).

Os pinos de conexão magnética p e m são conectados aos terminais magnéticos do enrolamento.

A relutância magnética pode, de um modo geral, ser expressa pela equação 5.4.

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \cdot S} = \frac{l}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} \quad (5.4)$$

sendo:

μ_0 : permeabilidade magnética do vácuo (H/m);

μ_r : permeabilidade magnética relativa do material do núcleo.

Para o caso em que a relutância apresenta características não lineares, como é o caso dos materiais ferromagnéticos, a representação é feita por um outro *template* denomi-

nado *template corenl.sin*. Este modelo baseia-se no modelo de histerese ferromagnética de Jiles-Atherton [47], [34].

O modelo completo do transformador conforma-se pela combinação dos três tipos básicos de *templates* (*wind.sin*, *core.sin* e *corenl.sin*), permitindo a construção de um novo *template*, se necessário, destinado à representação de cada tipo específico de transformador. Os diversos tipos de transformadores resultam das diferentes ligações dos enrolamentos e configurações de núcleo magnético do transformador. A facilidade de se conectar os *templates* faz a implementação de modelos de transformadores uma tarefa relativamente simples e direta.

Esta abordagem para a modelagem de transformadores trifásicos permite que as interações dos fluxos entre as três fases sejam prontamente estabelecidas. Caberá ao simulador a função de formar o sistema de equações elétricas e magnéticas dos acoplamentos em cada fase e entre as fases, permitindo ao usuário ater-se, especificamente e mais rapidamente, à análise dos resultados qualitativos e quantitativos do fenômeno de interesse, deixando de lado questões relacionadas com os métodos numéricos e de programação. As facilidades proporcionadas permitem a visualização em diversos pontos físicos do núcleo do transformador, os diferentes níveis de saturação a que o núcleo é submetido durante o regime transitório, principalmente durante o transitório de energização, quando o nível da densidade de fluxo magnético alcançado em uma fase pode ser bem maior do que aquele atingido nas outras fases [34].

A utilização do simulador na modelagem de transformadores através dos *templates* mencionados, será exemplificada nas seções posteriores com a implementação dos dois transformadores trifásicos investigados neste trabalho.

5.2.1 Determinação da relutância de dispersão a partir das dimensões do dispositivo

O conhecimento do caminho do fluxo de dispersão é primordial para o cálculo preciso das forças eletromagnéticas, conforme foi claramente estabelecido. Diante disso, antes de efetuar a determinação das forças propriamente ditas, faz-se necessário determinar a filosofia utilizada na implementação computacional do transformador para estabelecer o caminho percorrido pelo fluxo magnético através do duto existente entre os enrolamentos.

O cálculo da relutância oferecida pelo ar ao fluxo magnético pode ser realizado

através das forças magnetomotrizes geradas nos enrolamentos, determinadas pela equação 5.3.

A partir da geometria do transformador, pode-se calcular as relutâncias do circuito magnético equivalente. A relutância de cada trecho de núcleo ferromagnético é determinada com o auxílio da equação 5.4.

Para efetuar o cálculo da relutância de dispersão ($\mathfrak{R}_{disp}$), entre os enrolamentos de um transformador, é necessário a determinação da área efetiva ou equivalente de dispersão. Esta área pode ser determinada pela equação 5.5 mediante o conhecimento das grandezas dispostas na figura 5.3 [48].

$$S_{disp} = l_m \left(\frac{d_1}{3} + d_0 + \frac{d_2}{3} \right) \quad (5.5)$$

sendo:

S_{disp} : área do espaço entre enrolamentos de uma mesma fase (m^2);

l_m : comprimento médio de circunferência dos enrolamentos (m);

d_1 : espessura do enrolamento externo (m);

d_2 : espessura do enrolamento interno (m);

d_0 : espessura do espaço entre os enrolamentos externo e interno (m).

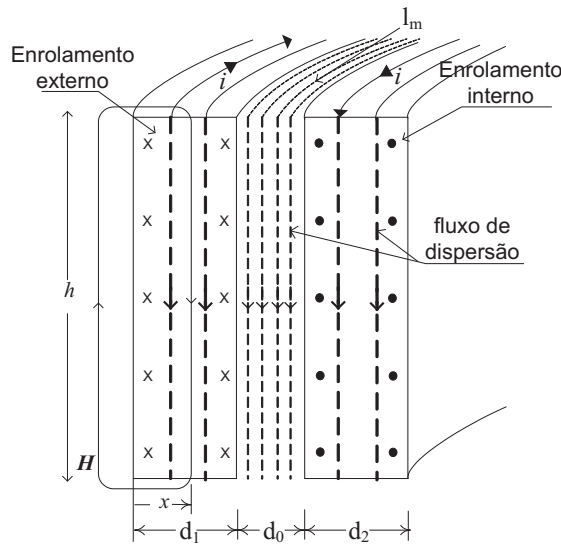


Figura 5.3: Enrolamentos concêntricos utilizados no cálculo da área de dispersão.

A área efetiva ou equivalente do espaço de ar entre o núcleo ferromagnético e o enrolamento interno, quando se considera a energização do transformador pelo enrolamento interno, é obtida pela expressão 5.6, diretamente a partir das dimensões físicas

do dispositivo [34]. Salienta-se que, para a definição da área equivalente, complementarmente à figura 5.3 mostrada anteriormente, faz-se uso também das figuras 5.4 e 5.5.

$$S_{AR} = \frac{\pi}{4} (d_{ibi})^2 - S_c \quad (5.6)$$

sendo:

S_{AR} : Área efetiva ou equivalente do espaço de ar entre o núcleo ferromagnético e o enrolamento interno (m^2);

S_c : Área aparente da coluna (m^2).

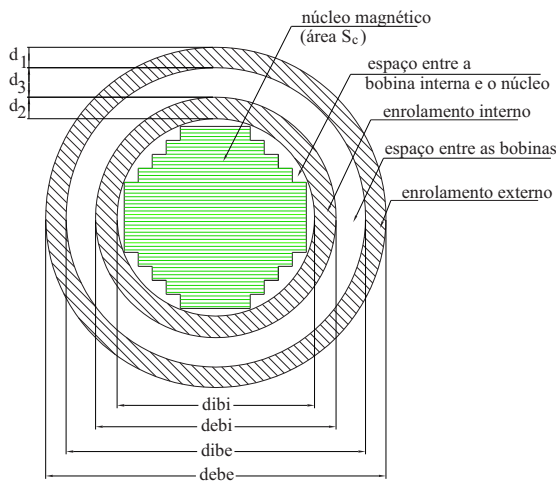


Figura 5.4: *Vista superior de uma coluna do transformador*

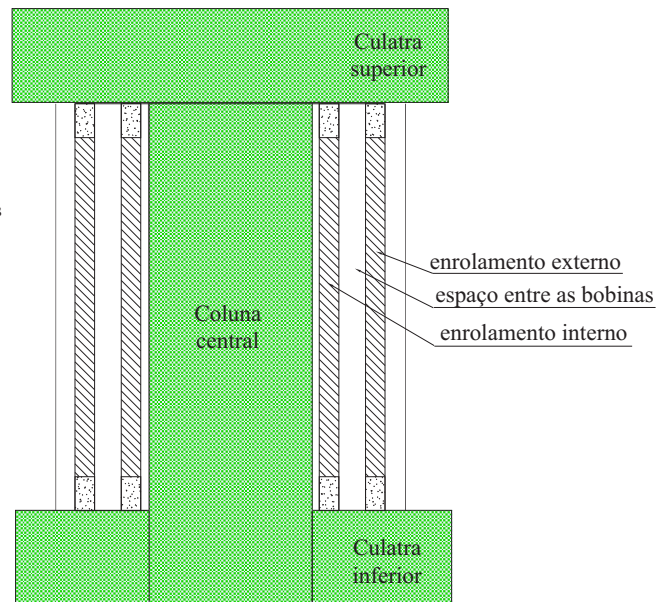


Figura 5.5: *Vista frontal de uma coluna do transformador*

As siglas mostradas na figura 5.4 estão identificadas a seguir.

d_{ibi} : diâmetro interno da bobina interna (m);

d_{ibe} : diâmetro interno da bobina externa (m);

d_{ebi} : diâmetro externo da bobina interna (m);

d_{ebe} : diâmetro externo da bobina externa (m).

Para casos em que a energização do transformador ocorre pelo enrolamento externo, a área efetiva ou equivalente pode ser calculada pela expressão 5.7.

$$S_{AR} = \frac{\pi}{4} (dibe)^2 - S_c \quad (5.7)$$

O simulador utilizado permite uma modelagem mais fidedigna do transformador, uma vez que como foi mencionado anteriormente, os diversos caminhos de fluxo magnético podem ser representados separadamente através de suas relutâncias lineares e não lineares. Isto permite a determinação dos fluxos magnéticos em qualquer região da estrutura, o que facilita enormemente as análises. Assim, a implementação computacional da relutância de dispersão é realizada em conformidade com as estratégias fornecidas neste item, através da definição das áreas equivalentes de cada região de acordo com dados obtidos no projeto do equipamento.

5.2.2 Cálculo de forças eletromagnéticas para implementação no domínio do tempo

O cálculo das forças eletromagnéticas no domínio do tempo é realizado de acordo com o postulado pela equação 5.8, a qual fundamenta-se na força de Lorentz [44], mostrada no capítulo 3 e, novamente apresentada.

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (5.8)$$

Para determinar a força média que atua nos enrolamentos, algumas manipulações devem ser efetuadas na equação 5.8. Primeiramente, considere que um segmento elementar (dl) do condutor percorrido por uma corrente I , está sob a ação de uma densidade de fluxo magnético vetorial $\vec{B}$, conforme ilustra a figura 5.6.

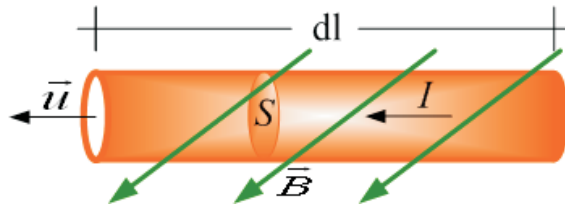


Figura 5.6: Segmento elementar de condutor percorrido por uma corrente I .

Considerando que o vetor $\vec{J}$ é a densidade superficial de corrente I , pode-se defini-lo, na direção do vetor unitário, pela equação 5.9.

$$\vec{J} = \frac{I}{S} \vec{u} \quad (5.9)$$

sendo:

I : valor eficaz da corrente;

S : seção transversal do condutor;

$\vec{u}$: vetor unitário na direção da corrente I .

O segmento dl pode ser dado por:

$$d\vec{l} = dl\vec{u} \quad (5.10)$$

sendo:

dl : comprimento elementar do condutor.

Então, pode-se escrever que:

$$\vec{u} = \frac{d\vec{l}}{dl} = \frac{\vec{J}}{J} \quad (5.11)$$

A força agindo sobre o segmento do condutor é dada pela expressão 5.12.

$$d\vec{F} = \vec{f}dV \quad (5.12)$$

sendo:

dV : elemento diferencial de volume dado por $dV = Sdl$.

Substituindo dV na equação 5.12, tem-se:

$$d\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}Sdl \quad (5.13)$$

Substituindo a equação 5.11 do vetor unitário em 5.13 obtém-se:

$$d\vec{F} = \frac{d\vec{l}}{dl} \times \vec{B}Idl \quad (5.14)$$

Finalmente, chega-se a equação 5.15 que exprime a força experimentada pelo condutor de comprimento dl .

$$d\vec{F} = d\vec{l} \times \vec{B}I \quad (5.15)$$

Do conceito de produto vetorial sabe-se que a força resultante é perpendicular ao plano formado pelos vetores $d\vec{l}$ e $\vec{B}$, cujo módulo é obtido pela equação 5.16.

$$dF = BIdl \sin\theta \quad (5.16)$$

sendo:

θ : ângulo formado pelos vetores $d\vec{l}$ e $\vec{B}$.

A partir da equação 5.16 pode-se determinar as forças eletromagnéticas atuando em um enrolamento de n espiras, percorridas por uma corrente I , lembrando-se que $\theta = 90^\circ$. Dessa maneira, integrando-se a equação 5.16, o módulo da força que atua nas bobinas do transformador pode ser obtido pela expressão 5.17:

$$F = nIBl \quad (5.17)$$

sendo:

n : número de espiras do enrolamento;

l : comprimento da espira (m).

Considerando que o comprimento de uma espira circular é igual a $l = \pi \cdot D$, a equação que define a força radial total atuando sobre o enrolamento pode ser reescrita na forma da equação 5.18:

$$F_r = nIB\pi D_m \quad (5.18)$$

sendo:

D_m : diâmetro médio do enrolamento (m).

Conforme visto no capítulo 3, a força de interesse é aquela denominada de força radial média. Dessa forma, a partir da expressão 5.18, dividida pelo valor de π , obtém-se a expressão que permite determinar o valor da força radial média, conforme mostra a equação 5.19.

$$F_{rmed} = nIBD_m \quad (5.19)$$

sendo:

F_{rmed} : força radial média no enrolamento (N).

No domínio do tempo, pode-se escrever:

$$f_{rmed}(t) = ni(t) B(t) D_m \quad (5.20)$$

O estresse de tração é calculado a partir da força radial média e das dimensões físicas do condutor, de acordo com a equação 5.21 que será reapresentada aqui.

$$\sigma_{medio} = \frac{I_{\max}^2}{h} \cdot \frac{n\pi D_m}{S} 10^{-7} \quad (5.21)$$

As equações 5.19 e 5.21 foram implementadas computacionalmente e utilizadas para efetuar o cálculo das forças radiais médias e dos estresses de tração e de compressão radial em transformadores do tipo núcleo envolvido e com enrolamentos concêntricos.

5.3 Modelo computacional para o cálculo de forças eletromagnéticas

O modelo computacional obtido para realizar o cálculo das forças eletromagnéticas e dos estresses eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores encontra-se esquematicamente representado na figura 5.7. A figura ilustra os dois módulos principais que conformam o sistema completo, a saber: o modelo modificado do transformador trifásico e o módulo destinado à determinação dos esforços. No desenho estão ilustradas ainda, a interação entre os sub-módulos e algumas das grandezas que são disponibilizadas para visualização e manuseio. Devido a maior praticidade de utilização, todas as grandezas são acessíveis via o *template* do transformador através de gráficos no domínio do tempo.

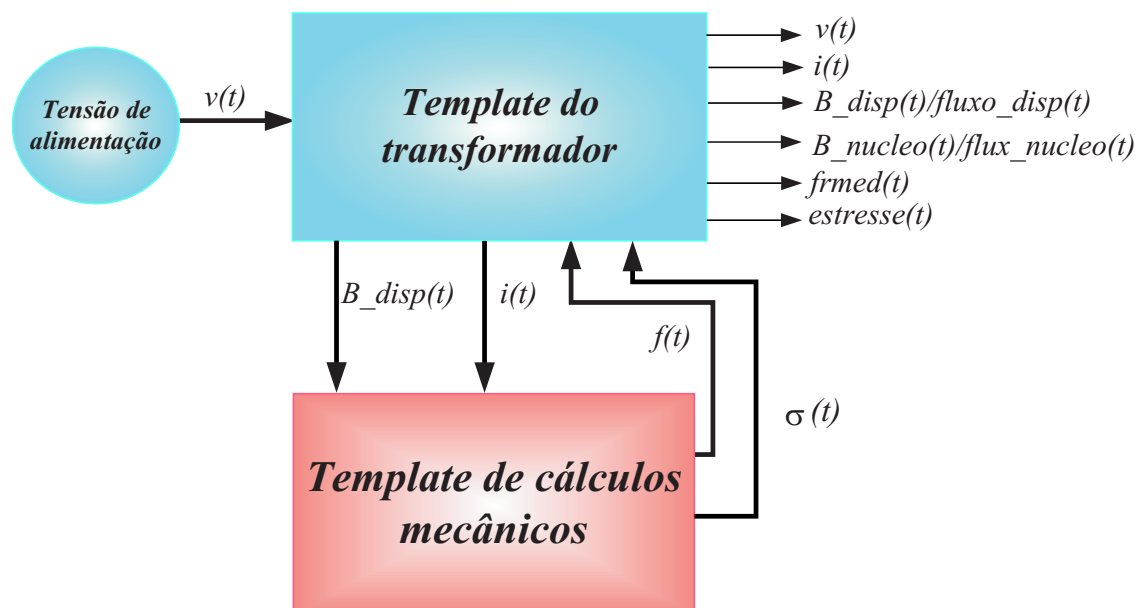


Figura 5.7: Modelo computacional implementado.

O programa obtido permite a determinação das forças eletromagnéticas na direção

radial e dos estresses de tração e de compressão radial. Para isso, tornou-se necessário introduzir alterações no *template* dos transformadores de forma a que se pudesse ter acesso às grandezas requeridas para a avaliação dos equipamentos sob as situações de operação especificadas, com foco no desempenho mecânico dos mesmos.

A modelagem computacional do *template* dos transformadores já foi explanada anteriormente. Com relação ao *template* para determinação dos estresses mecânicos e das forças eletromagnéticas, este é composto basicamente pelas expressões para o cálculo dos mesmos, fornecidas anteriormente.

Para uma melhor compreensão do programa desenvolvido, a figura 5.8 ilustra um esquema mais detalhado da implementação computacional dos modelos para cálculo dos esforços mostrando, inclusive os pontos selecionados para a aplicação dos fenômenos transitórios.

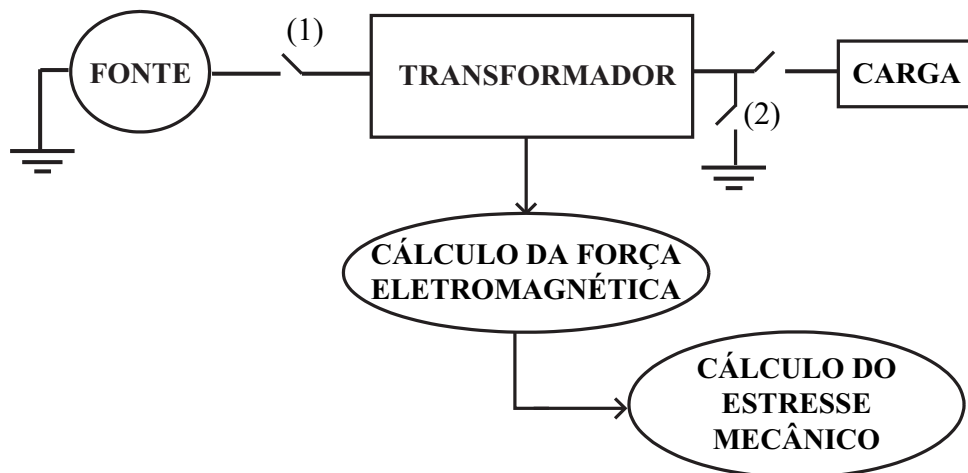


Figura 5.8: Conexão dos templates para cálculo dos esforços.

Além dos *templates* da fonte de alimentação, do equipamento e da carga, onde são impostos os distúrbios transitórios, a figura mostra também o *template* destinado ao cálculo dos esforços.

Quanto a aplicação dos fenômenos transitórios, as correntes de *inrush* são obtidas através do fechamento da chave (1) a partir do chaveamento das três fases no mesmo instante. O curto-circuito trifásico no lado secundário é imposto fechando-se a chave (2).

Os dados de entrada para alimentação do *template* dos esforços são fornecidos via *template* do transformador e são basicamente, o sinais de correntes e densidade de fluxo de dispersão, além das características geométricas do transformador sob análise.

5.4 Resultados das simulações

As simulações computacionais foram realizadas utilizando os mesmos transformadores de 15 kVA e de 100 MVA empregados no capítulo 4. As características físicas, elétricas e magnéticas destes equipamentos encontram-se descritas nas tabelas 4.2 e 4.4 do capítulo anterior.

Os estudos computacionais objetivam analisar o desempenho dos transformadores sob investigação, a partir de seus desempenhos elétricos, magnéticos e mecânicos, quando submetidos a condições operativas diversas.

Os resultados desta parte da pesquisa serão, em estudos subseqüentes, comparados com os resultados obtidos no capítulo 4, quando utilizou-se o Método dos Elementos Finitos. Em outras palavras, a estratégia utilizando o FEMM, adicionalmente, é utilizada para reforçar o desempenho do programa desenvolvido, para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos, ou seja, contribuir para a validação desta nova metodologia.

As situações de operação impostas às simulações dos diversos casos estudados correspondem às condições designadas na tabela 5.1. Entretanto, ressalta-se que, as características do *software* permitem que se utilize a tensão como dado de entrada e não as correntes das três fases utilizadas pelo FEMM.

Tabela 5.1: *Estudos computacionais - Domínio do tempo*

Caso	Descrição dos casos	
Caso A	Simulações com o transformador sob carga nominal operando em regime permanente	15 kVA
		100 MVA
Caso B	Simulações com o transformador operando durante uma situação transitória de curto-circuito trifásico	15 kVA
		100 MVA
Caso C	Simulações do transformador sendo energizado sob situação transitória de corrente de <i>inrush</i>	15 MVA
		100MVA

Adicionalmente aos casos A e B, que foram contemplados nos estudos utilizando o FEMM, o caso C foi inserido nas investigações no domínio do tempo com o objetivo de investigar o efeito das correntes de energização no que tange aos esforços eletromecânicos. No entanto, as conclusões finais sobre os estresses, para o caso C, especificamente, enfocaram somente os resultados obtidos dos esforços relacionados aos transformadores de potência. Este fato justifica-se por este trabalho não contemplar os esforços causados pelas forças axiais, o que será melhor explanado no momento oportuno.

5.4.1 Resultados das simulações do transformador de distribuição

As características físicas, elétricas e magnéticas do transformador de 15 kVA já descritas, foram utilizadas para implementá-lo, desta vez, utilizando o simulador do domínio do tempo.

A figura 5.9 tem um caráter meramente ilustrativo, e é utilizada para a demonstrar a inter-relação entre os fluxos magnéticos e as relutâncias oferecidas ao seu estabelecimento no interior do transformador trifásico. A distribuição de fluxo magnético mostrada na figura refere-se a um determinado instante quando o fluxo magnético na fase central é máximo.

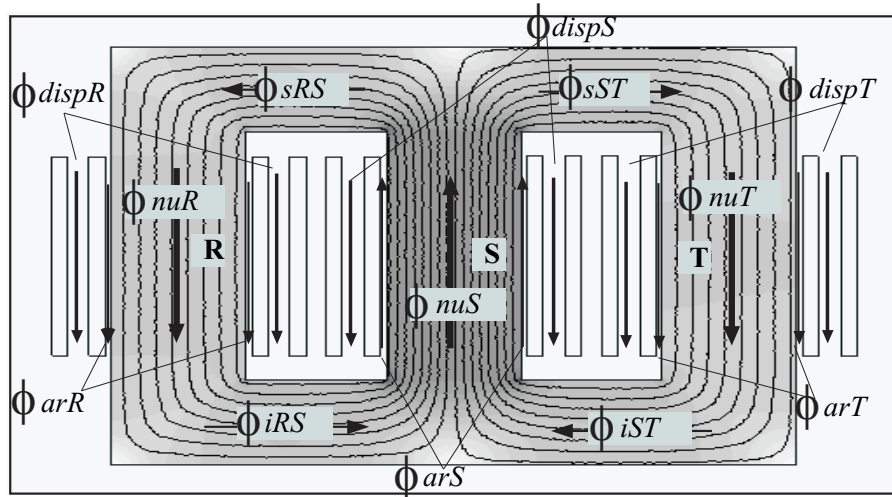


Figura 5.9: Distribuição de fluxo no interior de um transformador trifásico.

De acordo com a figura 5.9 e tendo em vista as finalidades da modelagem, os fluxos magnéticos e seus caminhos, relacionados com o transformador trifásico, podem ser divididos de acordo com as referências [34] e [42] em:

- fluxo magnético que concatena os enrolamentos de uma mesma fase, cujo caminho magnético dá-se, principalmente, pelo material do núcleo (ϕ_{nuR} , ϕ_{nuS} e ϕ_{nuT}) e o ar entre a coluna e o enrolamento interno (ϕ_{arR} , ϕ_{arS} e ϕ_{arT});
- fluxo de dispersão entre os enrolamentos de uma mesma fase, cuja principal via magnética dá-se através do espaço de ar entre os enrolamentos de cada fase (ϕ_{dispR} , ϕ_{dispS} e ϕ_{dispT});
- fluxos nas culatras superior e inferior do núcleo de ferro que interligam as três colunas principais do núcleo trifásico (ϕ_{sRS} , ϕ_{sST} , ϕ_{iRS} e ϕ_{iST}).

É importante ressaltar, que para os modelos desenvolvidos dos transformadores, o fluxo entre as culatras superior e inferior, que se fecha externamente ao núcleo de ferro, através do ar, foi desconsiderado, uma vez que para o tipo de estudo desenvolvido neste trabalho, estes são irrelevantes.

O circuito magnético equivalente do modelo do transformador implementado no simulador, com as forças magnetomotrizes e relutâncias em correspondência com as vias de fluxo magnético está ilustrado na figura 5.10.

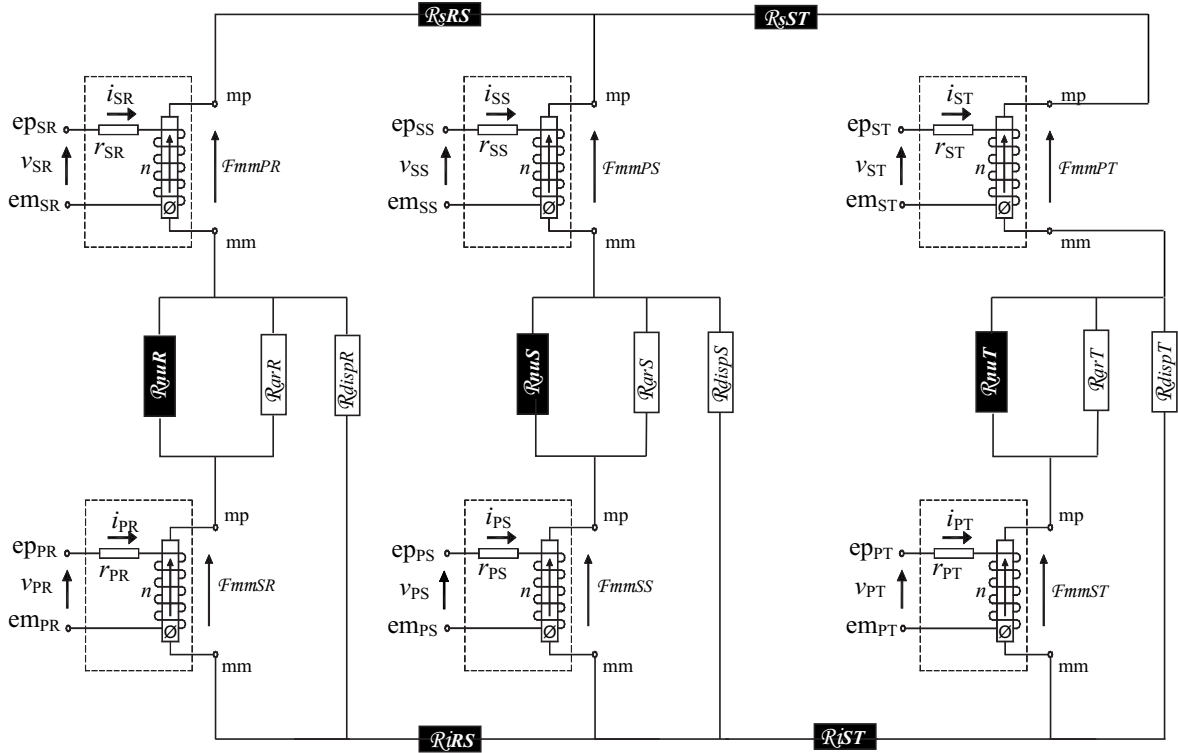


Figura 5.10: Modelo eletromagnético do transformador trifásico de três colunas e dois enrolamentos concêntricos por fase.

As relutâncias não lineares do material ferromagnético (representadas pelos retângulos em negrito) correspondem às:

- relutâncias das colunas de material ferromagnético envolvidas pelos enrolamentos das fases R, S e T ($\mathcal{R}_{nuR}$, $\mathcal{R}_{nuS}$ e $\mathcal{R}_{nuT}$);
- relutâncias das culatras de material ferromagnético que interligam as três colunas principais do núcleo trifásico ($\mathcal{R}_{sRS}$, $\mathcal{R}_{sST}$, $\mathcal{R}_{iRS}$ e $\mathcal{R}_{iST}$).

As relutâncias lineares (representadas pelos retângulos vazios) correspondem às:

- relutâncias do espaço de ar entre as colunas de material ferromagnético e o enrolamento interno em cada fase ($\mathcal{R}_{arR}$, $\mathcal{R}_{arS}$ e $\mathcal{R}_{arT}$);

- relutâncias de dispersão entre os enrolamentos de uma mesma fase ($\mathcal{R}_{dispR}$, $\mathcal{R}_{dispS}$ e $\mathcal{R}_{dispT}$).

O transformador de distribuição foi simulado sob diversas condições operativas e os resultados obtidos estão descritos e analisados na sequência para cada situação estudada.

- **Caso A:** Simulações com o transformador sob carga nominal operando em regime permanente

Para a realização dos estudos computacionais do transformador operando sob carga nominal utilizou-se uma carga trifásica equilibrada, com características puramente resistivas. A corrente nominal requerida pela carga, nas três fases foi de 39,36 A determinada a partir dos dados de placa do transformador. A simulação foi realizada alimentando o transformador trifásico conectado em estrela, com uma tensão de 127 V (fase-neutro), como pode ser observado na figura 5.11.

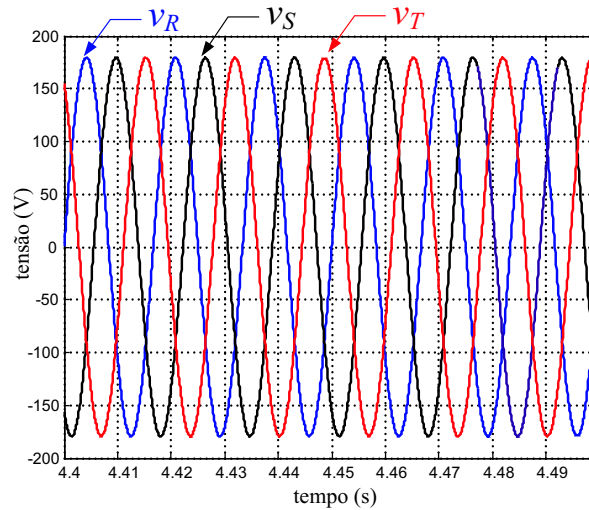


Figura 5.11: *Tensões trifásicas aplicadas ao transformador de 15 kVA.*

A figura 5.12 exibe as formas de onda das correntes trifásicas do equipamento, para operação sob condição nominal.

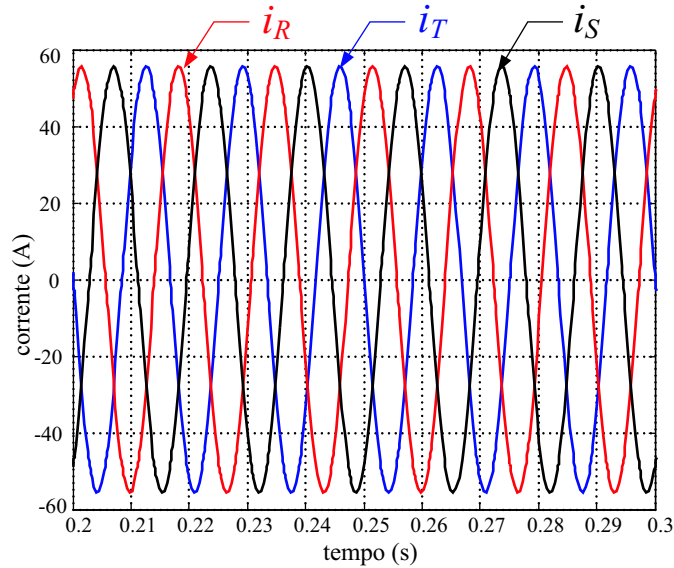


Figura 5.12: Correntes trifásicas em regime permanente: condição nominal.

A forma de onda da densidade de fluxo magnético é mostrada na figura 5.13. O ciclo de histerese do núcleo ferromagnético para a condição nominal está ilustrado na figura 5.14.

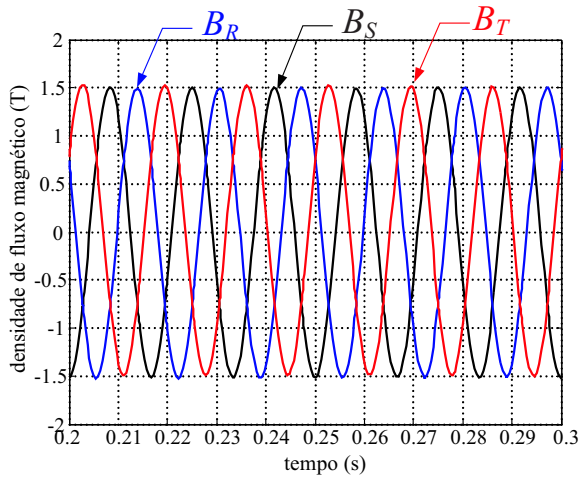


Figura 5.13: Densidade de fluxo magnético no núcleo: condição nominal.

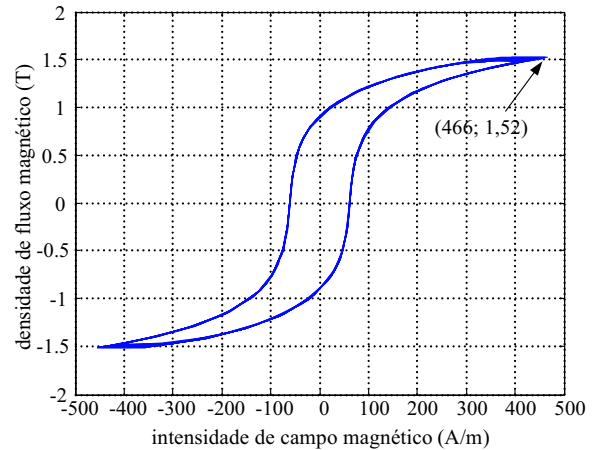


Figura 5.14: Ciclo de histerese da fase R, para o material do núcleo ($V_{FN} = 127V$): condição nominal.

Neste ponto é interessante destacar que, para o caso do FEMM, é possível se implementar apenas a curva de magnetização obtida em ensaios com o transformador. O simulador que utiliza técnicas no domínio do tempo, no entanto, permite a representação do ciclo de histerese do dispositivo sob estudo, obtido através de dados de fabricantes do equipamento ou do material utilizado no núcleo.

Outra questão de suma importância, diz respeito às simulações executadas para condições a vazio do transformador. Da mesma forma como ocorreu no FEMM, essas simulações, embora tenham sido processadas, optou-se por não incluí-las no documento,

uma vez que não são de interesse para o tipo de análise realizado neste trabalho. Entretanto, pôde-se observar, o bom desempenho do modelo implementado também para condição operativa a vazio.

A figura 5.15 mostra a densidade de fluxo de dispersão na região entre os dois enrolamentos concêntricos. A relutância do caminho de dispersão foi obtida através da representação do *template core.sin* por uma relutância linear. A figura permite observar a simetria entre as três fases de transformador, atribuído ao fato de este ser constituído de enrolamentos concêntricos e que possuem as mesmas dimensões físicas. O valor de pico da densidade de fluxo de dispersão nas três fases, para este caso nominal, mostrados na figura é de 29,78 mT.

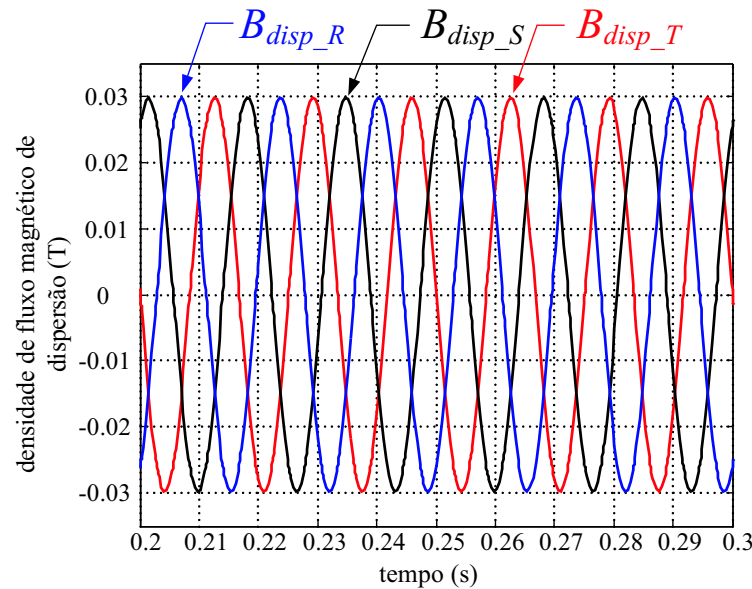


Figura 5.15: *Densidade de fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos: carga nominal.*

As forças radiais médias para as três fases do transformador são determinadas a partir da equação 5.20. As formas de onda das forças radiais nos enrolamentos interno e externo, para a fase R, estão ilustradas na figura 5.16.

As forças radiais para as fases S e T são mostradas nas figuras 5.17 e 5.18.

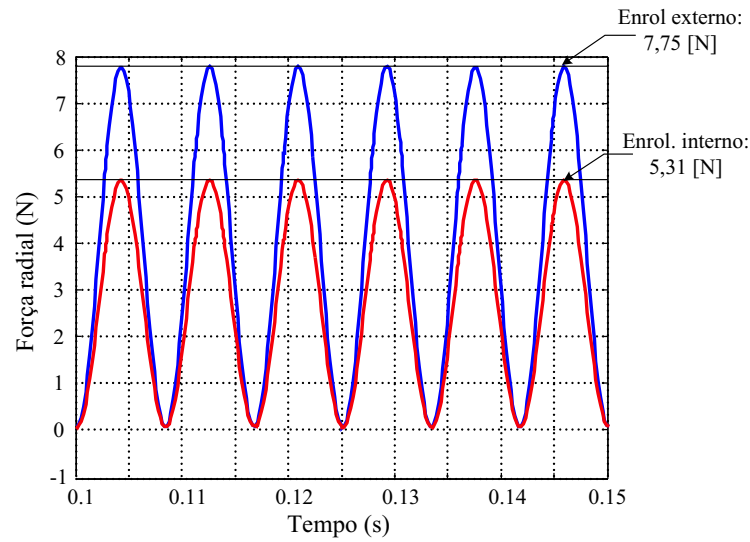


Figura 5.16: *Forças radiais nos enrolamentos da fase R: carga nominal.*

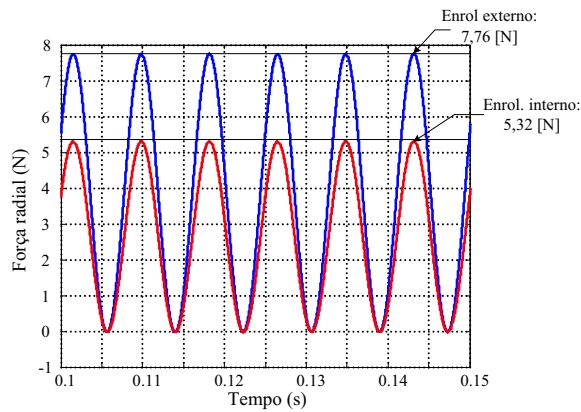


Figura 5.17: *Forças radiais nos enrolamentos da fase S: carga nominal.*

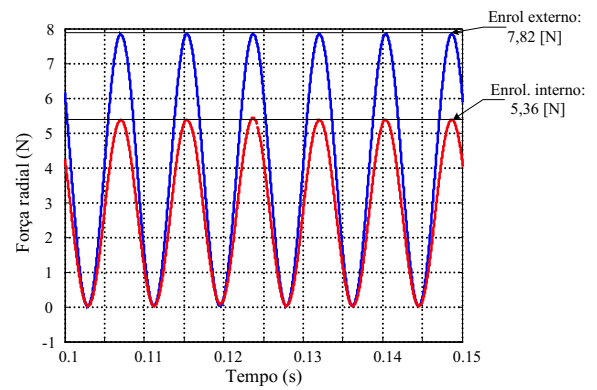


Figura 5.18: *Forças radiais nos enrolamentos da fase T: carga nominal.*

Pode-se constatar nas figuras que as forças eletromagnéticas dos enrolamentos externo e interno têm valores aproximadamente iguais nas três fases, respectivamente. Sendo que o valor da força de tração radial para as bobinas externas das três fases é de aproximadamente 7,70 N e a força de compressão radial para as bobinas internas é de 5,30 N.

Muito embora a amplitude da densidade de fluxo magnético de dispersão e as forças eletromagnéticas apresentem valores relativamente baixos para a condição nominal, estas grandezas serão tomadas como referência para fins de comparação às outras situações operativas simuladas. Quanto aos cálculos dos estresses mecânicos, estes não serão apresentados, pois seus valores são insignificantes para o equipamento analisado.

- **Caso B:** Simulações com o transformador operando durante uma situação transitória de curto-circuito

Este item apresenta as simulações com o transformador submetido a um curto-circuito trifásico, uma vez que este é considerado o tipo de falta que origina os mais elevados picos de corrente, e portanto, são responsáveis pelos maiores estresses nos enrolamentos dos transformadores. O curto-circuito foi aplicado diretamente aos terminais da BT do equipamento.

A figura 5.19 mostra as tensões trifásicas de alimentação do transformador, quando da imposição do curto-circuito trifásico no lado de BT do transformador, em $t=200$ ms, quando a tensão na fase R passa pelo seu valor nulo. O afundamento observado na figura, em decorrência do curto-circuito imposto, é um efeito característico da ocorrência de faltas trifásicas e trifásicas à terra.

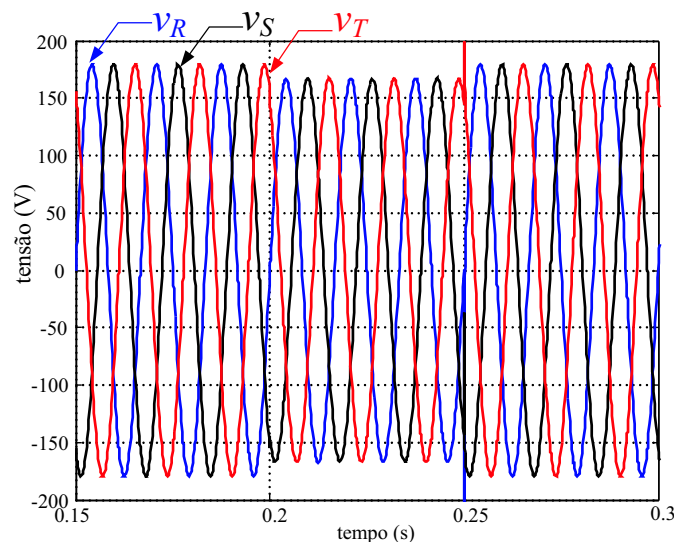


Figura 5.19: *Tensões nas três fases do transformador: curto-circuito trifásico.*

A figura 5.20 ilustra os oscilogramas de corrente das três fases do lado da AT do transformador. Observa-se que, em decorrência do instante da aplicação do curto-circuito, o maior pico de corrente é verificado na fase R, enquanto que, as amplitudes das outras duas fases têm metade desse valor no instante de ocorrência da falta, como se observa na mesma figura. Para o lado de BT do transformador, se verifica uma situação semelhante, onde o valor da corrente na fase R apresenta maior amplitude, conforme mostra a figura 5.21. As figuras permitem observar, ainda, os picos atingidos pelas correntes nas outras duas fases.

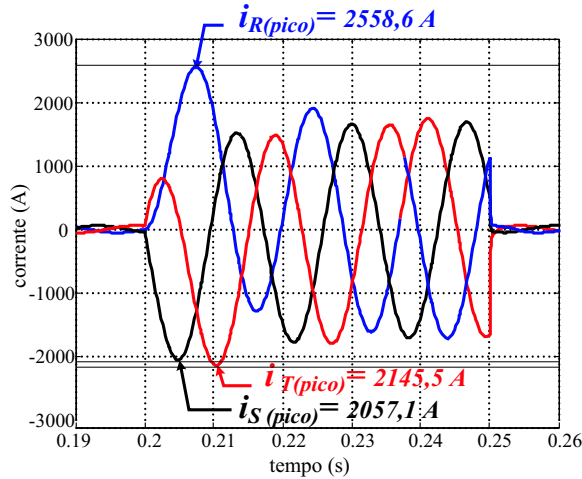


Figura 5.20: Correntes nas três fases da AT: curto-circuito trifásico.

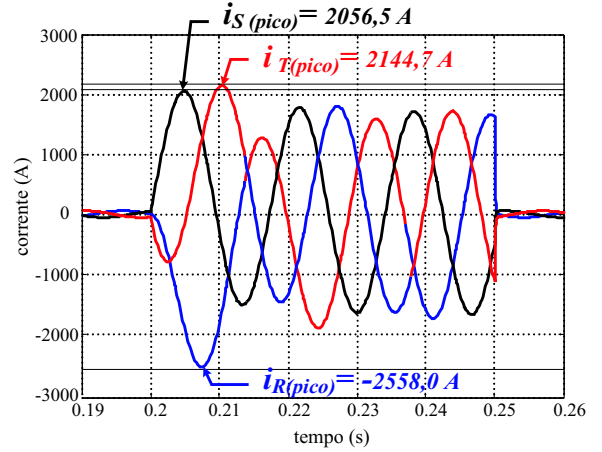


Figura 5.21: Correntes nas três fases da BT: curto-circuito trifásico.

A figura 5.22 mostra o comportamento da densidade de fluxo magnético de dispersão, na região entre os enrolamentos, para as três fases, em decorrência do curto-circuito aplicado.

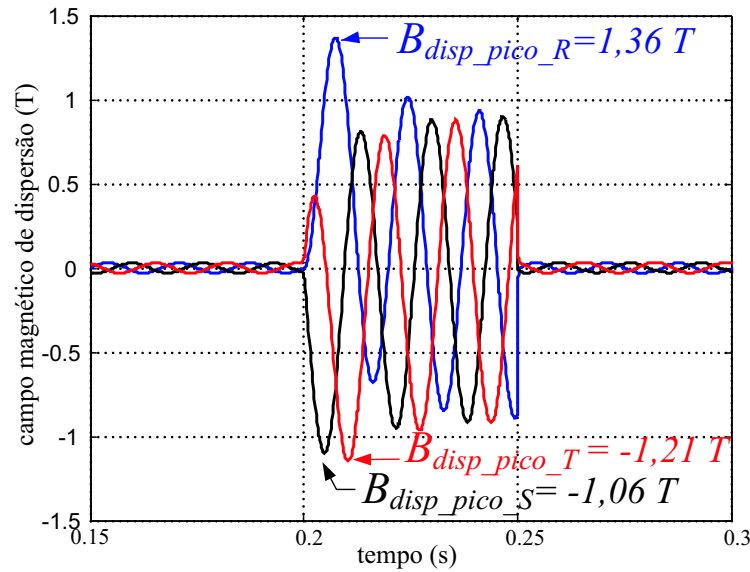


Figura 5.22: Densidade de fluxo de dispersão entre os enrolamentos: curto-circuito trifásico.

Pode-se verificar na figura, que a densidade de fluxo magnético de dispersão entre as bobinas da AT e BT da fase R alcança um valor de pico em torno de 1,36 T, bastante superior ao resultado do caso anterior (29 mT). Observa-se que o valor fornecido da dispersão magnética, para a condição de curto-circuito, é da ordem de magnitude atingida pela densidade de fluxo magnético que se estabelece no núcleo ferromagnético do transformador (figura 5.13) para a condição de operação normal do equipamento.

As forças radiais nos enrolamentos interno e externo da fase R estão ilustradas na figura 5.23.

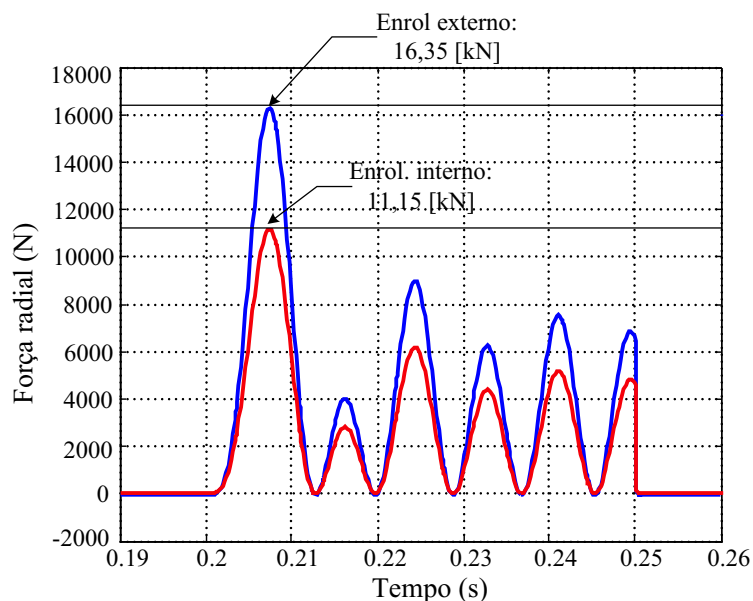


Figura 5.23: *Forças radiais nos enrolamentos concêntricos na fase R: curto-circuito.*

Os valores máximos atingidos pelas forças para esta condição operativa, tanto do enrolamento interno como externo, mostram-se com valores cerca de duas mil vezes maiores do que àquelas alcançadas na condição nominal. Este expressivo aumento verificado nas forças, obviamente, deve-se ao forte incremento ocorrido com as correntes durante o curto-circuito e com as correspondentes densidade de fluxo de dispersão. Assim, a força de tração radial no enrolamento externo tem um valor de pico de cerca de 16,35 kN e na bobina interna a amplitude da força de compressão é de aproximadamente 11,15 kN.

As forças radiais verificadas para as fases S e T estão mostradas nas figuras 5.24 e 5.25. As observações feitas para a fase R, com respeito aos valores máximos atingidos, respeitadas as devidas proporções, aplicam-se também a estas duas fases. Sendo que o valor de pico atingido para a força de tração radial no enrolamento externo da fase B é de 10,60 kN e para a força de compressão do enrolamento interno é de 7,23 kN, ou seja, houve uma intensificação de cerca de 1300 vezes, em relação a força determinada no caso nominal. Para o enrolamento externo da fase C o valor máximo da força é de 11,54 kN e no enrolamento interno esse valor atinge cerca de 7,87 kN, atingindo, dessa forma, uma intensificação de aproximadamente 1400 vezes.

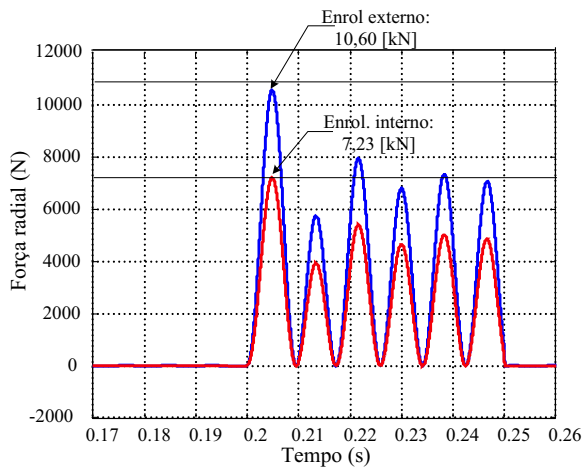


Figura 5.24: Forças radiais nos enrolamentos concêntricos na fase S: curto-circuito.

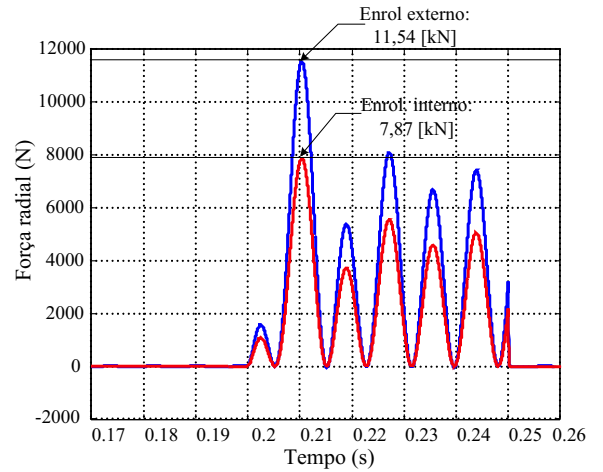
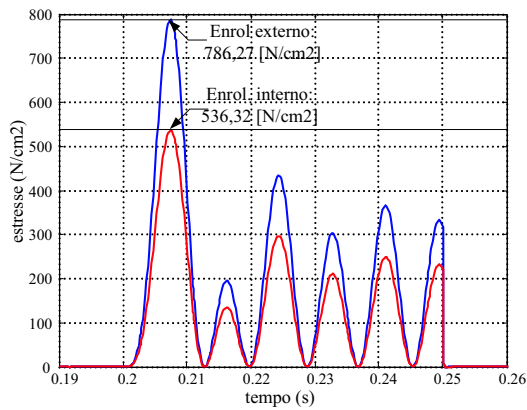
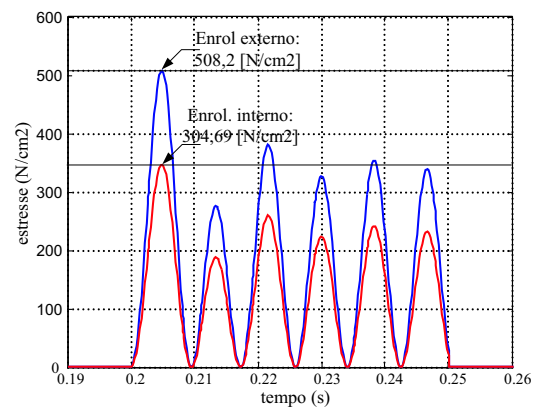


Figura 5.25: Forças radiais nos enrolamentos concêntricos na fase T: curto-circuito.

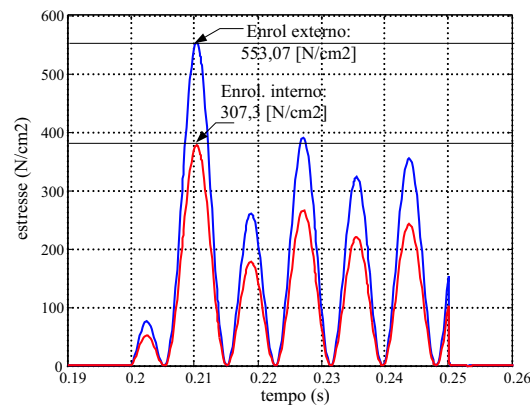
A figura 5.26 mostra as formas de onda dos estresses em função do tempo para os enrolamentos da AT e da BT nas três fases do transformador de 15 kVA.



(a) Fase R



(b) Fase S



(c) Fase T

Figura 5.26: Estresses eletromecânicos nos enrolamentos da AT e BT do transformador de 15 kVA: curto-circuito.

Pode-se observar que o máximo pico do estresse de tração ocorre no enrolamento que fica submetido ao maior valor da força radial. Assim, o enrolamento da AT da

fase R possui um estresse de $786,27 \text{ N/cm}^2$ e o enrolamento da BT tem valor de $536,32 \text{ N/cm}^2$. Os valores de máximo de estresse para as fases S e T são, respectivamente, $508,2 \text{ N/cm}^2$ e $553,07 \text{ N/cm}^2$ para a AT e $304,69 \text{ N/cm}^2$ e $307,7 \text{ N/cm}^2$ na BT.

• **Caso C: Energização do transformador a vazio**

Os estudos previstos para esta situação de operação do transformador de 15 kVA têm por objetivo apenas mostrar as correntes de *inrush* que circulam no enrolamento energizado para efeito de comparação com a situação similar do transformador de potência. As análises de estresses não estão previstas para esta condição, uma vez que o transformador em questão opera em vazio, não existindo, portanto, as forças radiais e os estresses de compressão radial. Apenas as componentes da força axial estão presentes nessa situação. No entanto, os estudos desenvolvidos neste trabalho não contemplam o cálculo das componentes axiais das forças.

Outrossim, é importante observar que, a condição analisada neste item refere-se a uma situação de operação a vazio e sem magnetismo residual.

A figura 5.27 mostra as correntes transitórias de magnetização nas três fases em decorrência da energização do transformador.

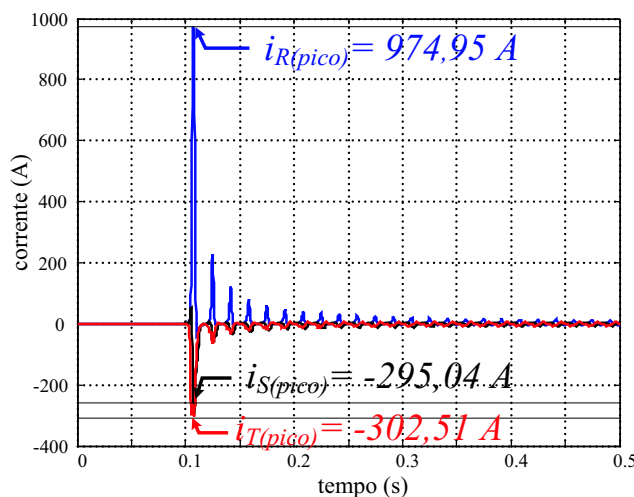


Figura 5.27: Correntes trifásicas resultantes da energização do transformador.

Pode-se observar que o valor de pico da corrente das três fases é bastante superior ao valor das correntes alcançadas durante operação nominal do transformador. No entanto, este é inferior ao valor máximo da corrente proveniente do curto-circuito trifásico mostrado no caso B.

A densidade de fluxo de dispersão nas três fases estão ilustrados na figura 5.28. Pode-se observar que, os valores de pico das densidades de fluxo de dispersão nos

espaços entre os enrolamentos superam os máximos obtidos para condição nominal.

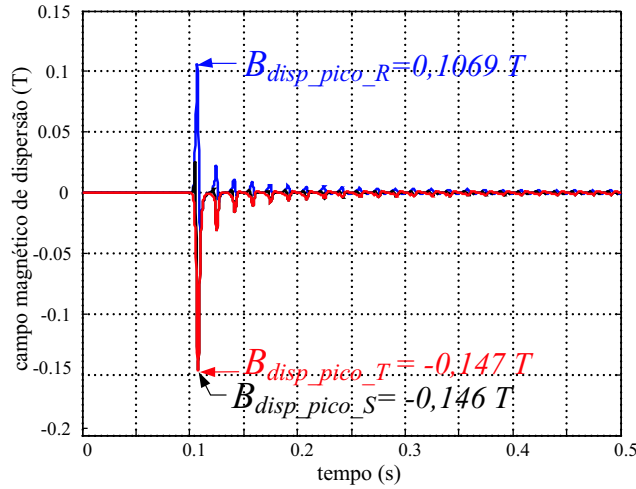


Figura 5.28: Densidade de fluxo magnético de dispersão durante o regime transitório de energização.

5.4.2 Resultados das simulações do transformador de potência

Utilizando os princípios da modelagem de transformadores dentro da filosofia empregada no simulador do domínio do tempo apresentados anteriormente, o modelo magnético equivalente do transformador de 100 MVA que foi implementado é constituído de forças magnetomotrizas e relutâncias para cada uma das colunas e culatras, conforme pode ser verificado na figura 5.29 [46] que representa o modelo simulado.

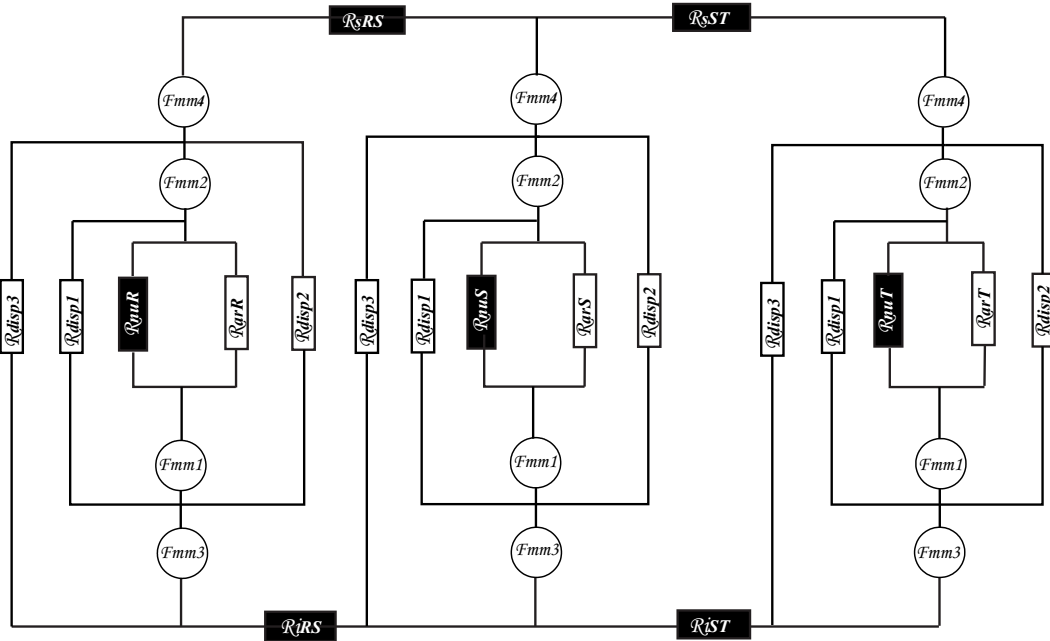


Figura 5.29: Modelo equivalente do transformador de 100 MVA.

O transformador em questão, encontra-se caracterizado na tabela 4.4 do capítulo 4. Não obstante, é oportuno relembrar que o equipamento é do tipo trifásico com quatro

enrolamentos por fase, com uma potência de 100 MVA e tensão nominal de 230 kV. As relutâncias não lineares do material ferromagnético (representadas pelos retângulos em negrito) correspondem às:

- relutâncias das colunas de material ferromagnético envolvidas pelos enrolamentos das fases R, S e T ($\mathfrak{R}_{nuR}$, $\mathfrak{R}_{nuS}$ e $\mathfrak{R}_{nuT}$);
- relutâncias das culatras de material ferromagnético que interligam as três colunas do núcleo trifásico ($\mathfrak{R}_{sRS}$, $\mathfrak{R}_{sST}$, $\mathfrak{R}_{iRS}$ e $\mathfrak{R}_{iST}$).

As relutâncias lineares (representadas pelos retângulos vazios) correspondem às:

- relutâncias do espaço de ar entre as colunas de material ferromagnético e o enrolamento interno em cada fase ($\mathfrak{R}_{arR}$, $\mathfrak{R}_{arS}$ e $\mathfrak{R}_{arT}$);
- relutâncias de dispersão entre os enrolamentos de uma mesma fase para cada fase ($\mathfrak{R}_{disp1}$, $\mathfrak{R}_{disp2}$ e $\mathfrak{R}_{disp3}$).

As relutâncias e as áreas envolvendo os enrolamentos concêntricos, podem ser calculadas de acordo com as equações 5.4 e 5.5.

O transformador foi submetido às diversas condições de operação, mencionadas anteriormente, e os resultados das simulações obtidas para as várias condições analisadas estão descritos na sequência.

- **Caso A:** Simulações com o transformador sob carga nominal operando em regime permanente

A carga utilizada para execução das simulações do transformador sob condição operativa nominal foi uma carga trifásica equilibrada, com características puramente resistivas.

As figuras 5.30 e 5.31 exibem as formas de onda das correntes trifásicas nos enrolamentos do equipamento, para a situação sob análise. Pode-se observar nas figuras que as correntes nas três fases dos enrolamentos de AT e de BT fornecidas pelo simulador foram 252 A e 418 A, respectivamente. Ressalta-se que, os enrolamentos das três fases têm características físicas e elétricas idênticas e, portanto, apenas serão apresentados os resultados referentes à fase R dos casos investigados.

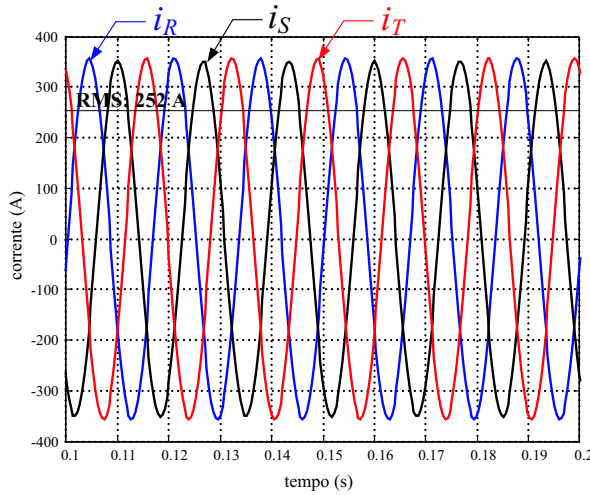


Figura 5.30: Formas de onda das correntes trifásicas da AT: condição nominal.

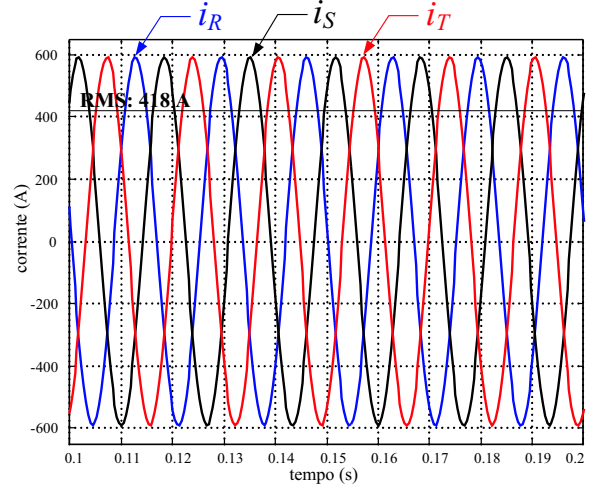


Figura 5.31: Formas de onda das correntes trifásicas da BT: condição nominal.

A forma de onda da indução magnética obtida no material ferromagnético está ilustrada na figura 5.32. O laço de histerese correspondente às perdas totais no núcleo é mostrado na figura 5.33. Pode-se observar que a máxima densidade de fluxo magnética obtida é de 1,6 T.

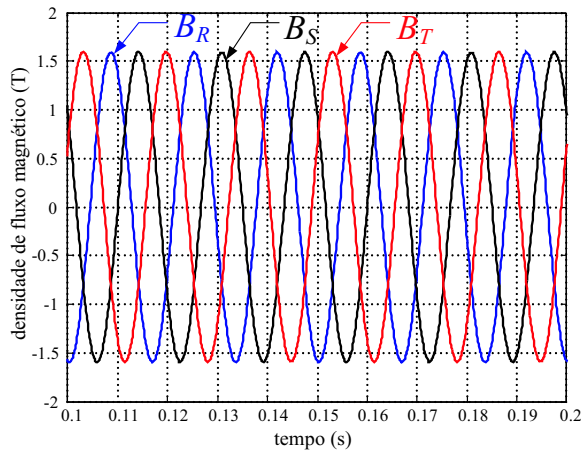


Figura 5.32: Densidade de fluxo magnético no núcleo: condição nominal.

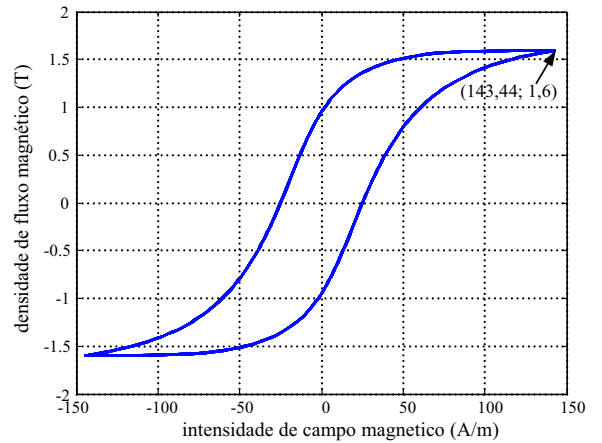


Figura 5.33: Ciclo de histerese na fase R para o material do núcleo: condição nominal.

A figura 5.34 mostra as densidades de fluxo de dispersão nas três regiões entre os quatro enrolamentos da AT e BT da fase R. Pode-se notar que as três regiões estão envolvidas em densidades de fluxo de dispersão diferentes, uma vez que os enrolamentos possuem características físicas e elétricas distintas. Deve-se ressaltar que, devido às características físicas idênticas dos enrolamentos das três fases, as densidades de fluxo de dispersão para as fases S e T são similares às mostradas para a fase R.

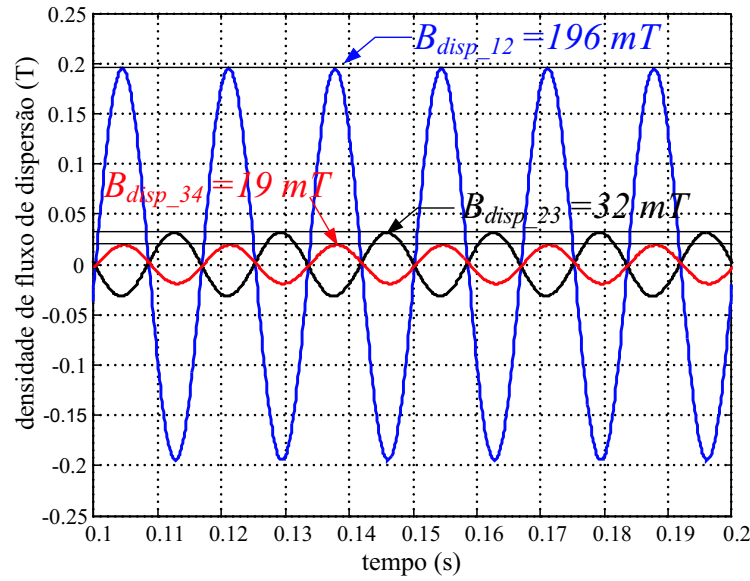
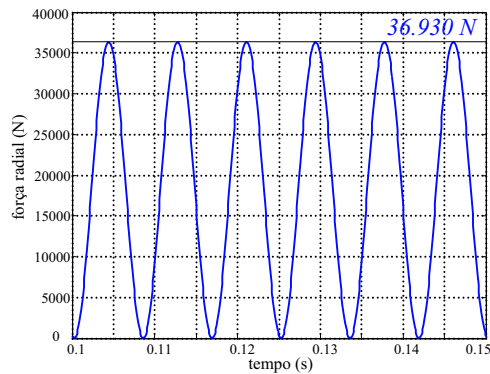
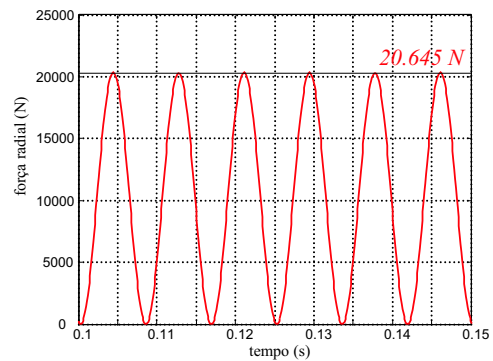


Figura 5.34: Densidade de fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos: condição nominal.

Uma vez calculadas as correntes nos enrolamentos e as densidades de fluxo magnético de dispersão, as formas de onda das forças radiais podem ser calculadas para os quatro enrolamentos concêntricos. Essas forças, em função do tempo, estão ilustradas na figura de 5.35 para os enrolamentos da 2 da AT e 1 e da BT da fase R, respectivamente. Ressalta-se que, são apresentados os gráficos das forças apenas para os enrolamentos onde essas têm valores mais elevados.



(a) Enrolamento 2



(b) Enrolamento 1

Figura 5.35: Forças radiais nos enrolamentos 2 da AT e 1 da BT: condição nominal.

As forças radiais no enrolamento 2 da AT atinge um valor máximo de 36,93 kN e para o enrolamento 1 da BT é de 20,64 kN.

- **Caso B:** Simulações com o transformador operando durante uma situação transitória de curto-circuito

Os estudos realizados para esta condição de operação foram viabilizados submetendo os terminais da BT do transformador de potência a um curto-circuito trifásico a terra em condições similares àsquelas mencionadas para o transformador de 15 kVA.

Os oscilogramas de corrente nas três fases do lado da BT são mostrados na figura 5.36. Pode-se notar que o pico de corrente mais elevado é experimentado pela fase R, uma vez que a aplicação do curto-circuito ocorre no instante em que a tensão na referida fase intercepta o eixo das abscissas. A figura 5.37 ilustra as formas de onda das correntes trifásicas correspondentes ao lado da AT.

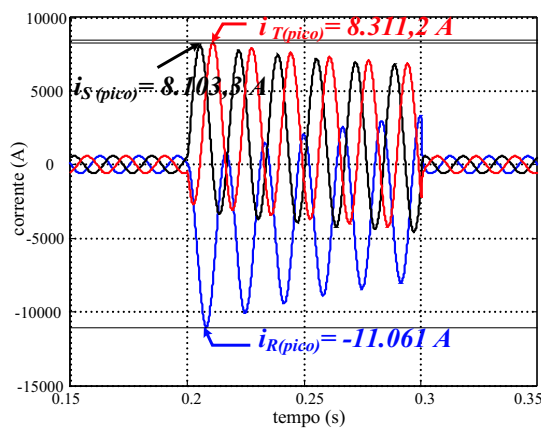


Figura 5.36: Formas de onda das correntes trifásicas na BT: curto-circuito.

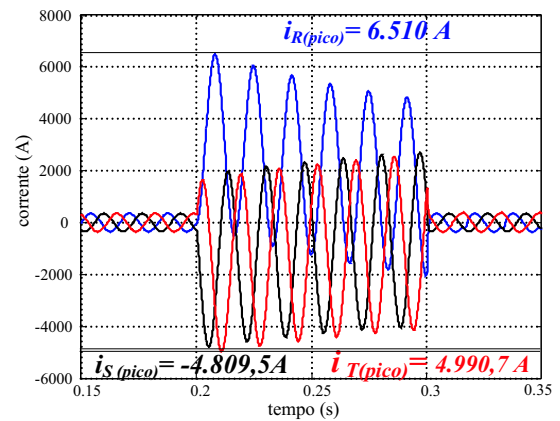


Figura 5.37: Formas de onda das correntes trifásicas na AT: curto-circuito.

As densidades de fluxo magnético nos espaços entre os quatro enrolamentos são mostradas na figura 5.38. Pode-se notar que, o valor máximo da densidade de fluxo magnético de dispersão está em torno de 3,56 T, sendo bastante superior ao valor correspondente atingido durante a operação nominal do transformador (194,8 mT).

Ressalta-se que, uma vez que os quatro enrolamentos possuem geometrias distintas, as densidades de fluxo magnético de dispersão nos espaços entre eles, também são distintas.

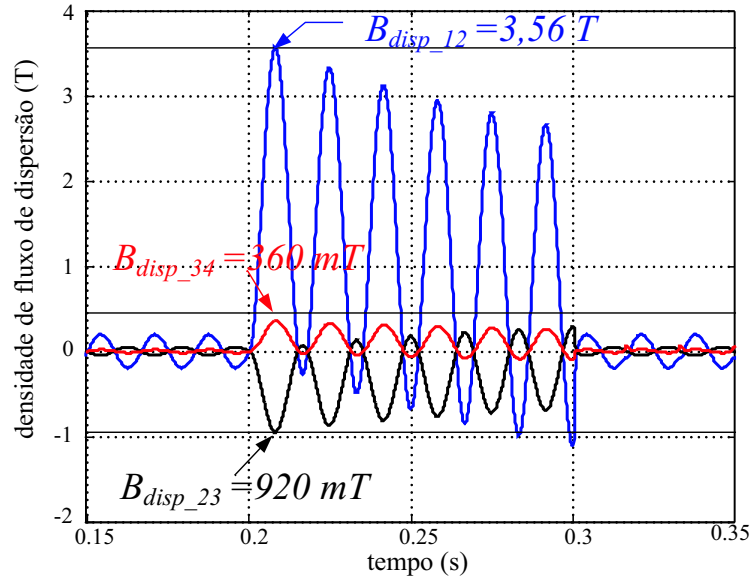
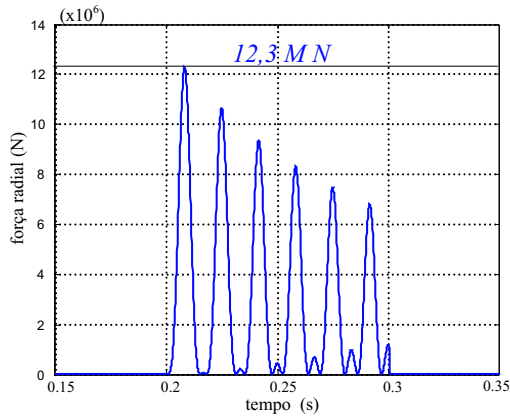
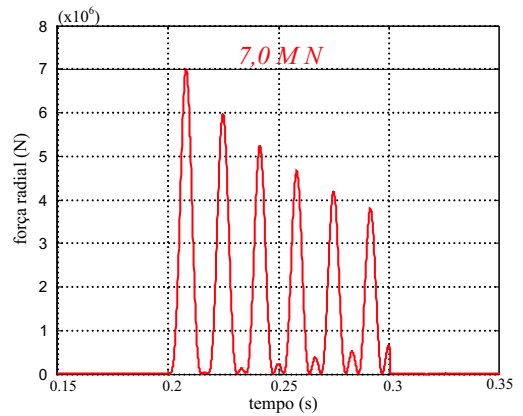


Figura 5.38: Densidade de fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos concêntricos: curto-circuito.

As forças radiais a que ficam submetidos os enrolamentos da 2 da AT e 1 da BT estão ilustradas na figura 5.39.



(a) Enrolamento 2



(b) Enrolamento 1

Figura 5.39: Forças radiais nos enrolamentos 2 da AT e 1 da BT: curto-circuito.

Como era de se esperar, as forças radiais médias para o transformador de 100 MVA alcançam valores mais elevados do que as observadas no transformador de distribuição, uma vez que as correntes em transformadores de potência são consideravelmente mais altas. Assim, pode-se observar na figura que a força radial média mais elevada ocorre no enrolamento 2 da AT e atinge aproximadamente de 12,3 MN, enquanto que, no enrolamento 1 da BT equivale a 7 MN.

Os estresses de tração referentes ao transformador de 100 MVA estão ilustrados na figura 5.40 para situação de curto-circuito. São representados os estresses dos enrola-

mentos 1 da BT e 2 da AT nas três fases, uma vez que, nestas bobinas as correntes são mais altas.

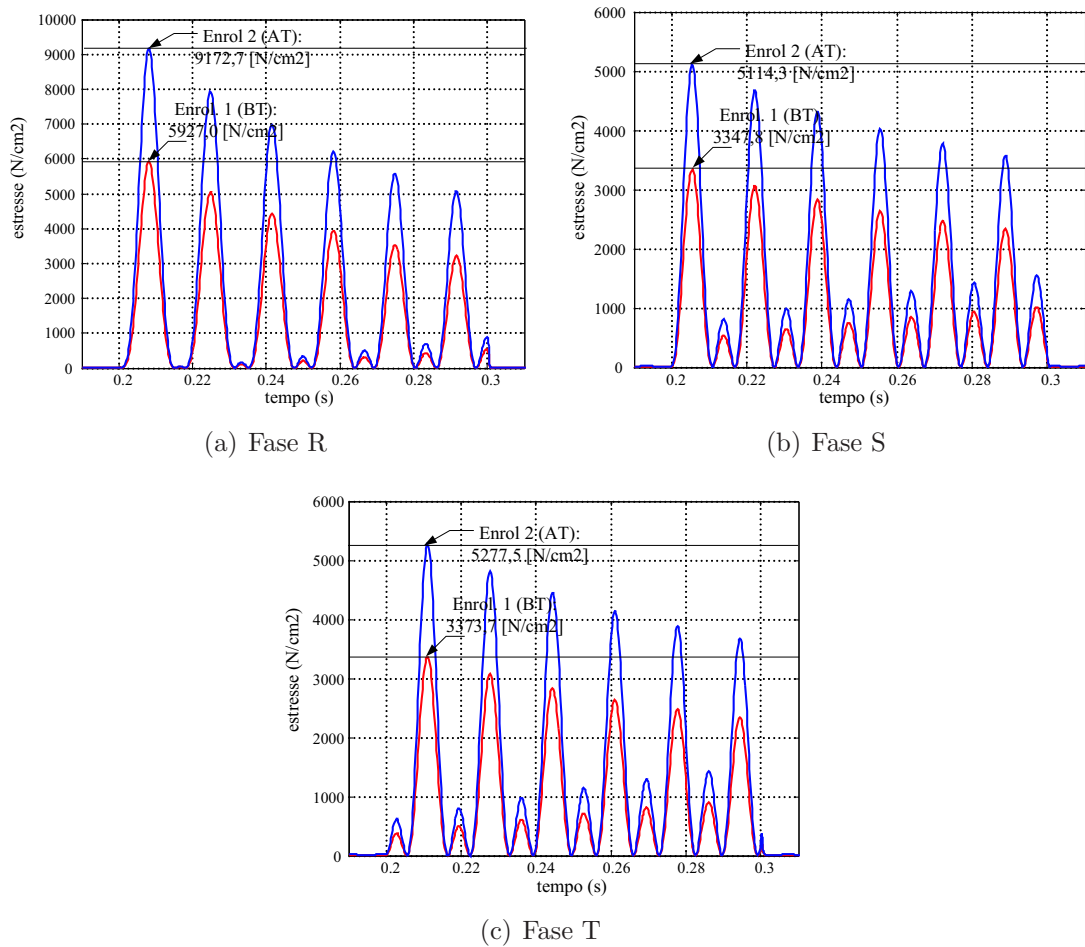


Figura 5.40: *Estresses eletromecânicos nos enrolamentos da AT e BT do transformador de 100 MVA: curto-circuito.*

Como era previsto, os valores de pico dos estresses do transformador de 100 MVA são substancialmente superiores aos do transformador de 15 kVA, uma vez que os níveis de correntes são bem mais elevados. Durante o curto-circuito trifásico, o enrolamento da AT da fase R do transformador de potência experimenta o maior esforço, alcançando o valor de $9,17 \text{ kN/cm}^2$ e o enrolamento da BT da mesma fase possui um estresse de $5,92 \text{ kN/cm}^2$.

- **Caso C:** Simulações do transformador sendo energizado com corrente de *inrush*

As simulações referentes às correntes de *inrush* no transformador de potência têm por objetivo avaliar o efeito das correntes de energização sobre os esforços eletromecânicos no enrolamento energizado.

Preliminarmente, é importante observar que o transformador investigado possui quatro enrolamentos concêntricos por fase, sendo dois da AT e dois da BT. Assim,

os estresses calculados são referentes aos estresses de tração radial entre os dois enrolamentos da AT. No entanto, apenas os esforços do enrolamento 2, que possui maior força magnetomotriz serão apresentados.

Comparativamente aos transformadores de distribuição, as correntes de energização tendem a ser mais comuns nos transformadores de potência devido a ocorrência freqüente de eventos de energização e desenergização desses equipamentos.

As elevadas correntes de magnetização provenientes da energização do transformador a vazio estão ilustradas na figura 5.41.

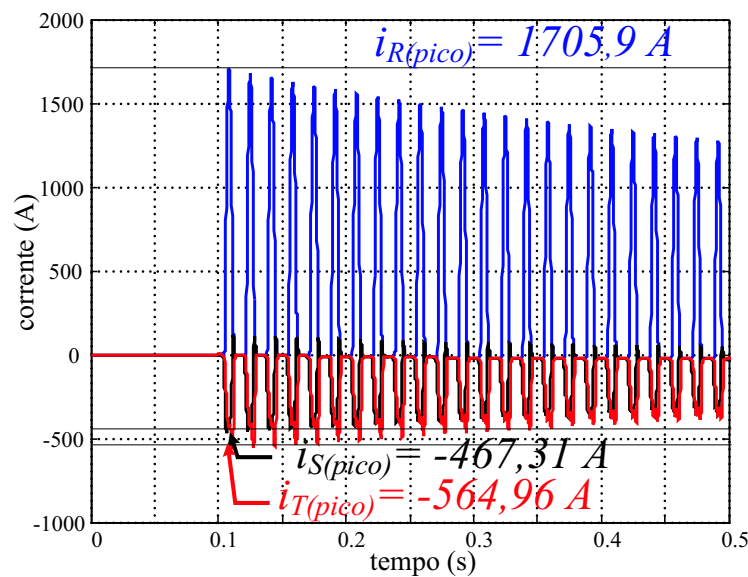


Figura 5.41: Correntes de inrush das fases R, S e T durante os primeiros 500ms de simulação.

Pode-se notar na figura que, a corrente de *inrush* das fases R, S e T do enrolamento energizado possuem valores superiores às correspondentes ao caso nominal. E embora esses valores para condição de *inrush* sejam inferiores as correntes obtidas para a simulação do curto-circuito, pode-se observar na figura que o tempo de permanência do evento é maior para a situação de energização.

As densidades de fluxo de dispersão entre os enrolamentos estão ilustrados na figura 5.42. Obviamente, no equipamento analisado também encontra-se valores de densidade de fluxo de dispersão superiores para a situação de *inrush*, comparativamente, ao caso de operação nominal.

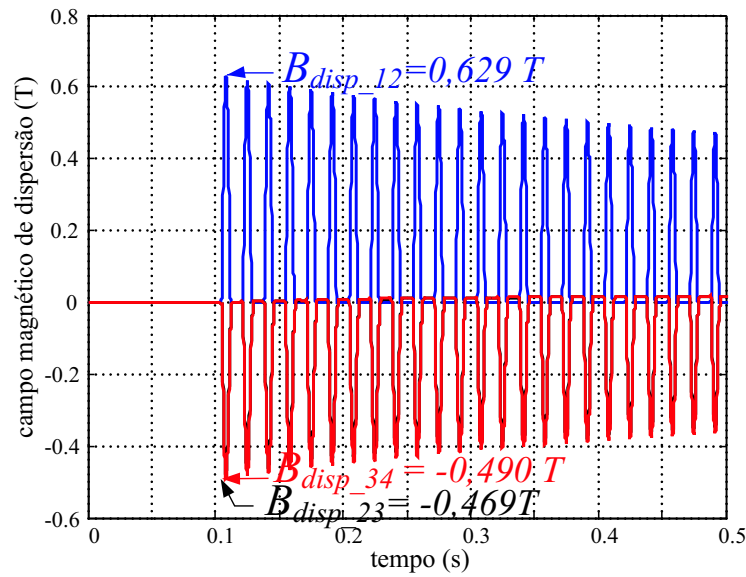


Figura 5.42: Campos magnéticos de dispersão durante o regime transitório de energização.

As forças eletromagnéticas no enrolamento 2 são mostradas na figura 5.43. A força no enrolamento 4 foi omitida, uma vez que esta tem valor bem inferior nesta bobina.

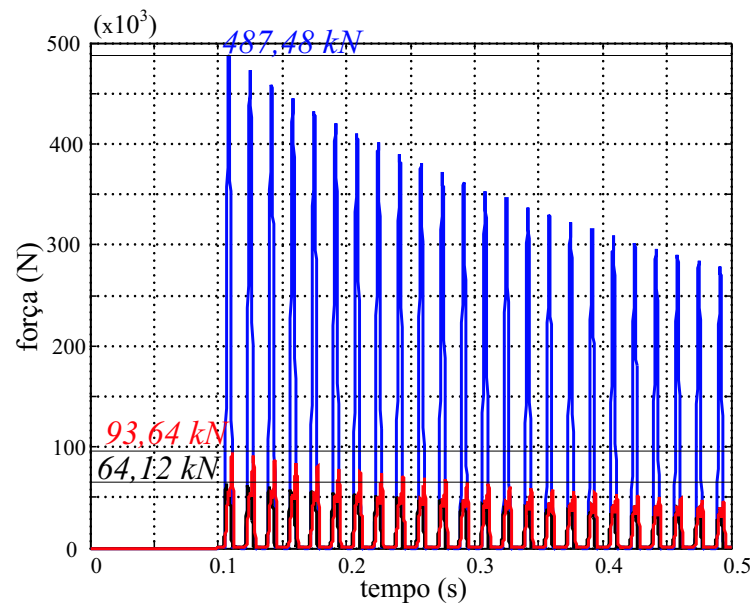


Figura 5.43: Forças oriundas da corrente de energização no enrolamento 2 das fases R, S e T.

Pode-se notar que, o enrolamento 2 é submetido ao valor máximo da força. O valor de 487 kN encontrado para situação de energização é bastante superior aos 36 kN verificados na mesma fase para a condição nominal.

Os estresses decorrentes das correntes de *inrush* no enrolamento 2 das três fases são mostrados na figura 5.44.

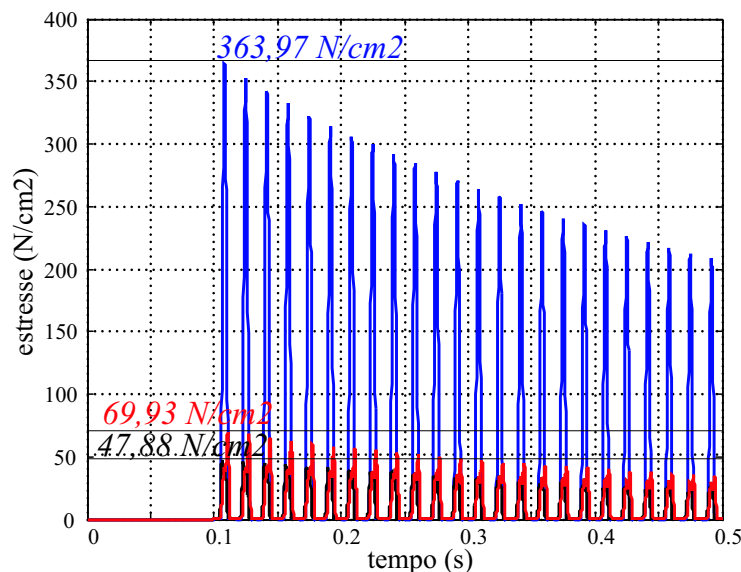


Figura 5.44: Estresse de tração produzido pelas correntes de *inrush* no transformador de 100 MVA.

Os esforços ocasionados pelas correntes de *inrush* apresentaram-se menores quando comparados aos provocados pelas correntes oriundas do curto-circuito trifásico, uma vez que as forças eletromagnéticas para situação de *inrush* são inferiores.

5.5 Síntese dos resultados

Este item propõe-se a estabelecer uma comparação entre as duas estratégias numéricas empregadas nesta tese. Para tanto, a tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos para as simulações com o transformador de 15 kVA realizadas com o simulador no domínio do tempo e o FEMM. Os resultados são apresentados para a condição nominal de operação e para a condição de curto-circuito.

Tabela 5.2: Comparação entre as simulações da condição nominal e curto-circuito: transformador de 15 kVA

		Domínio do tempo		FEMM	
		Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Corrente máxima nominal [A]		55,7	2558	55,7	2558
Densidade de fluxo de dispersão [T]		$29,78 \times 10^{-3}$	1,36	29×10^{-3}	1,36
Densidade de fluxo no núcleo [T]		1,52	0,9	1,50	0,30
Força radial [N]	Enrol. externo	7,75	16350	6,89	14800
	Enrol. interno	5,31	11150	5,73	11690

A tabela 5.3 apresenta as mesmas análises anteriores, porém para o transformador de 100 MVA.

Tabela 5.3: *Comparação entre as simulações da condição nominal e curto-circuito: transformador de 100 MVA*

		<i>Domínio do tempo</i>		<i>FEMM</i>	
		<i>Caso A</i>	<i>Caso B</i>	<i>Caso A</i>	<i>Caso B</i>
Corrente máxima nominal [A]		355	6510	355	6640
Densidade de fluxo de dispersão [T]		196×10^{-3}	3,56	200×10^{-3}	3,76
Densidade de fluxo no núcleo [T]		1,60	1,24	1,61	1,32
<i>Força radial [N]</i>	Enrol. externo	36930	12300×10^3	36890	12600×10^3
	Enrol. interno	20645	7000×10^3	20580	7060×10^3

Os resultados fornecidos pelas duas estratégias de estudo mostraram uma boa correlação entre as grandezas disponibilizadas pelos dois métodos para as duas condições de operação comparadas. Os resultados se mantêm coerentes tanto para as simulações do transformador de distribuição quanto para o transformador de potência. Isto permite concluir que, o desempenho do *software* no domínio do tempo é apropriado para calcular os esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores.

Diante desse fato, foram realizadas simulações para uma terceira condição de operação dos transformadores com o objetivo de calcular os esforços provenientes das correntes de *inrush*. Estes estudos foram desenvolvidos apenas utilizando a estratégia no domínio do tempo. Os resultados estão sintetizados na tabela 5.4.

Tabela 5.4: *Síntese dos resultados do caso C (inrush): transformador de 15 kVA e 100 MVA*

		<i>Domínio do tempo</i>	
		<i>Caso C: corrente de inrush</i>	
		<i>15 kVA</i>	<i>100 MVA</i>
Corrente máxima [A]		975,95	1705,90
Densidade de fluxo de dispersão [T]		$106,90 \times 10^{-3}$	629×10^{-3}
<i>Força radial [N]</i>	Enrol. externo	660,78	$487,50 \times 10^3$

A tabela 5.5 mostra os resultados fornecidos pelo simulador no domínio do tempo para os estresses de tração radial.

Tabela 5.5: *Síntese dos resultados dos estresses de tração radial: transformador de 15 kVA e 100 MVA*

Condição de Operação	<i>Domínio do tempo</i>			
	<i>Estresse de tração radial (N/m₂)</i>			
	<i>15 kVA</i>		<i>100 MVA</i>	
	<i>Enrol. externo</i>	<i>Enrol. interno</i>	<i>Enrol. 2</i>	<i>Enrol. 1</i>
Curto-circuito	786,27	536,32	9,17x10 ³	5,92x10 ³
<i>Inrush</i>	-	-	363,90	-

Uma comparação dos resultados obtidos para os estresses mecânicos mostram que a condição de curto-circuito apresenta os maiores esforços para os enrolamentos dos transformadores. A condição de *inrush*, embora apresente resultados de estresses superiores à condição nominal, é menos prejudicial aos enrolamentos dos transformadores do que a condição de curto-circuito.

5.6 Considerações finais

Este capítulo destinou-se, sobretudo, a apresentação de uma modelagem computacional para cálculo de forças eletromagnéticas e de estresses mecânicos nos enrolamentos de transformadores empregando, para tanto, um pacote computacional que utiliza técnicas no domínio do tempo. Essa técnica numérica proposta para o desenvolvimento dos estudos utiliza finms e relutâncias magnéticas na modelagem de dispositivos eletromagnéticos e possibilita a simulação de fenômenos de regime permanente e transitório.

Para ilustrar a aplicação do método e destacar suas potencialidades foram realizados estudos utilizando transformadores de distribuição e de potência sob diversas condições de operação. Os resultados foram apresentados através das formas de onda das grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas.

Devido às dificuldades associadas a falta de valores de referência, os resultados dessa técnica numérica foram comparados aos resultados correspondentes extraídos do FEMM. Os cálculos demonstraram que existe uma boa correlação de resultados do desempenho do transformador em condições normais de operação e sob curto-circuito. Portanto, pode-se considerar que a técnica no domínio do tempo é um bom procedimento para cálculo de forças internas e, em consequência, de estresses mecânicos de transformadores.

Outro ponto que merece destaque, refere-se ao cálculo dos estresses decorrentes das correntes de *inrush*. Observou-se que esta condição de operação oferece menos riscos a integridade física dos equipamentos, uma vez que os níveis de estresse originados pelas

correntes de energização, para a situação analisada neste trabalho, estão abaixo dos experimentados durante uma situação de curto-circuito.

Com relação aos estresses de tração decorrentes de curtos-circuitos, confirmou-se que estes têm maior influência nos transformadores de potência devido aos níveis de corrente mais elevados observados nos equipamentos de maior porte.

Por último, salienta-se que as análises dos resultados obtidos neste capítulo são realizadas no capítulo subsequente.

Capítulo 6

Metodologia para Avaliação dos Impactos dos Estresses Mecânicos sobre os Transformadores

6.1 Considerações iniciais

Uma vez que os estresses eletromecânicos em transformadores foram devidamente tratados nos capítulos precedentes, esta etapa da tese destina-se à apresentação de uma metodologia para avaliar a correlação entre esses fenômenos e a vida útil de transformadores.

Sabe-se que transformadores, ao longo de sua vida útil, são submetidos a eventos de curtos-circuitos e operações de energização. As elevadas correntes envolvidas e o tempo de duração, em particular da corrente de “*inrush*”, que é várias vezes superior ao tempo de eliminação dos curtos-circuitos, faz com que esses fenômenos tenham um efeito prejudicial para os enrolamentos dos transformadores. É desejável, portanto, que se faça uma verificação periódica das condições mecânicas do transformador.

Estratégias de monitoração são uma alternativa possível, que contudo, encontram limitações devido a aspectos de ordem econômica e técnica. Uma alternativa plenamente viável para se avaliar o desempenho de equipamentos sob condições diversas de operação, é apoiada nas simulações digitais, utilizando-se modelos de dispositivos reais. Este tipo de estratégia, atualmente, é utilizada por fabricantes desses equipamentos.

Avançando nessa direção, o objetivo do presente capítulo é o de apresentar uma proposta metodológica que auxilie nos trabalhos de avaliação do comprometimento da vida útil de um transformador, decorrentes da exposição a esforços mecânicos adicionais, provocados pelas correntes de energização ou de curto-circuito. Para tanto, a partir de uma grandeza pré-selecionada, a saber, o estresse eletromecânico, busca-se

uma correlação entre as correntes transitórias mencionadas (curto-circuito e *inrush*) e os seus impactos sobre a integridade física de transformadores.

6.2 Generalidades sobre resistência mecânica de transformadores

Os limites de resistência mecânica dos enrolamentos de transformadores a fenômenos como os focados neste trabalho podem ser determinados através da realização de ensaios que, para equipamentos de pequeno porte e custo, podem até mesmo ser de caráter destrutivo.

Ensaio laboratoriais com equipamento de maior porte, a exemplo de transformadores de potência, pode ser uma tarefa de difícil consecução ou até mesmo impossível de se realizar. As dificuldades levantadas, em parte, dizem respeito ao acesso ou até mesmo à inexistência de estruturas capazes de permitir a aplicação de esforços nos níveis exigidos para se verificar os estresses máximos que podem ocorrer em situações reais de operação [25]. Por outro lado, dado o elevado custo desse tipo de equipamento, pode-se tornar restritiva a realização de tais ensaios, pois corre-se o risco de provocar danos que podem, inclusive, inutilizar o equipamento. Obviamente, alternativas para contornar estas questões existem. A título de exemplo, cita-se, que o esforço a que poderia ser submetido o enrolamento de um transformador, pode ser avaliado pela construção de uma espira (ou um conjunto destas) e assim realizar ensaios que permitam obter informações sobre o possível desempenho do equipamento completo, numa situação real.

Os procedimentos adotados para a elaboração do projeto mecânico devem assegurar que os enrolamentos e as estruturas de suporte como um todo, com relação ao material e tipo de construção utilizado, resistirão às forças atuantes e conseqüentes aos estresses mecânicos que surgirão quando o transformador for submetido a esses tipos de fenômenos transitórios. Todas as precauções devem ser tomadas para garantir a integridade futura da unidade. É recomendável que tais procedimentos sejam adotados ou, em caso contrário, testes deverão ser executados nos dispositivos.

A tecnologia para o projeto e execução de transformadores tem evoluído nas últimas décadas, fato que aumenta a garantia de que estes dispositivos estão aptos a resistir aos elevados esforços devidos aos curtos-circuitos. Contudo, problemas ainda podem surgir, particularmente, com unidades que estão em serviço há mais tempo. Um fato

importante relacionado com transformadores ditos “mais velhos”, é que pode ocorrer um significativo encolhimento dos enrolamentos com o envelhecimento, levando a redução da pressão das estruturas de suporte (*clampings*) e, conseqüentemente, diminuição da resistência mecânica aos curtos-circuitos. Assim, as faltas se tornam potencialmente destrutivas, uma vez que, estes sistemas podem não ser capazes de resistir ao movimento dos enrolamentos.

Apesar disso, é esperado que um transformador experimente e sobreviva a um certo número de curtos-circuitos durante o tempo de serviço. Também é perfeitamente possível que mais cedo ou mais tarde, tal evento cause algum movimento suave dos enrolamentos, e, nestes casos, a capacidade mecânica do transformador de resistir às sobrecorrentes posteriores será severamente reduzida.

6.3 Proposta de metodologia para avaliação dos impactos dos estresses

A verificação da suportabilidade física dos transformadores é realizada a partir dos estresses mecânicos atuantes. Esta grandeza é indicativa do nível de esforços a que um determinado equipamento fica submetido, quando da ocorrência de algum distúrbio transitório.

Este item destina-se a correlacionar os esforços mecânicos máximos que possam agir sobre os enrolamentos de transformadores com a resistência mecânica destes dispositivos. Nesse sentido, partindo dos desenvolvimentos efetuados nos capítulos precedentes, a figura 6.1 apresenta, na forma de diagrama de blocos, uma proposta de sistematização dos procedimentos para análise técnica dos impactos que os esforços mecânicos podem ter sobre os enrolamentos dos transformadores.

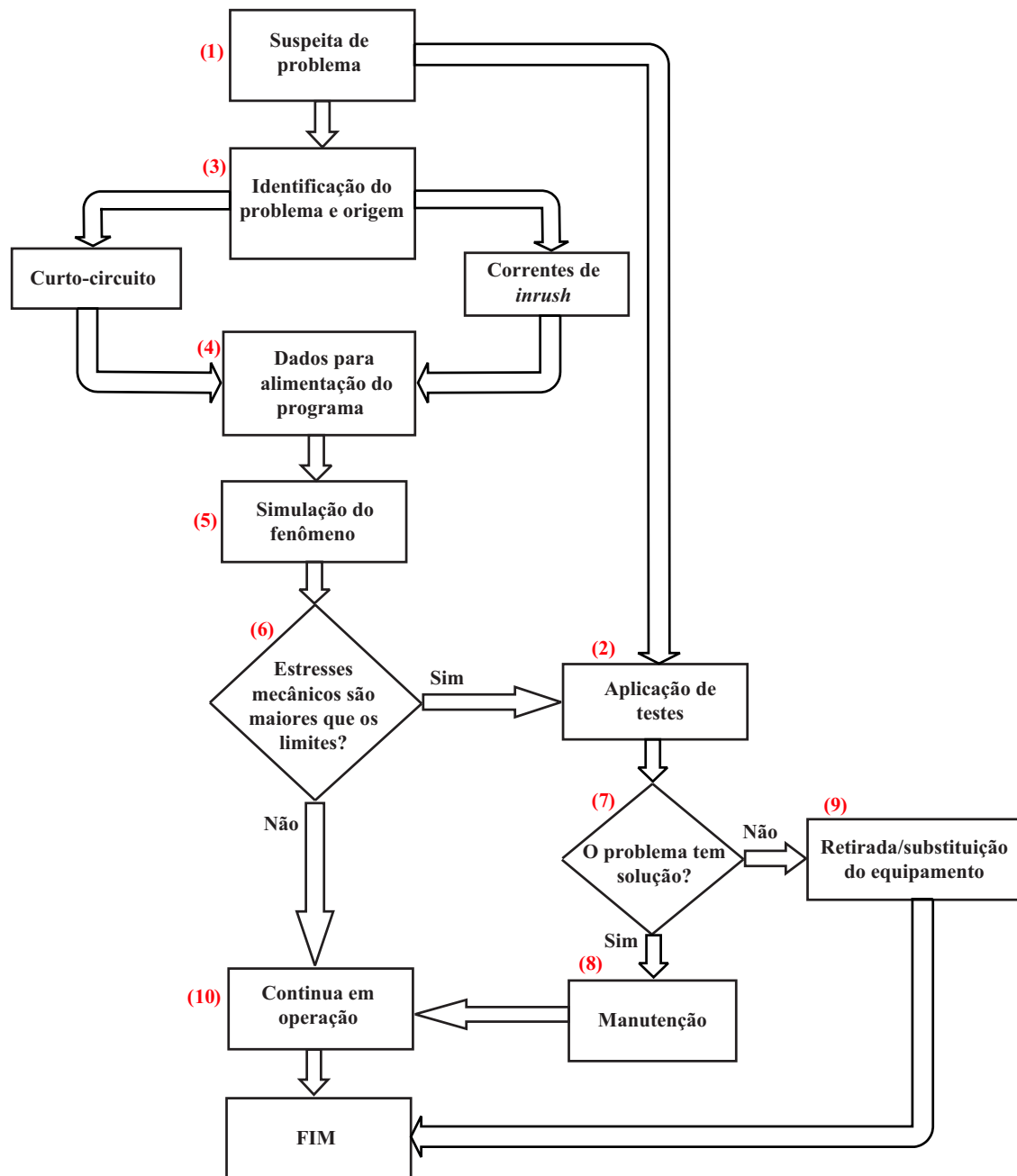


Figura 6.1: Metodologia para análise técnica da ocorrência de danos no transformador.

A descrição das diferentes etapas constituintes da proposta é realizada na seqüência.

Bloco (1)- Suspeita de problema:

O processo inicia logo após a atuação de um dispositivo de proteção. Nos casos em que há suspeita da ocorrência de alguma avaria nas partes ativas, estruturais e sistemas de isolamento, a decisão das medidas que deverão ser adotadas, dependerá de questões relacionadas com a aplicação do transformador e o custo do mesmo [39].

Bloco (2)- Aplicação de testes:

Na prática, esta fase consiste na realização de ensaios com o transformador depois que ocorre a atuação da proteção. Um conjunto de testes devem ser realizados tanto no próprio local da instalação quanto em laboratórios com estruturas adequadas [39].

Bloco (3)- Identificação do problema e origem:

Esta etapa destina-se a identificar o tipo de fenômeno transitório ocorrido no sistema, com vistas a reprodução fiel dos fenômenos e execução de estudos computacionais correlatos. Uma alternativa para a fundamentação das análises baseia-se na disponibilidade de informações coletadas através de registradores *on-line* instalados nos sistemas. Dentro desta ótica, registros de tensões e correntes com eventuais distúrbios seriam conhecidos.

Bloco (4)- Dados para alimentação do programa:

A alimentação do programa computacional depende, além da identificação e caracterização do fenômeno feita na etapa anterior, dos dados de projeto do transformador sob investigação, bem como do local que se encontra instalado o equipamento.

Bloco (5)- Simulação do fenômeno:

Uma vez identificado o problema e fornecidos os dados necessários ao processamento, nesta fase procede-se à execução de simulações computacionais do transformador, de maneira a reproduzir o fenômeno real, com a maior fidelidade possível, para verificação da possibilidade de ocorrência de danos físicos no equipamento.

Bloco (6)- Avaliação dos estresses mecânicos:

De posse dos resultados dos estresses de tração radial determinados na fase anterior, proceder-se-á a análise comparativa dos valores obtidos para a situação de transitórios com os estresses admissíveis pelo material utilizado nos enrolamentos (cobre) com vistas a identificação da possibilidade de danos físicos no equipamento.

Bloco (7)- Probabilidade de ocorrência de danos:

Para os casos em que os estresses de tração radial ultrapassem os limites de estresses admissíveis para o cobre, é recomendado que o equipamento passe por uma bateria de

testes cuja finalidade é verificar a possibilidade da existência de algum dano físico nos enrolamentos e sistemas isolantes. Em caso afirmativo, é necessário se verificar a extensão do dano e a possibilidade de manutenção da parte avariada.

Bloco (8)- Manutenção:

A manutenção deve ser realizada para os transformadores cujos danos não ocupem grandes extensões e valores e obviamente, que possam ser recuperados.

Bloco (9)- Retirada/substituição do equipamento:

A necessidade de substituição definitiva do transformador ocorre para os casos em que o dano causado pelo estresse mecânico seja irreversível.

Bloco (10)- Impossibilidade de ocorrência de danos físicos:

Estresses de tração radial calculados que resultem em valores menores que os estresses limites para o cobre, não oferecem riscos a integridade física dos enrolamentos e neste caso o transformador pode continuar em operação.

Os estresses de tração radial obtidos para os dois transformadores investigados são apresentados na seqüência para exemplificar a aplicação da metodologia.

6.4 Aplicação da metodologia para a avaliação do estresse mecânico

O objetivo maior das técnicas de monitoramento e diagnóstico de transformadores se fundamenta na aquisição de um conjunto de sistemas/dispositivos destinados a monitorar e prognosticar o potencial de risco de determinado equipamento. Assim, decisões técnico/gerenciais podem ser tomadas preventivamente, assegurando a continuidade do fornecimento de energia. No entanto, a implementação das técnicas atualmente disponíveis impactam, principalmente, com a cultura organizacional das empresas concessionárias, uma vez que a adoção dessa estratégia implicaria em altos custos para aplicação em transformadores.

As simulações digitais surgem como alternativa para contornar as “limitações” impostas ao monitoramento *on-line*. Assim, tomando-se como base os resultados das simulações computacionais dos capítulos precedentes, nos próximos itens apresentar-

se-ão análises dos aspectos elétricos e, sobretudo, mecânicos dos transformadores sob investigação, com vistas ao estabelecimento de uma proposta de metodologia para avaliação da vida útil de transformadores.

6.4.1 Quanto aos aspectos elétricos

Embora essa questão já tenha sido abordada nos capítulos anteriores, neste momento, é importante frisar que os transformadores são projetados para resistir as elevadas correntes oriundas dos curtos-circuitos trifásicos que porventura venham a ocorrer em seus terminais.

Neste aspecto, a referência [29] recomenda a adoção da teoria conhecida como 8x8x8 que estabelece que, um transformador deve ser capaz de resistir, durante toda a sua vida útil, a oito curtos-circuitos trifásicos em seus terminais que atinjam oito vezes a corrente nominal durante oito ciclos. De acordo com informações não publicadas fornecidas por consultores de fabricantes, alguns adotam a teoria do 10x10x10 para garantir a integridade de seus equipamentos.

Muito embora o termo “idade” de transformadores não tenha figurado entre as principais causas de falhas destes equipamentos caracterizadas nas análises precedentes, é fato que, com o envelhecimento há uma redução tanto da resistência mecânica como da resistência dielétrica dos sistemas isolantes dos transformadores. Nessas condições, quando um transformador é submetido a uma falta, existe a possibilidade de não resistir as altas forças eletromagnéticas experimentadas, uma vez que a isolamento dos condutores encontra-se enfraquecida e pode não resistir aos esforços mecânicos. As faltas podem também causar o afrouxamento do sistema de amarras que fixam os enrolamentos o que reduz a capacidade dos transformadores para resistir a eventuais ocorrências de faltas posteriores.

6.4.2 Quanto aos aspectos mecânicos

Com relação aos aspectos mecânicos é importante considerar a resistência mecânica das partes ativas e estruturais dos transformadores e dos sistemas isolantes, bem como os níveis de estresses que os esforços originam nos enrolamentos. No entanto, a análise realizada neste item enfoca, além dos aspectos citados, a distinção entre os limites operacionais de transformadores de potência e de distribuição, objetivando concluir sobre os comportamentos térmico e mecânico destes equipamentos.

Os limites operacionais dos transformadores são estabelecidos a partir da determinação da corrente transitória de curto-circuito, considerando-se o seu valor de pico [24].

As elevadas correntes transitórias se manifestam nos equipamentos na forma de efeitos térmicos e mecânicos. Sendo que os efeitos mecânicos regem o comportamento dos transformadores de potência sob curtos-circuitos e os efeitos térmicos são determinantes dos limites operacionais de transformadores de distribuição [24]. Valendo-se dessa premissa, e conhecendo-se as características dos transformadores sob investigação, procurar-se-á demonstrar os reflexos dos efeitos mecânicos sobre as partes ativas destes equipamentos.

A. Transformadores de distribuição

Conforme estabelecido anteriormente, projetos de transformadores de distribuição são regidos pelos limites térmicos originados de curtos-circuitos. As solicitações térmicas causadas pelas correntes de curto-circuito são caracterizadas pela elevação da temperatura nos condutores e no isolamento das bobinas, causada basicamente pelas perdas ôhmicas. Assim, para efeito de análise, as principais características da isolação que devem ser consideradas são: as resistências dielétrica e mecânica [49].

A suportabilidade dos transformadores com relação às elevações de temperatura pode ser avaliada em função do tempo máximo permissível do curto-circuito. Nesse particular, existem vários métodos que se dedicam ao estudo das solicitações térmicas, dentre eles pode-se citar: o de Küchler, Vidmar e o da energia específica em curto-circuito [24]. Uma vez que a análise dos efeitos térmicos não fazem parte do escopo deste trabalho não serão feitos maiores aprofundamentos sobre o assunto.

Com o intuito de comparar os valores encontrados via simulação para o estresse de tração médio a que ficam submetidos os enrolamentos do transformador de 15 kVA, sob um curto-circuito, com as características termomecânicas do cobre, a figura 6.2 mostra valores de referência para esse metal para o estresse de escoamento na temperatura de 200° C e o estresse de tração radial máximo suportável pelo mesmo. Ressalta-se que os limites críticos de estresse foram definidos no capítulo 3.

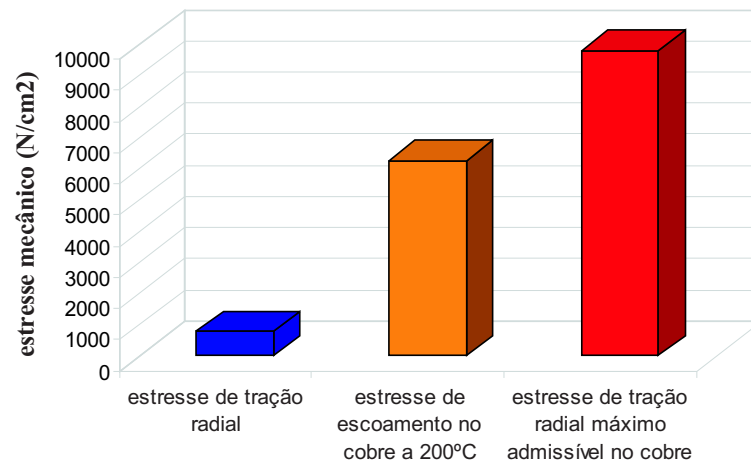


Figura 6.2: *Estresse de tração radial para o transformador de 15 kVA comparado aos estresses de escoamento e estresse admissível: curto-circuito.*

A figura permite constatar, que o estresse de tração radial máximo obtido via simulação digital, atinge um valor cerca dos 800 N/cm^2 contra $9.806,65 \text{ N/cm}^2$ do estresse de tração radial máximo admissível pelo cobre. Da mesma forma, o estresse de escoamento do metal, a 200°C e com duração de 3 segundos, alcança um valor aproximado de $6.276,256 \text{ N/cm}^2$, igualmente muito superior aos esforços verificados nos enrolamentos. Desta forma, confirma-se a premissa estabelecida anteriormente, qual seja, de que os limites mecânicos não se apresentam como sendo os mais críticos para o caso de transformadores de distribuição. Por outro lado, considera-se que os fatores térmicos governam o projeto de tais dispositivos, devido as características físicas desses transformadores, os quais possuem diâmetro e espessura radial das bobinas com dimensões inferiores as dos transformadores de potência [24].

B. Transformadores de potência

Contrariamente aos equipamentos de pequeno porte, projetos de transformadores de potência são governados fundamentalmente pelos esforços mecânicos [24]. Solicitações mecânicas nos enrolamentos de transformadores têm origem na ação mútua entre as elevadas correntes circulantes e a densidade de fluxo de dispersão que surgem durante esses fenômenos transitórios. As forças eletromagnéticas podem ser determinadas com uma certa precisão, conforme explanado, utilizando métodos numéricos ou através da realização de ensaios. Entretanto, persiste a dificuldade de se obter uma garantia total de que cada parte do transformador resistirá a ação das forças. Resultados confiáveis podem ser obtidos a partir de testes, uma vez que os cálculos para definir a resistência

mecânica dos enrolamentos e da isolação devem ser baseados em testes.

A figura 6.3, a exemplo do que foi feito para o transformador de 15 kVA, apresenta, para o transformador de 100 MVA, o valor calculado computacionalmente do estresse de tração radial, juntamente com os valores do estresse de escoamento e o estresse radial máximo admissível para o cobre. Salienta-se que os valores mostrados referem-se ao enrolamento da BT da fase R, com a presença de um curto-circuito.

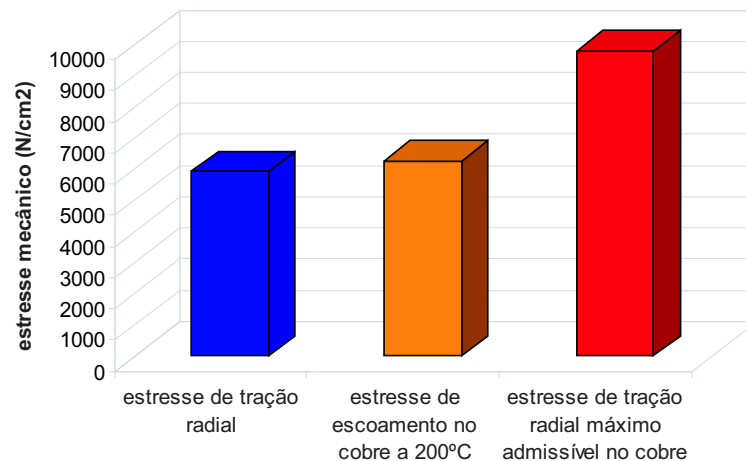


Figura 6.3: *Estresse de tração radial máximo para o transformador de 100 MVA comparado aos estresses de escoamento e estresse admissível (BT): curto-circuito.*

A figura 6.4 mostra uma situação semelhante à anterior, desta vez referentes à bobina da AT da fase R.

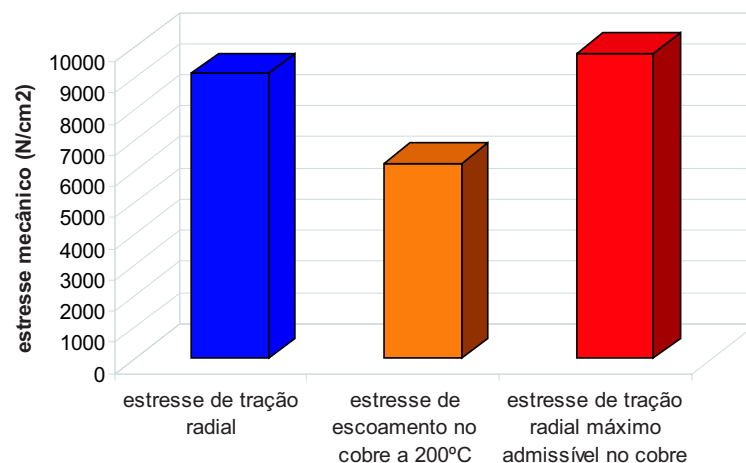


Figura 6.4: *Estresse de tração radial para o transformador de 100 MVA comparado aos estresses de escoamento e estresse admissível (AT): curto-circuito.*

Pode-se observar na figura 6.3 que o estresse de tração radial agindo no enrolamento da BT do transformador de potência atinge um valor próximo, porém inferior, ao

limite de escoamento para o cobre. Dessa forma, não oferecendo risco de dano para o mencionado enrolamento, para o caso de ocorrência de um curto-circuito nos níveis estabelecidos neste trabalho. Por outro lado, o estresse de tração radial do enrolamento da AT, mostrado na figura 6.4, alcança um valor superior ao limite de escoamento do material, entretanto, encontra-se abaixo do estresse máximo admissível para o cobre.

Analisando os resultados apresentados nas figuras 6.3 e 6.4 e, comparando-os com aqueles constantes na figura 6.2 (para o transformador de 15 kVA), nota-se que, contrariamente ao que acontece nos equipamentos de pequeno porte, os transformadores de potência têm os valores de pico dos estresses mecânicos bastante elevados. No entanto, sabe-se que estes picos possuem uma curta duração, possivelmente devido a atuação de equipamentos de proteção, dessa forma, o aquecimento provocado dificilmente ultrapassa os limites térmicos de projeto. Por outro lado, a densidade de corrente de curto-circuito para transformadores de potência pode ser elevada ao ponto de originar forças eletromagnéticas significativas nos enrolamentos e, conseqüentemente esforços mecânicos também elevados, conforme pode-se constatar. Dessa forma, os limites mecânicos é que determinam os limites operacionais dos transformadores de potência submetidos a curtos-circuitos.

6.5 Análise dos estresses provocados pelas correntes de *inrush*

Geralmente, a relação entre correntes de *inrush* e corrente nominal é menor para os transformadores de potência do que aqueles utilizados na distribuição, como demonstrado pelos estudos realizados neste trabalho e como mostram as relações a seguir:

- $I_{IR(100MVA)}/I_{nom} = 4,8$ para o transformador de 100 MVA e;
- $I_{IR(15kVA)}/I_{nom} = 17,7$ para o transformador de 15 kVA.

Por outro lado, a constante de tempo de decaimento das correntes de *inrush* para transformadores de distribuição é maior, pois é amortecida pelas resistências também maiores destes equipamentos. No entanto, o tempo de permanência das correntes de energização é superior ao das correntes de curtos-circuitos. Normalmente, a corrente de *inrush* tem o seu valor de pico reduzido num tempo aproximado de cerca de 10ms, contudo, pode levar dezenas de segundos até que retorne ao valor normal.

Por maior que seja o valor de pico alcançado pela corrente de *inrush*, este sempre é

menor que o pico da corrente de curto-circuito. Entretanto, quando a relação I_{IR}/I_{CC} varia entre 0,25 e 1, é recomendável que cálculos de esforços sejam realizados. De acordo com a referência [17] a relação I_{IR}/I_{CC} pode variar entre 0,15 e 0,6, entretanto, as simulações realizadas neste trabalho mostram que valores de pico da corrente de *inrush* iguais a 0,7 do valor máximo da corrente de curto-circuito, causa forças da mesma ordem de magnitude destas últimas. Essas forças, portanto, podem causar danos aos enrolamentos devido aos estresses mecânicos que surgem, ainda mais, porque ocorrem com maior frequência e duração. Acredita-se que os danos ocorrem, na maioria das vezes, na forma de redução da capacidade de isolamento podendo, portanto, causar falhas na isolação.

A figura 6.5 apresenta o estresse de tração radial máximo produzido pela corrente de *inrush* no enrolamento 2 do transformador de 100 MVA juntamente com os estresses de escoamento e estresse admissível pelo cobre.

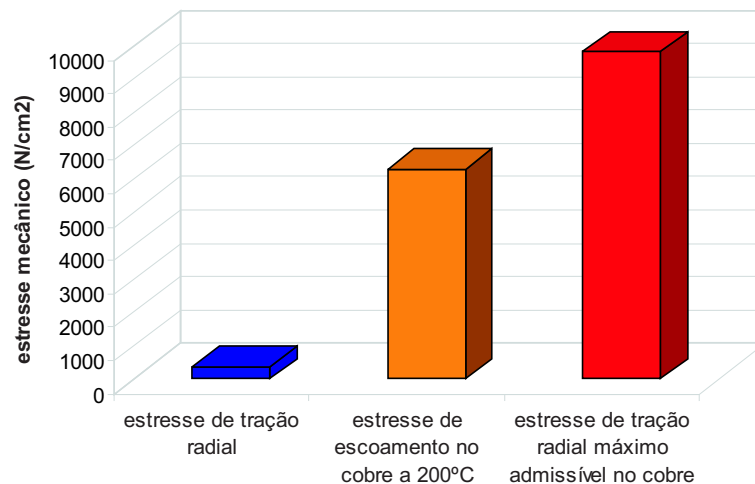


Figura 6.5: *Estresse de tração radial para o transformador de 100 MVA comparado aos estresses de escoamento e estresse admissível: inrush.*

Observa-se que o estresse radial produzido pela corrente de *inrush*, com o nível estabelecido para a corrente de magnetização para o transformador de 100 MVA, é inferior ao estresse provocado pelo curto-circuito no mesmo enrolamento (ver figura 6.4). Assim, para as condições estabelecidas neste trabalho, conclui-se que os estresses originados por correntes de *inrush*, oferecem menos riscos aos enrolamentos dos transformadores de potência.

O estresse mecânico no enrolamento 4 não foi apresentado devido a ter um valor bem inferior ao do enrolamento 2.

6.6 Técnicas para detecção do movimento dos enrolamentos

Movimentos ou deformações dos enrolamentos de transformadores são um problema sério e podem acarretar falhas nos equipamentos. Em termos gerais, os enrolamentos podem deformar-se de duas maneiras: em função dos estresses mecânicos produzidos pelos curtos-circuitos ou pela redução da pressão exercida pelas estruturas de suporte sobre os enrolamentos [50]. Estes danos, no entanto, são difíceis de serem detectados durante avaliações normais das condições dos equipamentos [51].

Existem técnicas próprias para monitorar/detectar o movimento dos enrolamentos de transformadores, sendo que as principais podem ser divididas em dois grupos distintos [25]. O primeiro grupo compreende as técnicas que tratam da variação de uma única grandeza, a densidade de fluxo de dispersão total. Os métodos que empregam esta técnica são: capacitância dos enrolamentos; corrente de magnetização; impedância de curto-circuito/reatância de dispersão.

O segundo grupo compreende as técnicas que respondem pela detecção dos efeitos da variação nas características do sinal de propagação produzidos por uma falta, quais sejam: impulso de baixa tensão; análise de resposta em frequência.

Na sequência são abordadas de forma breve os métodos supracitados.

- **Capacitância dos enrolamentos**

A medição da capacitância dos enrolamentos pode, em princípio, indicar o movimento dos enrolamentos, caso uma capacitância com um valor mensurável tenha sido afetada.

- **Corrente de magnetização**

Embora seja a maneira mais fácil para detectar a existência de espiras curto-circuitadas, que podem ter surgido com o movimento dos enrolamentos, esta técnica é sensivelmente limitada para identificação de outros tipos de falhas.

- **Impedância de curto-circuito/reatância de dispersão**

Testes de impedância de curto-circuito consistem na medição das impedâncias durante a realização de ensaios por parte do fabricante do transformador. Posteriormente, medições *on-site* são efetuadas e comparadas com os valores de referência.

- **Impulso de baixa tensão**

O teste é fundamentado na aplicação de um impulso de baixa tensão em um enrolamento e no registro da corrente ou tensão no mesmo ou em outro enrolamento. As variações registradas na capacitância entre os enrolamentos ou entre espiras, causadas pelo movimento dos enrolamentos, são refletidas na variação da forma de onda da tensão ou corrente [52].

- **Análise de resposta em frequência**

Testes de resposta em frequência (FRA) dos transformadores requerem que o equipamento seja isolado, de maneira a que a impedância ou admitância seja medida em função da frequência, fornecendo o que se chama de “impressão digital” do equipamento. A variação das grandezas indica o quão, um enrolamento ou parte dele, foi deslocado durante a ocorrência de um curto-circuito, por exemplo. Atualmente, este tipo de teste é considerado um dos mais efetivos na detecção do movimento dos enrolamentos de grandes transformadores [3].

6.7 Softwares de diagnósticos e sistemas inteligentes

Softwares de diagnóstico que fornecem uma indicação mais precisa dos problemas que acometem transformadores, do que as análises convencionais, são objeto de investigação por parte de muitos pesquisadores e concessionários [3] e [53]. O uso de programas computacionais pode melhorar a confiabilidade e a repetibilidade dos ensaios e análises dos dados obtidos, bem como pode ser usado para extrair informações que não estão disponíveis a partir de dados de testes diretamente.

Uma das idéias dos pesquisadores consiste em implementar um *software* tal que, a partir dos testes de óleo de transformadores, possam ser extraídas informações tais como existência de gás, conteúdo da mistura e resistência dielétrica e, correlacioná-los com as condições de isolamento de transformadores. Sistemas inteligentes também estão sendo desenvolvidos com a finalidade de gerar um sinal de alerta ao operador do sistema monitorado.

Os avanços ocorridos com as técnicas de modelagem utilizando inteligência artificial têm possibilitado aos engenheiros de potência e pesquisadores, o desenvolvimento de poderosos e versáteis programas para diagnosticar faltas em transformadores. Entretanto, essa potencial ferramenta ainda não tem o seu uso difundido.

A técnica mais utilizada para diagnosticar as condições de trabalho de transformadores ainda é o tradicional teste do óleo isolante. O uso de outros tipos de ensaios disponíveis tem aumentado, no entanto, fatores como, alto custo, confiabilidade dos equipamentos de teste e, muitas vezes, a indisponibilidade de profissionais experientes para fornecer uma interpretação correta dos dados obtidos nos testes, têm dificultado a consolidação dessas novas técnicas de monitoramento.

6.8 Considerações finais

Em sua parte inicial, o presente capítulo fez um apanhado sobre os diversos aspectos que podem impactar a integridade física de transformadores e, em decorrência, provocar uma redução de sua vida útil. Com essa finalidade e a partir dos resultados alcançados com os estudos computacionais desenvolvidos no capítulo 5, foram estabelecidas algumas conclusões sobre os impactos dos estresses mecânicos nos enrolamentos dos transformadores.

As análises realizadas com os dois transformadores sob investigação, permitiram constatar que os estresses mecânicos relacionados com curtos-circuitos oferecem maior influência no desempenho dos transformadores de potência, enquanto que transformadores de distribuição parecem ter seu desempenho mais influenciado pelos estresses térmicos.

Com respeito às correntes de *inrush*, os estudos demonstraram que os estresses mecânicos decorrentes, oferecem menor riscos para a integridade física dos equipamentos quando comparado aos curtos-circuitos. É importante salientar que essa conclusão é válida para a situação analisada neste trabalho, ou seja, energização com magnetismo residual nulo. Outros trabalhos, no entanto, mostram que em determinadas situações, as correntes de *inrush* podem provocar esforços mecânicos de amplitude semelhante aos causados pelos curtos-circuitos.

Encerrando o capítulo, é apresentada uma proposta de metodologia para avaliar os impactos sobre a integridade física de transformadores, em particular, devido aos efeitos transitórios das correntes de energização e curtos-circuitos passantes. Esta metodologia, balizada pelos resultados fornecidos pelo programa computacional desenvolvido nesta tese, se constitui em uma importante ferramenta para avaliações preliminares do estado de conservação deste tipo de dispositivo. Destaca-se, por fim, que os estresses mecânicos são determinantes na suportabilidade física dos transformadores de potência, motivo

da escolha como parâmetro de comparação da metodologia proposta e que, portanto, permite antever o potencial de risco de um determinado equipamento.

Capítulo 7

Conclusões Finais

À luz dos desenvolvimentos apresentados ao longo desta tese, este capítulo final, consolida as principais contribuições e os avanços mais significativos concretizados na pesquisa aqui descrita.

Inicialmente, e como fruto da pesquisa bibliográfica realizada, constatou-se, através de dados estatísticos de concessionárias de diversos países, que transformadores de grande porte, ou de potência, como são comumente denominados, têm uma elevada incidência de falhas devido à ocorrência de curtos-circuitos externos ou passantes nos sistemas elétricos. Estes eventos manifestam-se nos esforços a que ficam submetidos os enrolamentos dos equipamentos, tanto pelos seus efeitos térmicos como dinâmicos e os conseqüentes desgastes do sistema isolante e da sua estrutura de sustentação. Obviamente, o efeito imediato sentido pelas empresas afetadas diz respeito aos prejuízos financeiros decorrentes da interrupção do fornecimento, seja para manutenção ou substituição destes dispositivos, além de possíveis penalidades por descumprimento de padrões de fornecimento estabelecidos em norma.

Apesar da importância dos transformadores nos sistemas elétricos e das constatações mencionadas anteriormente, o levantamento realizado evidenciou a existência de um limitado número de investigações sobre estresses em transformadores, inclusive de ferramentas computacionais disponíveis, particularmente quando se refere a programas computacionais que fazem uso de técnicas no domínio do tempo. A preferência dos pesquisadores sobre este assunto, esta direcionado, preponderantemente, para metodologias numéricas fundamentadas no Método dos Elementos Finitos.

Assim sendo, e como forma de suprir a carência de dados de referência relacionados com os estresses mecânicos de transformadores em geral, foram utilizados métodos analíticos consagrados. Os resultados obtidos, num primeiro momento, serviram como

referência, para fins de comparação, com os correspondentes resultados extraídos do tradicional e bem aceito pacote computacional alicerçado no Método dos Elementos Finitos (FEMM), dedicado para a resolução de problemas de natureza eletromagnética.

Foi destacada a maior facilidade e precisão do cálculo analítico para as forças radiais, ao contrário do que se verifica no cálculo das forças axiais, que exige maior esforço e não oferece precisão. Foram apresentando também, os cálculos dos estresses que podem surgir em transformadores com enrolamentos concêntricos, provenientes das forças axiais e radiais e associando-os aos tipos de falhas que esses esforços podem ocasionar nos enrolamentos.

Para tal finalidade foram apresentados os conceitos básicos necessários ao entendimento dos fenômenos de curto-circuito e correntes de *inrush* e os seus efeitos sobre os enrolamentos de transformadores. Destacam-se como pontos de maior relevância, os aspectos relacionados com o cálculo analítico de forças eletromagnéticas e estresses eletromecânicos. Sobre este particular, vale destacar a importância do prévio conhecimento da distribuição dos fluxos de dispersão, fundamental para a determinação dos esforços atuantes no dispositivo. Isto garantirá um projeto eletromecânico de transformadores que atenda aos requisitos mínimos de resistência mecânica e, portanto, que assegure a vida útil estimada para o dispositivo, desde que operando nas condições previstas no projeto.

Com relação aos trabalhos de modelagem e implementação propriamente dita, muito embora o foco principal fosse o desenvolvimento de um programa no domínio do tempo, vale destacar alguns aspectos do simulador FEMM. Dentre eles, pode-se citar o fato de que o FEMM utiliza a formulação do potencial vetor magnético para a resolução dos problemas eletromagnéticos. Essa prática, na verdade, também é considerada como uma vantagem na utilização dessa técnica, uma vez que permite que todas as condições de contorno da estrutura sob análise sejam inseridas em uma única equação, garantindo assim, a precisão de resultados. As potencialidades do programa foram evidenciadas através da implementação e posterior simulação dos transformadores, para distintas condições de operação. Quanto às simulações realizadas, os resultados foram analisados e comparados com os cálculos derivados de expressões analíticas, apresentando uma boa semelhança, o que atesta a eficiência do método. Os estudos realizados com o FEMM conduziram a resultados com boa precisão, para todas as grandezas avaliadas, tais como: densidade de fluxo magnético de dispersão, perdas elétricas nos

enrolamentos e núcleo, forças eletromagnéticas, etc. Essa performance satisfatória deu a segurança necessária para utilizar esse método como referência para o método que utiliza o domínio do tempo, objetivo principal desta tese.

Os trabalhos para o estabelecimento de uma metodologia computacional utilizando técnicas no domínio do tempo iniciaram-se a partir de modelos de transformadores pré-existentes. A estes foram introduzidas modificações e desenvolvidas novas rotinas dedicadas ao cálculo de grandezas mecânicas que tornaram possível a determinação e manuseio também de grandezas mecânicas, que permitem avaliar o grau dos esforços a que ficam submetidos dispositivos de conversão eletro-mecânica de energia.

Uma vez estabelecida a metodologia no domínio do tempo, os estudos foram realizados utilizando os mesmos transformadores utilizados no FEMM, um de 15 kVA e outro de 100 MVA, e para as mesmas condições operativas. De um modo geral, pôde-se verificar que os resultados computacionais fornecidos pela técnica no domínio do tempo levaram a respostas com boa semelhança, comparativamente às obtidas tanto pelos métodos analíticos como os decorrentes de simulações utilizando o FEMM. No que tange ao cálculo dos estresses, estes foram efetuados somente com o modelo no domínio do tempo. Não obstante esse fato, os resultados alcançados se mostram satisfatórios e coerentes, uma vez que os estresses são dependentes de grandezas validadas, tais como forças e densidade de fluxo magnético de dispersão, além das características geométricas dos enrolamentos.

Com relação à distribuição de fluxo magnético, para as diversas condições de operação avaliadas, observou-se, primeiramente, que os curtos-circuitos provocam uma “redistribuição” do caminho percorrido pelas linhas de fluxo. Em condições normais de operação, estas fecham-se quase que totalmente pelo material ferromagnético, enquanto que sob condições de curto-circuito, desviam-se deste caminho preferencial e fecham-se pelo espaço entre os enrolamentos concêntricos do transformador. Esta nova distribuição do fluxo, em que se verifica um aumento significativo dos fluxos magnéticos de dispersão, se traduzem em aumento substanciais das forças eletromagnéticas atuantes nas estruturas do dispositivo. Em particular, o transformador de potência ficou submetido a maiores esforços, uma vez que para equipamentos como este circulam correntes significativamente mais elevadas.

Como fechamento das investigações, e uma vez que a ferramenta computacional encontrava-se devidamente validada, como contribuição final desta tese, foi apresentada

uma proposta de metodologia para avaliar o impacto que as elevadas correntes transitórias originárias de curtos-circuitos e de correntes de energização, podem ter sobre o desempenho da vida útil deste tipo de dispositivo. Fundamentalmente, a metodologia estabelecida toma como parâmetros os esforços a que ficam submetidos os transformadores (estresses mecânicos), em função das forças atuantes. Os valores encontrados são confrontados com as características mecânicas do material utilizado na construção do transformador, em particular, o cobre, daí permitindo a extração de conclusões a respeito dos impactos alcançados. Nesse sentido, questões relacionadas com a resistência mecânica dos materiais utilizados na construção dos equipamentos foram discutidas.

Assim sendo, a proposta aqui apresentada mostra-se interessante, uma vez que nem sempre é possível a execução de ensaios em transformadores que permitam a determinação das grandezas em questão, principalmente para os de grande porte, pelos motivos levantados ao longo da tese. Todavia, embora existam ensaios específicos destinados à detecção do movimento dos enrolamentos, que podem ocorrer durante a manifestação de um evento transitório de magnitude considerável, alguns destes, apesar da eficiência comprovada, nem sempre são disponibilizados pelas empresas concessionárias, além das questões de ordem financeira.

A metodologia em questão foi aplicada aos dois transformadores utilizados nesta investigação, podendo extrair-se as constatações a seguir. Transformações de distribuição embora sofram acréscimos dos stresses atuantes nas estruturas internas, não são afetados por estes, uma vez que os valores encontrados para o modelo investigado apresentam-se bem abaixo dos stresses admissíveis pelos materiais utilizados nos enrolamentos (limites críticos). De outro lado, os resultados alcançados evidenciaram que, para o caso de transformadores de grande porte, os stresses mecânicos têm uma importância maior, uma vez que as correntes envolvidas são de maior valor e em consequência os stresses também sofrem fortes acréscimos.

Finalmente, pode-se afirmar que a metodologia computacional desenvolvida, se constitui numa ferramenta de grande valia para a análise dos stresses mecânicos. Os resultados dos estudos permitem a emissão de pareceres técnicos conclusivos sobre a possibilidade de ocorrência de danos físicos nos equipamentos e a necessidade da retirada de serviço para reparo ou substituição e permitem a tomada de decisões sobre procedimentos a serem adotados para conferir uma maior segurança à operação dos sistemas elétricos.

Desta forma, os desenvolvimentos apresentados nesta tese, se revestem de importância, pois possibilitam a realização de estudos, de maneira confiável e com custos bem menores, de certa forma contornando as dificuldades encontradas para a realização de ensaios com dispositivos reais.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Mesmo reconhecendo que os principais objetivos desse trabalho de pesquisa tenham sido atingidos, vale destacar que investigações complementares certamente ainda se fazem necessárias para complementação da pesquisa. dentre os possíveis temas, pode-se citar:

- Efetuar a modelagem e implementação computacional das componentes radiais dos fluxos de dispersão e das correspondentes forças axiais, para avaliar os estresses causados nos enrolamentos de transformadores pelos esforços axiais;
- Objetivando suprir a falta de dados de campo, construir um protótipo de um transformador, dotado de sensores para detecção de movimento das espiras. Este protótipo será utilizado em ensaios laboratoriais como forma de corroborar a eficácia do modelo computacional desenvolvido e outros desenvolvimentos que possam ser executados;
- Tendo em vista que as empresas do setor elétrico brasileiro utilizam de maneira ampla o programa ATP (*Alternative Transient Program*), seria interessante que o modelo computacional desenvolvido nesta tese fosse implementado também naquele pacote computacional;
- Inserir no programa computacional desenvolvido nesta tese, um modelo de degradação dos sistemas isolantes dos transformadores, de maneira que permita estimar a perda de vida útil de um dispositivo, associada a degradação provocada pela ocorrência de estresses mecânicos nesses equipamentos.

Referências Bibliográficas

- [1] KASZTENNY, B.; KULIDJIAN, A. *An improved transformer inrush restraint algorithm increases security while maintaining fault response performance (Página da Web)*. Julho 2006. 53th Annual Conference for Protective Relay Engineers <http://pm.geindustrial.com/faq/Documents/T35/GER-3989A.pdf>.
- [2] BARTLEY, W. H. Analysis of transformer failures. *36th Annual Conference of IMIA - The International Association of Engineering Insurers*, v. 1, n. 1, p. 1 – 12, September 2003.
- [3] WANG, M.; VANDERMAAR, A.; SRIVASTAVA, K. Review of condition assessment of power transformers in service. *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, v. 18, n. 6, p. 12–25, December 2002.
- [4] WANG, H.; BUTLER, K. Finite element analysis of internal winding faults in distribution transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 16, n. 3, p. 422 – 428, July 2001.
- [5] MCNUTT, W. J.; JONSON, W. M.; NELSON, R. A.; AYERS, R. E. Power transformer short-circuit strength: Requirements, design and demonstration. *IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems*, PAS89, 1970.
- [6] YUN-QIU, T.; JING-QIU, Q.; ZI-HONG, X. Numerical calculation of short circuit electromagnetic forces on the transformers winding. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 26, n. 2, p. 1039–1041, March 1990.
- [7] NAJDENSKOSKI, K.; MANOV, D. Electromagnetic forces calculation on power transformer windings under short circuits. *The International Journal Computation Mathematics in Electrical and Electronics Engineering*, v. 17, n. 1/2/3, p. 374–377, May/June 1998.

- [8] SALON, S.; LAMATTINA, B.; SIVASUBRAMANIAM, K. Comparison of assumptions in computation of short circuit forces in transformers. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 36, n. 5, p. 3521– 3523, September 2000.
- [9] RENYUAN, T.; DAKE, L.; LIJIAN, T. Numerical calculation of 3D transient eddy current field and short circuit electromagnetic force in large transformers. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 28, n. 2, p. 1418 – 1421, March 1992.
- [10] MURAKAMI, H.; HOSOKAWA, N.; NAKATSUKA, S.; BANJOYA, N.; KISHI, A.; TAKANO, M. Short circuit strength of shell-form transformer. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, v. 3, 2001.
- [11] CHRISTOFEEL, M.; KUSTER, A. Calculation of short-circuit stress in transformers windings with the aid of digital computers. *The Brown Boveri Review*, v. 47, n. 5/6, p. 3521– 3523, May/June 1960.
- [12] PATEL, M. R. Dynamic response of power transformers under axial short circuit forces: Part 1 - winding and clamp as individual components. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 92, 1973.
- [13] PATEL, M. R. Dynamic response of power transformers under axial short circuit forces: Part 2 - windings and clamps as a combined system. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 92, 1973.
- [14] LIANG, Z.; LI, J.; TANG, R. Axial vibrations of windings under short circuit conditions. *Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems*, v. 1, 2003.
- [15] WANG, Z. Q.; WANG, M.; GE, Y. Q. The axial vibrations of transformer winding under short circuit condition. *International Conference on Power System Technology*, v. 3, 2002.
- [16] WANG, H.; BUTLER, K. Modeling transformers with internal incipient faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 2, p. 500–509, April 2002.
- [17] STEURER, M.; FRÖHLICH, K. The impact of inrush currents on the mechanical stress of high voltage power transformer coils. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 1, p. 155–160, January 2002.

- [18] ADDLY, A. A. Computation of inrush current forces on transformer windings. *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 37, n. 4, p. 2855 – 2857, July 2001.
- [19] PATEL, M. R. Instability of the continuously transposed cable under axial short-circuit forces in transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 1, p. 149 – 154, January 2002.
- [20] ARTURI, C. M. Transient simulation and analysis of three-phase five-limb step-up transformers following and out-of-phase synchronization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 6, n. 1, p. 196 – 207, January 1991.
- [21] ARTURI, C. Force calculation in transformers windings under unbalanced mmf's by a non-linear finite element code. *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 28, n. 2, p. 1363–1366, March 1992.
- [22] ARTURI, C. M. 3d fe analysis of the axial forces on the step-up transformer-winding with helicoidal lv. *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 31, n. 3, p. 2032 – 2035, May 1995.
- [23] BJERKAN, E. *High frequency modeling of power transformers*. Tese (Doutorado) — Norwegian university of Science and Technology, Maio 2005.
- [24] RIBEIRO, C. F.; ÁLVARES, M. V. A.; ORTEGA, B. G. P. Contribuição ao estudo e aplicação de transformadores de distribuição no sistema elétrico da coelba. *II Congresso de inovação tecnológica em energia elétrica*, 2003.
- [25] BROCHURE CIGRE WG 12.19. *The Short Circuit Performance of Power Transformers*. [S.l.], 2002.
- [26] MINHAS, M.; REYNDERS, J.; KLERK, P. D. Failures in power system transformers and appropriate monitoring techniques. *Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering. (Conf. Publ. No. 467)*, v. 1, 1999.
- [27] DELAIBA, A. C. *Comportamento de transformadores com cargas não lineares: uma abordagem analítica, experimental e numérica pelo método dos elementos finitos*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, Junho 1997.
- [28] IEEE/ANSI C57.109. *IEEE guide for transformer through-fault-current duration*. [S.l.], 1985.

- [29] WATERS, M. *The Short-Circuit Strength of Power Transformers*. 5. ed. [S.l.]: Macdonald and Co., London, 1966.
- [30] BOLLEN, M. H. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. 1. ed. [S.l.]: IEEE PRESS, 2000, New York.
- [31] HEATHCOTE, J. M. *J and P Transformer Book*. 12. ed. [S.l.]: Elsevier Science Ltd, Oxford, 1998.
- [32] IEC STANDARD 60076-5. *Power Transformers - Part 5: Ability to withstand short circuit*. [S.l.], 2006.
- [33] GREENWOOD, A. *Electrical Transients in Power Systems*. 1. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1991.
- [34] APOLÔNIO, R. *Modelagem e Chaveamento Controlado de transformadores: Análise Computacional e Validação Experimental*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Dezembro 2004.
- [35] LING, P.; BASAK, A. Investigation of magnetizing inrush current in a single-phase transformer. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 24, n. 6, p. 3217–3222, November 1988.
- [36] KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. *Transformer Engineering - Design and Practice*. 1. ed. [S.l.]: Marcel Dekker, Inc, New York, 2004.
- [37] ARTURI, C. Transient simulation and analysis of a three-phase five-limb step-up transformer following an out-of-phase synchronization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 6, n. 1, p. 196–207, January 1991.
- [38] GIBBS, J. B. *Transformer: Principles and Practice*. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1950.
- [39] IEEE STANDARD C57.125. *IEEE Guide for Failure Investigation, Documentation and Analysis for Power Transformers and Shunt Reactors*. [S.l.], 1991.
- [40] STENKVIST, E.; TORSEKE, L. What is known about the ability of large power transformers to withstand a short-circuit? *CIGRE Report*, 1961.

- [41] MIT. *Membros do Departamento de Engenharia Elétrica do Massachusetts Institute of Technology, Magnetics Circuits and Transformers*. 5. ed. [S.l.]: The MIT Press, 1965.
- [42] YACAMINI, R.; BRONZEADO, H. Transformer inrush calculations using a coupled electromagnetic model. *IEE Proc. Sci., Measurement Technology*, v. 141, n. 6, p. 491–498, November 1994.
- [43] BIANCHI, N. *Electrical Machines Analysis using Finite Elements*. 1. ed. [S.l.]: Taylor and Francis, 2005.
- [44] BASTOS, J. P. A. *Eletromagnetismo e Cálculo de Campos*. 2. ed. [S.l.]: UFSC, 1992.
- [45] MEEKER, D. *Finite Element Method Magnetics - User's Manual Version 3.4 (Página da Web)*. Julho 2006. <http://femm.berlios.de>.
- [46] APOLÔNIO, R.; CHAVES, M. L. R.; OLIVEIRA, J. C. de.; BRONZEADO, H. S.projeto chesf de ped (chesf/fau/ufu) chaveamento controlado de transformadores relatório 08/10 - Estudos computacionais das energizações da SE-Eunápolis. *Uberlândia*, 2004.
- [47] ANALOGY INC. *Guide to Writing MAST Templates, Release 5.0*. [S.l.], 1999.
- [48] SLEMON, G. R. *Magnetolectric Devices: Transducers, Transformers and Machines*. 5. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1966.
- [49] BLUME, L. F.; CAMILLI, G.; LENNOX, T. C. *Transformer Engineering: A Treatise on the Theory, Operation, and Application of Transformers*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1951.
- [50] MCDOWELL, G. W. A.; LOCKWOOD, M. L. Real time monitoring of movement of transformer winding. *IEE Colloquium on Condition Monitoring and Remanent Life Assessment in Power Transformers*, 1994.
- [51] JARMAN, P. N. Transformer winding movement and fault detection. *IEE Colloquium on Assessment of Degradation Within Transformer Insulation Systems*, 1991.

-
- [52] WANG, M.; VANDERMAAR, A. J.; SRIVASTAVA, K. D. Condition monitoring of transformers in service by the low voltage impulse test method. *High Voltage Engineering Symposium*, 1999.
- [53] WANG, Z.; LIU, Y.; GRIFFIN, P. J. Neural net and expert system diagnose transformer faults. *IEEE Computer Applications in Power*, v. 13, 2000.