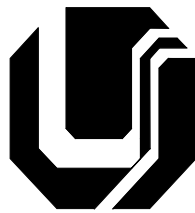


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



ESTIMATIVA DOS ESFORÇOS
ELETROMECAÂNICOS EM TRANSFORMADORES
SUBMETIDOS A UM CURTO-CIRCUITO
TRIFÁSICO

Arnaldo José Pereira Rosentino Junior

Uberlândia, Julho de 2010

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

**ESTIMATIVA DOS ESFORÇOS ELETROMECAÂNICOS
EM TRANSFORMADORES SUBMETIDOS A UM
CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO**

Arnaldo José Pereira Rosentino Junior

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, perante a Banca Examinadora abaixo, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Antônio Carlos Delaiba, Dr. (Orientador) – UFU
José Carlos Mendes, Dr. – ABB
José Carlos de Oliveira, PhD. – UFU
Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr, - UFU

Uberlândia, Julho de 2010.

ESTIMATIVA DOS ESFORÇOS ELETROMECHANICOS EM TRANSFORMADORES SUBMETIDOS A UM CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

ARNALDO JOSÉ PEREIRA ROSENTINO JUNIOR

Dissertação apresentada por Arnaldo José Pereira Rosentino Junior à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. Antônio Carlos Delaiba, Dr.
Orientador

Prof. Alexandre Cardoso, Dr.
Coordenador do Curso de
Pós- Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Maria Madalena e Arnaldo (Em memória), aos meus irmãos Alex e Henrique, à minha namorada Mariana da Silva e ao grande amigo Diogo Carrijo, pela compreensão e incentivos dedicados a mim para realização do mesmo e pela compreensão nos momentos ausentes.

AGRADECIMENTOS

A **DEUS** pelo apoio, por me tornar cada vez mais forte perante as angústias e dores e pela coragem em fazer-me prosseguir na conquista dos meus sonhos.

Ao amor incondicional de minha mãe **Maria Madalena Soares Rosentino** que mesmo com todas as dificuldades, sempre esteve apoiando minhas dedicações aos estudos.

Ao meu pai **Arnaldo José Pereira Rosentino** pelas lembranças de seus ensinamentos, que sempre servirão como um guia à minha trajetória pessoal e profissional.

Aos meus irmãos **Alex Sander Soares Rosentino** e **Henrique Soares Rosentino**, pelo incentivo e pelo orgulho no desenvolvimento desta pós-graduação.

Ao professor orientador **Antônio Carlos Delaiba** pelo incentivo, paciência, presteza e compreensão nas etapas desafiadoras deste trabalho, pela orientação segura, pela confiança na minha capacidade de realização, pela amizade e por compartilhar sua vasta experiência profissional e principalmente humana.

À Chesf, na pessoa do Engenheiro **Herivelto de Souza Bronzeado**, que através do Projeto de P&D intitulado *“Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado pelas Altas Correntes de Energização (“Inrush”) e de Curtos-Circuitos “Passantes”*, contribuiu de forma significativa para o desenvolvimento desta dissertação.

À amiga **Elise Saraiva**, por todo apoio e incentivo, durante as discussões sobre os assuntos relacionados à Engenharia Elétrica e ao tema dessa dissertação.

À **CAPES** pelo apoio financeiro.

Aos **professores, funcionários e colegas** do curso de pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

À **Cinara Fagundes P. Mattos** e **Marcília das Graças N. Theodoro** pela presteza nos encaminhamentos junto à secretaria da Faculdade de Engenharia Elétrica.

Ao meu grande amigo **Diogo Ribeiro Carrijo** e à sua família nas pessoas de Edésio, Eloisa e Mariana Ribeiro, por reconhecerem a importância do desenvolvimento desse trabalho e por jamais deixarem que eu desistisse na conquista de meus sonhos.

À minha namorada **Mariana da Silva** e à sua família pelo companheirismo, pela confiança, pelo acolhimento e pela compreensão nos momentos ausentes.

Ao amigo **Isaque Nogueira** pela convivência durante toda minha vida acadêmica, pela contribuição de seus conhecimentos e pelo incentivo na realização deste trabalho.

Aos queridos amigos (as) **Mayra Keiko, Leonardo Basílio, Lyssa Maeda, Ânderson, Lara, Vinicius, Thiago Oliveira, Thiago Bartolozzi, Natália, Rodrigo, João Paulo, Danilo, Diego, João Areis, Marcus Vinicius, Ronaldo, Carlos Eduardo e Angélica**, que fizeram parte de meu convívio durante esses anos de mestrado, e que tiveram papel imprescindível para a realização dessa obra.

Aos demais amigos, que apesar de não terem sido citados aqui, também estão presentes nos agradecimentos que faço em meu coração, por todo carinho e apoio, ao longo de minha vida e para realização desse trabalho.

RESUMO

Transformadores de potência são equipamentos essenciais aos sistemas elétricos e também um de seus componentes de maior preço. Quando estes equipamentos se danificam ou apresentam algum tipo de falha, o seu reparo ou até mesmo sua substituição demanda altíssimos custos financeiros, tanto pelo alto valor comercial destes equipamentos como pela perda temporária da capacidade de transmissão de energia elétrica. Muitas falhas destes equipamentos devem-se à redução da suportabilidade da isolação dos seus condutores/enrolamentos causado pelos fenômenos eletroquímicos do líquido de resfriamento (óleo), pelas vibrações produzidas pelas forças eletromecânicas durante a sua operação normal, ou seja, em regime permanente, e também pelas deformações dos enrolamentos causadas pelas altas correntes de curto-circuito. Espera-se, no entanto, que um transformador suporte um determinado número de curtos-circuitos durante seu tempo de operação. No entanto, verifica-se que cada evento poderá provocar pequenos deslocamentos relativos nos enrolamentos, os quais podem aumentar cumulativamente, reduzindo desta forma a capacidade do transformador de suportar novos esforços eletromecânicos. Neste contexto, torna-se importante a verificação periódica das suas condições mecânicas, principalmente nas unidades com muito tempo de operação, de forma a se obter subsídios para impedir falhas catastróficas. O emprego de técnicas especiais é requerido para o monitoramento e avaliação das condições mecânicas do enrolamento de um transformador. Apesar de este assunto ser uma preocupação constante dos projetistas e fabricantes de transformadores, bem como dos profissionais de manutenção e operação das empresas de energia elétrica, há certa carência de metodologias e ferramentas consistentes para se avaliar os efeitos dos esforços mecânicos decorrentes das elevadas correntes transitórias sobre estes equipamentos. Nessa perspectiva, este

trabalho tem por meta o entendimento das características dos esforços mecânicos causados pelas forças radiais e axiais nos enrolamentos dos transformadores. Para tanto, esta dissertação mostrará os diferentes tipos de esforços eletromecânicos passíveis de ocorrer nos enrolamentos de um transformador, identificando os principais tipos de falhas provocadas por essas solicitações. Em seguida, será desenvolvida uma metodologia analítica para estimar as forças e estresses nos enrolamentos de um transformador trifásico submetidos a um curto-circuito trifásico. Assim, os valores obtidos pela metodologia analítica serão confrontados com resultados de uma simulação computacional no domínio do tempo utilizando-se o programa FEMM baseado na técnica de elementos finitos.

Palavras-Chave: Transformadores de Potência, Corrente de Curto-Circuito, Forças Radiais, Forças Axiais, Estresses Eletromecânicos, Falhas Mecânicas, Metodologia Analítica, Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

Power transformers are essential and a large part of the asset cost structure of the electrical power system. When they present any defect or failure, it will be required high costs to repair or replace them, due their commercial costs and by the capability loss to transmit power during a period of time. Generally, transformer failure can occur as a result of the weakness insulation caused by the electrochemical processes involving the cooling liquid (oil), by vibrations due the electromagnetic forces in normal operation, i.e., steady state, and also by winding deformation as the result of short-circuits. It is expected that a transformer will experience and survive a number of short circuits during its service life. But one such event will cause some slight winding movement, which can gradually increasing and the ability of the transformer to withstand further electromechanical forces will be then reduced. It is therefore very important to check the mechanical condition of transformers periodically, particularly for older units, to provide an early warning of an impending catastrophic failure. Thus a specialist technique is required for the monitoring and assessment of mechanical condition of winding transformer. Despite designers and manufacturers, as well as the operation and maintenance technicians of power supply companies worry about this subject, new methodologies and tools to assess the strength effects as the result of short circuits in transformers are still necessities. So, this work proposes to know the strength characteristics caused by the radial and axial forces in winding transformers. In this context, it will be presented different strengths that can occur in winding transformer, identifying the principal failures as the result of these stresses. Besides, it will be developed an analytical method to evaluate the

forces and stresses in winding three phase transformer under a three phase short circuit. Finally, the analytical method results will be compared with a computer simulation based in time domain using the software FEMM, which applies the finite element method.

Keywords: Power Transformers, Short Circuit Currents, Radial Forces, Axial Forces, Electromechanical Stresses, Mechanical Failures, Analytical Method, Finite Element Method.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 MOTIVAÇÃO.....	4
1.3 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO	7
1.4 ESTADO DA ARTE.....	8
1.4.1 Síntese das Publicações	9
1.5 CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO.....	14
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	16

CAPÍTULO II

2 ORIGEM DAS FALHAS EM TRANSFORMADORES	19
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
2.2 FALHAS E PROBLEMAS EM TRANSFORMADORES	21
2.2.1 Núcleo	22
2.2.2 Tanque	22
2.2.3 Isolação Sólida – Celulose.....	23
2.2.4 Óleo e Resfriamento	24
2.2.5 Buchas	26
2.2.6 Comutador de Derivações em Carga (CDC)	27
2.2.7 Enrolamentos	28
2.3 ANÁLISE DE FALHAS EM TRANSFORMADORES	29
2.4 ORIGEM DAS FALHAS MECÂNICAS.....	41
2.4.1 Caracterização das Forças Eletromagnéticas.....	41
2.4.2 Curto-circuito trifásico	43
2.4.2.1 Análise do curto-circuito trifásico (tripolar)	46

2.4.2.2	Cálculo das correntes de curto-circuito utilizando-se o método simplificado	51
2.5	FALHAS ELETROMECÂNICAS EM TRANSFORMADORES	54
2.5.1	Tipos de Falhas Mecânicas nos Enrolamentos	54
2.5.1.1	Falhas Devido a Forças Radiais	55
2.5.1.2	Falhas Devido a Forças Axiais.....	60
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65

CAPÍTULO III

3	METODOLOGIA ANALÍTICA PARA CÁLCULO DOS ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS EM ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES	67
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	67
3.2	METODOLOGIA ANALÍTICA PARA CÁLCULO DAS FORÇAS RADIAIS EM ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS.....	68
3.2.1	Forças e estresses no enrolamento externo.....	70
3.2.2	Forças e estresses no enrolamento interno	72
3.3	METODOLOGIA ANALÍTICA PARA CÁLCULO DAS FORÇAS AXIAIS EM ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS	75
3.3.1	Método ampère-espira residual	75
3.3.2	Forças axiais para diversos arranjos de derivação.....	80
3.3.3	Forças axiais em espiras individuais	94
3.3.4	Casos especiais – Estimativa dos estresses axiais	96
3.4	EXEMPLOS DE CÁLCULOS DOS ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS SUBMETIDOS À CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO	97
3.4.1	Exemplo para um Transformador Trifásico de 5 MVA	98
3.4.2	Exemplo para um Transformador Trifásico de 15 kVA.....	107
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	112

CAPÍTULO IV

4	REPRESENTAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO NO FEMM (<i>FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS</i>)	114
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	114
4.2	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	115
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR UTILIZADO.....	118

4.4	MODELAGEM DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 15 KVA NO PROGRAMA FEMM	123
4.4.1	Caso 1: Modelagem do transformador operando em condição normal de operação	124
4.4.2	Caso 2: Modelagem do transformador submetido a curto-circuito trifásico	132
4.4.3	Caso 3: Modelagem do transformador operando sob curto-circuito com um desalinhamento entre enrolamentos interno e externo	145
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	150

CAPÍTULO V

5	CONCLUSÕES GERAIS.....	153
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	159
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	161
7	ANEXOS.....	166
7.1	ANEXO 1 - VOCABULÁRIO	166
7.2	ANEXO 2 – PARÂMETROS PARA ESTIMAR OS ESFORÇOS ELETROMECAÑICOS.....	170

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 –	Origem das falhas de transformadores em SE's de usina e em SE's convencionais.....	5
Figura 1.2 –	Taxa de falha em transformadores – Brasil.....	5
Figura 1.3 –	Percentual da taxa de falha por componente (1996).....	6
Figura 2.1 –	Transformador danificado após ocorrência de uma falha.....	20
Figura 2.2 –	Árvore de falha para o transformador.....	21
Figura 2.3 –	Árvore de falha para o núcleo.....	22
Figura 2.4 –	Árvore de falha para o tanque.....	23
Figura 2.5 –	Árvore de falha para a isolação sólida (Celulose).....	24
Figura 2.6 –	Árvore de falha para o óleo e resfriamento.....	25
Figura 2.7 –	Árvore de falha para a bucha.....	26
Figura 2.8 –	Mecanismo de operação do comutador de tapes sob carga (CDC).....	27
Figura 2.9 –	Árvore de falha para o comutador de derivações em carga (CDC) - <i>Load Tap Changer</i>	28
Figura 2.10 –	Árvore de falha para o enrolamento.....	29
Figura 2.11 –	Percentagem de falhas dos transformadores em SE's de usina em relação ao componente afetado e à origem da falha	31
Figura 2.12 –	Percentagem de falhas dos transformadores em SE's convencionais em relação ao componente afetado e à origem da falha	31
Figura 2.13 –	Curva da “Banheira”.....	33
Figura 2.14 –	Processo de envelhecimento e redução da suportabilidade do transformador.....	36
Figura 2.15 –	Potência instalada (GVA) de transformadores por ano.....	37
Figura 2.16 –	Previsão de falhas em transformadores entre 1964 e 2015....	38

Figura 2.17 –	Estratégia para monitoramento da condição do transformador.....	40
Figura 2.18 –	Direção das forças eletromecânicas em uma parte do enrolamento do transformador devido à presença da corrente elétrica.....	42
Figura 2.19 –	Tipos de faltas e sentido das correntes de curto-circuito em sistemas trifásicos.....	46
Figura 2.20 –	Circuito equivalente de uma rede em curto-circuito trifásico.	47
Figura 2.21 –	Corrente de curto-circuito ($\alpha = \varphi \pm 90^\circ$).....	48
Figura 2.22 –	Fator de impulso em função da relação R/X.....	50
Figura 2.23 –	Forma de onda da corrente de curto-circuito trifásico em função do tempo.....	52
Figura 2.24 –	Forma de onda da força em função do tempo durante um curto-circuito trifásico.....	53
Figura 2.25 –	Sentido das forças radial do enrolamento interno e externo em um transformador.....	55
Figura 2.26 –	a) Ilustração dos espaçadores axiais e outros componentes do transformador; b) Instabilidade forçada (<i>forced buckling</i>) no enrolamento.....	57
Figura 2.27 –	Falha em enrolamentos devido à uma alta compressão radial no enrolamento causando uma saliência no mesmo – <i>forced buckling</i>	58
Figura 2.28 –	Instabilidade livre no enrolamento interno: <i>free buckling</i>	58
Figura 2.29 –	Falha em enrolamentos devido à uma alta compressão radial causando uma saliência nos mesmos – <i>free buckling</i>	59
Figura 2.30 –	Representação de uma deformação axial em um enrolamento do transformador.....	60
Figura 2.31 –	Colapso axial devido a uma excessiva força axial causada por um curto-circuito.....	61
Figura 2.32 –	Flexão dos condutores entre espaçadores radiais (<i>Bending</i>)	62
Figura 2.33 –	Problema da flexão dos condutores entre espaçadores radiais (<i>Bending</i>) em transformadores.....	63

Figura 2.34 –	Tombamento devido a forças axiais – seção transversal	64
Figura 2.35 –	Ocorrência do fenômeno de tombamento (<i>Tilting</i>) – Os condutores deveriam estar todos na vertical	64
Figura 3.1 –	Seção transversal de um transformador com enrolamentos concêntricos mostrando as forças radiais (F_r) e a distribuição de fluxo axial (B_a).....	68
Figura 3.2 –	Forças produzindo estresse de tração nos enrolamentos externos e estresses compressivos no enrolamento interno..	69
Figura 3.3 –	Detalhe da curvatura do fluxo magnético nas extremidades dos enrolamentos.....	69
Figura 3.4 –	Método de cálculo do estresse médio de tração.....	71
Figura 3.5 –	Estresse de prova do cobre para vários níveis de dureza.....	73
Figura 3.6 –	Determinação do diagrama de ampère-espiras residual para enrolamento com derivação em uma extremidade.....	76
Figura 3.7 –	Distribuição de densidade de fluxo de dispersão radial h_{eff} , utilizando o método ampère-espira residual.....	77
Figura 3.8 –	Curvas de uma compressão axial para enrolamentos concêntricos sem tape.....	81
Figura 3.9 –	Forças axiais nos enrolamentos com desalinhamento axial: $F_1 < F_2$	83
Figura 3.10 –	Determinação do diagrama ampère-espira residual para enrolamento derivado no meio.....	88
Figura 3.11 –	Curvas de compressão axial para uma derivação no meio do enrolamento externo.....	89
Figura 3.12 –	Curvas do impulso em direção às culatras e das máximas compressões, em função de derivações no meio do enrolamento externo.....	90
Figura 3.13 –	Curvas de compressão axial para derivações em dois pontos no enrolamento externo.....	92
Figura 3.14 –	Estresse de tração radial no enrolamento externo comparando com o estresse admissível – Transformador 5 MVA.....	104

Figura 3.15 –	Estresse axial (efeito <i>bending</i>) no enrolamento externo comparando com o estresse admissível – Transformador 5 MVA.....	105
Figura 3.16 –	Força axial (efeito <i>tilting</i>) no enrolamento externo comparando com a força admissível – Transformador 5 MVA.....	106
Figura 3.17 –	Estresse de tração radial no enrolamento externo comparando com o estresse admissível – Transformador 15 kVA.....	111
Figura 4.1 –	Foto do Transformador trifásico 15 kVA utilizado na modelagem.....	118
Figura 4.2 –	Vista superior do transformador utilizado (dimensões em milímetros).....	120
Figura 4.3 –	Vistas do núcleo do transformador utilizado (dimensões em milímetros): (a) frontal, (b) lateral.....	120
Figura 4.4 –	Vista frontal do núcleo do transformador (dimensões em milímetros), considerando os enrolamentos.....	121
Figura 4.5 –	Característica de magnetização da chapa de aço silício de grão orientado utilizada no transformador (fornecido pelo fabricante) -Campo [Oe] x Indução [kG].....	122
Figura 4.6 –	Geometria do transformador implementado no FEMM.....	126
Figura 4.7 –	Exemplo de caracterização dos diferentes elementos da geometria do transformador.....	128
Figura 4.8 –	Circuito modelado no ATP para obtenção das correntes em condição normal de operação e de curto-circuito.....	128
Figura 4.9 –	Gráfico das correntes em condição normal de operação referentes ao primário e secundário obtidas pelo ATP.....	129
Figura 4.10 –	Gráfico das correntes de magnetização para condição normal de operação.....	130
Figura 4.11 –	Processo de geração de malha no modelo do transformador.	130
Figura 4.12 –	Densidade de fluxo obtida pelo FEMM para condição normal de operação.....	131

Figura 4.13 –	Densidade de fluxo obtida pelo FEMM nas colunas do transformador e nas regiões entre enrolamentos de cada fase, para condição normal de operação.....	132
Figura 4.14 –	Gráfico das correntes de curto-circuito referentes ao primário e secundário obtidas pelo ATP.....	133
Figura 4.15 –	Densidade de fluxo obtida pelo FEMM para situação de curto-circuito.....	134
Figura 4.16 –	Densidade de fluxo obtida pelo FEMM nas colunas do transformador e nas regiões entre enrolamentos de cada fase, para situação de curto-circuito.....	135
Figura 4.17 –	Referência utilizada para os sentidos das forças em x e em y.....	136
Figura 4.18 –	Exemplo ilustrando a obtenção das forças pelo FEMM nas extremidades do enrolamento interno da fase B.....	136
Figura 4.19 –	Força radial de compressão distribuída – Enrolamento BT.....	138
Figura 4.20 –	Força radial de tração distribuída – Enrolamento AT.....	138
Figura 4.21 –	Força radial total nos enrolamentos de BT e AT.....	140
Figura 4.22 –	Força axial distribuída total em ambos os enrolamentos.....	141
Figura 4.23 –	Força axial compressiva total na metade de ambos os enrolamentos.....	142
Figura 4.24 –	Distribuição do fluxo magnético nos enrolamentos na situação de curto-circuito.....	144
Figura 4.25 –	Desalinhamento entre enrolamento interno e externo da fase B.....	146
Figura 4.26 –	Densidade de fluxo obtida pelo FEMM para situação de curto-circuito, com desalinhamento entre enrolamentos da fase B.....	146
Figura 4.27 –	Força Radial de Compressão – Enrolamento BT. Condição com presença de desalinhamento entre enrolamentos.....	147
Figura 4.28 –	Força Radial de Tração – Enrolamento AT. Condição com presença de desalinhamento entre enrolamentos.....	148
Figura 4.29 –	Força axial distribuída total em ambos os enrolamentos. Condição com presença de desalinhamento entre enrolamentos.....	149

Figura 4.30 –	Força axial acumulada total em ambos os enrolamentos. Condição com presença de desalinhamento entre enrolamentos.....	150
Figura 7.1 –	Identificação dos espaçadores radiais e axiais no enrolamento do transformador.....	172

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 –	Custos de falhas.....	33
Tabela 2.2 –	Definição da classificação das condições de operação de um transformador.....	36
Tabela 2.3 –	Distribuição de falhas pela “idade” do transformador.....	39
Tabela 2.4 –	Valores para o fator de impulso de acordo com a relação R/X	50
Tabela 3.1 –	Diagrama ampère-espira residual e valores de permeância a ser usado para enrolamentos concêntricos com derivação na extremidade do enrolamento.....	86
Tabela 3.2 –	Diagrama ampère-espira residual e valores de permeância a ser usado para enrolamentos concêntricos com derivação no meio do enrolamento externo.....	87
Tabela 3.3 –	Diagrama ampère-espira residual e valores de permeância a ser usado para enrolamentos concêntricos com derivação no meio do enrolamento externo com presença de “gap” no enrolamento interno.....	91
Tabela 3.4 –	Diagrama ampère-espira residual e valores de permeância a ser usado para enrolamentos concêntricos com dois pontos de derivação equidistantes entre o meio e o final do enrolamento externo.....	92
Tabela 3.5 –	Diagrama ampère-espira residual e valores de permeância a ser usado para enrolamentos concêntricos com dois pontos de derivação equidistantes entre o meio e o final do enrolamento externo com presença de “gaps” no enrolamento interno.....	93
Tabela 3.6 –	Características elétrica, magnética e geométrica do transformador de 5MVA.....	98

Tabela 3.7 –	Resultados obtidos para força radial – Transformador 5 MVA.....	99
Tabela 3.8 –	Estresses causados pela força radial – Transformador 5 MVA.....	99
Tabela 3.9 –	Força axial para o enrolamento completo – Transformador 5 MVA.....	100
Tabela 3.10 –	Diagrama ampère-espira residual para arranjo de derivação do enrolamento externo – Transformador 5 MVA.....	100
Tabela 3.11 –	Força axial para o enrolamento incompleto – Transformador 5 MVA.....	101
Tabela 3.12 –	Força axial na extremidade dos enrolamentos – Transformador 5 MVA.....	102
Tabela 3.13 –	Estresse devido ao efeito <i>Bending</i> e Força crítica ao efeito <i>Tilting</i> – Transformador 5 MVA.....	103
Tabela 3.14 –	Características elétrica, magnética e geométrica do transformador de 15 kVA.....	108
Tabela 3.15 –	Resultados obtidos para força radial – Transformador 15 kVA.....	109
Tabela 3.16 –	Estresses causados pela força radial – Transformador 15 kVA.....	109
Tabela 3.17 –	Resultados obtidos para força axial – Transformador 15 kVA.	110
Tabela 4.1 –	Características geométricas, elétricas e magnéticas do transformador de 15 kVA.....	119
Tabela 4.2 –	Pontos específicos da curva B-H da Figura 4.5.....	123
Tabela 4.3 –	Valores das relutâncias e das espessuras do entreferro do transformador modelado.....	126
Tabela 4.4 –	Correntes de curto-circuito referentes ao primário e secundário obtidas pelo ATP.....	133
Tabela 4.5 –	Comparação entre simulação e metodologia analítica da força radial distribuída no enrolamento interno e externo.....	139
Tabela 4.6 –	Comparação entre simulação e metodologia analítica da força radial total no enrolamento interno e externo.....	140

Tabela 4.7 –	Comparação entre simulação e metodologia analítica da força radial axial nas extremidades do enrolamento interno e externo.....	142
Tabela 4.8 –	Comparação entre simulação e metodologia analítica da força axial compressiva total para o enrolamento interno e externo.....	143
Tabela 7.1 –	Arranjos mais usuais de derivação.....	173

LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{f}$ – Densidade volumétrica de força magnética [N/m³];

$\vec{J}$ – Densidade superficial de corrente [A/m²];

$\vec{B}$ – Densidade de fluxo magnético de dispersão [T];

U_f – Valor eficaz da tensão (na fase) [V];

R – Resistência do circuito (instalação) da entrada até o ponto em que ocorreu o curto-circuito [Ohm];

L – Indutância do circuito (instalação) da entrada até o ponto em que ocorreu o curto-circuito [H].

X – Reatância indutiva do circuito (instalação) da entrada até o ponto em que ocorreu o curto-circuito [Ohm];

α – Instante em que ocorre o fechamento da chave “S”;

φ – Defasagem entre a tensão e a corrente;

t – Instante de tempo [s];

i – Corrente de curto-circuito em função do tempo [A];

$i_{AC}(t)$ – Parcela de comportamento senoidal da corrente de curto-circuito em função do tempo;

$i_{DC}(t)$ – Parcela de comportamento exponencial, unidirecional, da corrente de curto-circuito em função do tempo;

I_k – Valor eficaz (valor simétrico) da corrente de curto-circuito [A];

Z – Impedância do circuito (instalação) da entrada até o ponto em que ocorreu o curto-circuito [Ohm];

I_s – Valor de crista (pico) da corrente de curto-circuito [A];
 f_i – Fator de impulso ou fator de assimetria, que leva em consideração a influência da componente contínua da corrente;
 Z_{trafo} – Impedância do transformador [Ohm];
 $Z\%$ – Impedância percentual do transformador;
 U_n – Tensão eficaz nominal fase-fase (V);
 S_n – Potência nominal de saída do transformador (VA);
 B_a – Densidade de fluxo axial [T];
 n – Número de espiras do enrolamento;
 h – Altura do enrolamento [m];
 D_m – Diâmetro médio do enrolamento [m];
 F_r – Força radial total [N];
 F_{rmed} – Força radial média [N];
 $F_{rad-dist}$ – Força radial distribuída [N];
 $\sigma_{r-medio}$ – Estresse radial médio [N/m²];
 a_c – Seção transversal do condutor [m²];
 $\sigma_{crit-free-buckling}$ – Estresse radial crítico para os casos de enrolamentos desprovidos de estruturas de sustentação axial (*free buckling*) [N/m²];
 E – Módulo de elasticidade do material [N/m²];
 e – Dimensão radial do condutor [m];
 $\sigma_{crit-forced-buckling}$ – Estresse radial crítico para os casos de enrolamentos providos de estruturas de sustentação axial (*forced buckling*) [N/m²];
 $E(\delta)$ – Módulo de elasticidade incremental ao valor crítico [N/m²];
 x – Constante do fabricante para espessura equivalente do condutor;
 Esp_{axial} – Quantidade de suportes axiais;
 $\sigma_{medio-buckling}$ – Estresse radial médio para os casos de enrolamentos providos de estruturas de sustentação axial (*forced buckling*) [N/m²];
 L_{ax} – Distância entre os suportes axiais [m];
 b – Dimensão axial do condutor [m];

h_{eff} – Comprimento efetivo do caminho do fluxo radial [m];
 a – Relação entre o comprimento de uma derivação (tape) e a altura do enrolamento;
 B_r – Densidade do fluxo radial médio no diâmetro médio do transformador [T];
 $F_{ax-deriv}$ – Força axial no enrolamento provido de derivação [N];
 Λ – Permeância por unidade de comprimento;
 F_{cTotal} – Força axial compressiva total em ambos os enrolamentos[N];
 D_{mt} – Diâmetro médio do transformador [m];
 d_0 – Ducto do transformador [m];
 d_i – Espessura radial do enrolamento interno [m];
 d_e – Espessura radial do enrolamento externo [m];
 S_ϕ – Potência aparente por fase do transformador [MVA];
 f – Frequência de operação do sistema [Hz];
 F_{c-i} – Força axial compressiva total no enrolamento interno [N];
 F_{c-e} – Força axial compressiva total no enrolamento externo [N];
 $F_{ax-deslocamento}$ – Força axial entre enrolamentos devido a um desalinhamento axial [N];
 a_f – Deslocamento axial final entre os enrolamentos como uma fração do comprimento do enrolamento;
 F_{int} – Força capaz de produzir um deslocamento unitário devido à elasticidade da isolação de ambos os enrolamentos [N];
 a_0 – Deslocamento axial inicial entre os enrolamentos [m];
 h_1 – Dimensão axial total dos espaçadores [m];
 A_1 – Área total dos espaçadores [m²];
 E_1 – Módulo da elasticidade dos espaçadores [N/m²];
 h_2 – Dimensão axial total associada à isolação do condutor [m];
 A_2 – Área total associada à isolação do condutor [m²];
 E_2 – Módulo da elasticidade associada à isolação do condutor [N/m²];

h_3 – Dimensão axial total associada à isolação na extremidade do enrolamento [m];
 A_3 – Área total associada à isolação na extremidade do enrolamento [m²];
 E_3 – Módulo da elasticidade associada à isolação na extremidade do enrolamento [N/m²];
 F_{int0} – Força capaz de produzir um deslocamento unitário devido à elasticidade da isolação do enrolamento interno [N];
 F_{int1} – Força capaz de produzir um deslocamento unitário devido à elasticidade da isolação do enrolamento externo [N];
 $F_{ax-max-i}$ – Força axial total máxima no enrolamento interno [N];
 $F_{ax-max-e}$ – Força axial total máxima no enrolamento externo [N];
 F_a – Força axial nas extremidades do enrolamento [N];
 q – Ampère-espira no final do enrolamento;
 w – Dimensão axial do condutor, considerando sua isolação e a isolação entre espiras [m];
 d_1 – Largura equivalente do ducto do transformador [m];
 a' – Comprimento do tape [m];
 $\sigma_{ax-bending}$ – Estresse axial associado ao efeito *bending* [N/m²];
 $F_{ax-dist}$ – Força axial distribuída ao longo da espira [N/m];
 L_{rad} – Distância entre espaçadores radiais [m];
 $F_{ax-crit}$ – Força axial crítica associada ao efeito *tilting* [N];
 k_m – Quantidade média de condutores em cada disco do enrolamento;
 $\sigma_{ax-crit}$ – Estresse axial crítico associado ao efeito *tilting* [N/m²];
 R – Raio do enrolamento [m];
 m – Quantidade de espaçadores radiais;
 s – Largura dos espaçadores radiais [m];
 c – Módulo equivalente de elasticidade do papel isolante [N/m²].

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Transformadores de potência são equipamentos essenciais aos sistemas elétricos e constituem-se num dos seus componentes de maior custo. Além do alto capital de investimento, não são equipamentos disponíveis comercialmente a curto-prazo. Devido ao seu peso e às suas dimensões elevadas e à fragilidade de alguns componentes, os transformadores de força exigem uma elevada logística referente ao seu transporte. Além do mais, tem-se a necessidade da realização de um comissionamento no local da instalação do equipamento [1].

Assim, quando estes equipamentos são danificados ou apresentam algum tipo de falha, faz-se necessário seu reparo ou até mesmo sua substituição, demandando alto custos financeiros. Primeiramente pelo alto valor comercial destes equipamentos, e depois pela possível perda temporária da capacidade de transmissão de energia elétrica. Já que a desativação de linhas de transmissão provocada pela troca/reparo de transformadores de potência terá reflexo direto no atendimento às cargas do setor produtivo nacional. Dentro deste contexto, irão influenciar o desempenho econômico do país como um todo. Por um lado, a concessionária ficará com seus índices de qualidade de fornecimento de energia afetados, prejudicando a imagem da empresa responsável junto à sociedade,

além do prejuízo causado pela perda de faturamento durante a interrupção de energia elétrica [2]. Pelo lado do consumidor industrial, caso a falha no transformador for na sua subestação, o setor produtivo será desenergizado. Desta forma, ocorrerá uma parada de produção acarretando prejuízos financeiros.

Em consequência dessa grande importância no sistema elétrico, os transformadores de potência são cuidadosamente protegidos contra vários fenômenos elétricos causadores das falhas.

Dentro deste contexto, sabe-se que, os transformadores de distribuição e de força, geralmente são projetados e construídos com isolamento consistindo de materiais orgânicos e/ou inorgânicos, essencialmente, óleo mineral e papel. Atualmente, utiliza-se também o óleo vegetal isolante.

Quando ocorre a falha do sistema isolante, a razão é, usualmente, uma redução ou mudança no seu comportamento dielétrico. No entanto, as propriedades mecânicas são também relevantes, pois uma danificação de origem mecânica pode causar uma redução ou mesmo a quebra, seguido de destruição do material isolante.

As degradações de algumas propriedades do sistema isolante são resultado da ação individual e/ou conjunta das seguintes possibilidades:

- Calor (reações químicas aceleradas);
- Redução da suportabilidade dielétrica (especialmente com sobretensões);
- Contaminação;
- Umidade e acidez, etc.;
- Vibrações, ambientes corrosivos e outros;
- Esforço mecânico aplicado devido à corrente no enrolamento (especialmente durante curto-circuito);

A alteração dos materiais isolantes, especialmente o papel, está normalmente associada com as reações químicas, as quais são aceleradas por qualquer aumento da temperatura acima da temperatura admissível (classe do

transformador). O óleo do equipamento também é afetado pela degradação química.

Papéis e papéis impregnados são afetados pela deterioração de suas propriedades mecânicas devido às forças eletromagnéticas, tais como; curto-circuito, correntes de *inrush* ou vibrações.

A contaminação pode ser outro fator importante na degradação, onde as partículas metálicas, tais como; fibras, gases e etc., presentes no óleo também podem afetar consideravelmente o sistema isolante.

Além desses fatos, um pequeno movimento devido à expansão e/ou contração dos condutores e das chapas de ferro do núcleo, também causam deterioração devido o atrito mecânico.

Desta forma, percebe-se que há várias combinações possíveis para entender, justificar e descrever as muitas possibilidades de falha de um sistema isolante.

No entanto, esta dissertação segue no sentido de enfocar os estudos, análises e simulações computacionais envolvendo somente as falhas mecânicas.

Dentro deste cenário, ressalta-se que uma das maiores razões de falhas internas destes equipamentos, é a redução da suportabilidade da isolação dos seus condutores/enrolamentos causado pelos fenômenos eletroquímicos do líquido de resfriamento (óleo), pelas vibrações produzidas pelas forças eletromecânicas durante a sua operação normal, ou seja, em regime permanente, e também pelas deformações dos enrolamentos causadas pelas altas correntes de curto-circuito.

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, ou de faltas no sistema elétrico, aumentando, em consequência, os riscos de falhas em decorrência de esforços eletromecânicos.

Espera-se, que um transformador experimente e suporte um determinado número de curtos-circuitos durante seu tempo de vida útil. Porém, mais cedo ou mais tarde, um novo evento causará algum leve movimento no enrolamento, e a capacidade do transformador de suportar novos esforços eletromecânicos será então reduzida. Neste sentido, torna-se importante a verificação periódica das suas condições mecânicas, principalmente nas unidades com muito tempo de operação (unidades mais antigas), de forma a se obter subsídios para impedir falhas catastróficas. Técnicas especiais são requeridas para o monitoramento e avaliação das condições mecânicas do enrolamento de um transformador. Apesar de este assunto ser uma preocupação constante dos projetistas e fabricantes de transformadores, bem como dos profissionais de manutenção e operação das empresas de energia elétrica, há certa carência de metodologias e ferramentas robustas para se avaliar os efeitos dos esforços mecânicos decorrentes das elevadas correntes transitórias sobre estes equipamentos [1].

1.2 MOTIVAÇÃO

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 (suportabilidades térmica e dielétrica), químicas e mecânicas (suportabilidade mecânica) [3].

Os gráficos apresentados pela Figura 1.1 ilustram uma distribuição dessas origens de transformadores em subestações (SE's) convencionais e em SE's de usina [4]. Verifica-se que grande parte das falhas ocorreu devido a uma falha mecânica e dielétrico. O elevado número de falhas de origem mecânica se justifica por aquelas que ocorrem nos comutadores de tape sob carga, já que são solicitados em maior frequência que os outros componentes. Além disso, são constituídos de diversas partes mecânicas. Neste contexto, devido os transformadores em SE's de usina passarem por projetos mais criteriosos, a

percentagem de falhas de origem mecânica é menor quando comparada com os transformadores de SE's convencionais.

As falhas devido ao fenómeno de curto-circuito estão associadas principalmente com as falhas de origem dielétrica, já que os esforços eletromecânicos podem reduzir a suportabilidade da isolamento do condutor.

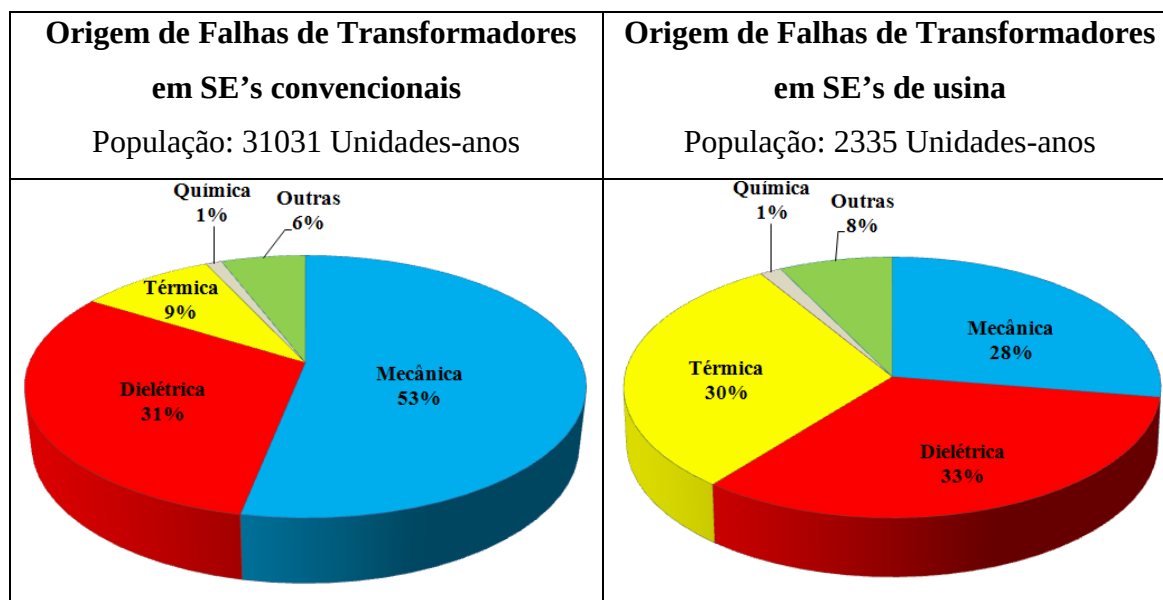


Figura 1.1 – Origem das falhas de transformadores em SE's de usina e em SE's convencionais.

Já o gráfico apresentado na Figura 1.2 mostra a tendência de falhas em transformadores no Brasil observada ao longo dos anos de 1993 a 1996 [3]. Observa-se um indesejável crescimento na taxa de falhas em transformadores.

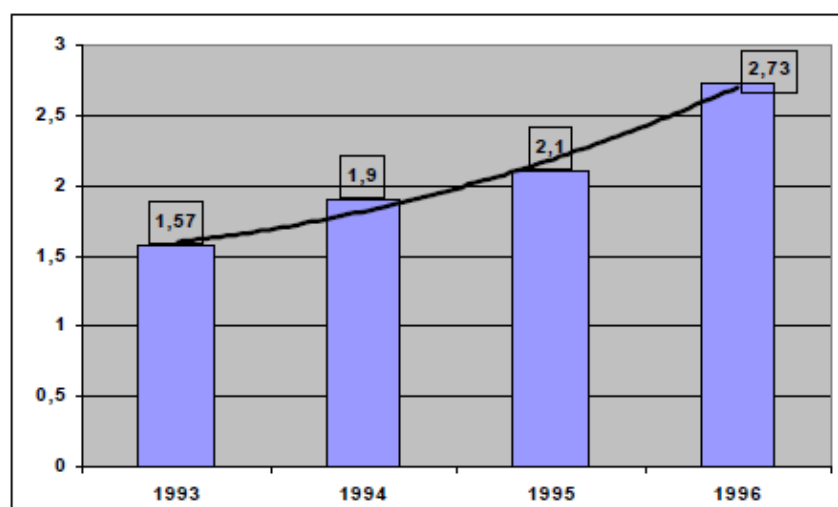


Figura 1.2 – Taxa de falha em transformadores – Brasil.

A Figura 1.3 mostra o percentual de falhas por componente em uma pesquisa realizada envolvendo mais de 12500 unidades-anos, durante o período compreendido entre 1994 a 1996 em equipamentos com classe de tensão igual ou superior a 69kV. Nesta mesma figura, observa-se que praticamente 80% das falhas estão concentradas em quatro componentes. São eles: equipamentos de proteção própria, comutador de derivações em carga, bucha e enrolamentos.

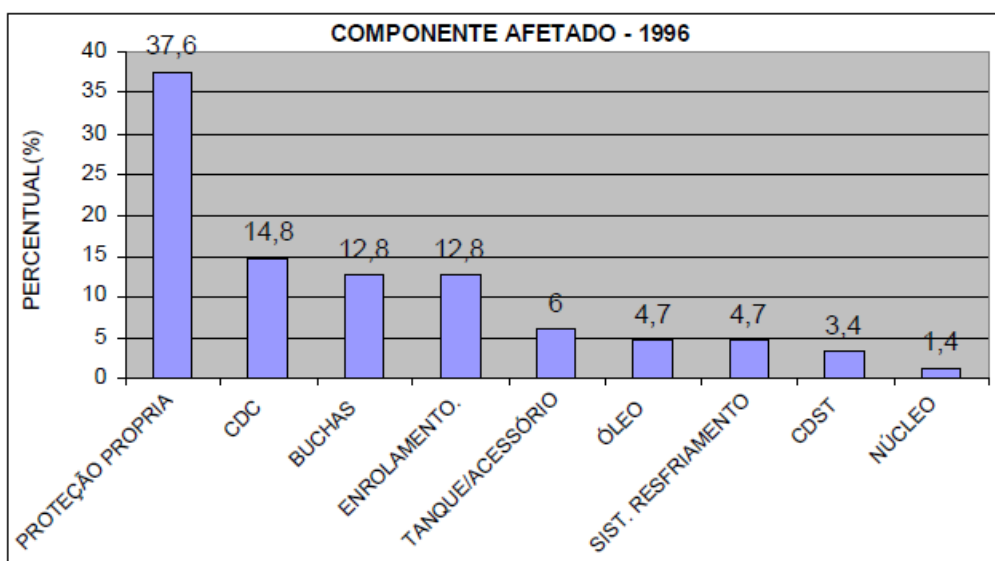


Figura 1.3 – Percentual da taxa de falha por componente (1996).

Verifica-se que muitas das falhas catastróficas que levam à perda total do transformador ou a vultosos recursos financeiros para repará-lo têm origem nas elevadas correntes de curto-circuito do sistema que provocam deslocamento ou deformações na geometria dos enrolamentos [3].

O deslocamento ou a deformação dos enrolamentos pode provocar danos à isolamento das espiras, por efeito de abrasão, portanto reduzindo a sua suportabilidade dielétrica.

A deformação dos enrolamentos também pode provocar a diminuição do diâmetro das mesmas, prejudicando os canais de circulação do óleo, provocando aquecimento localizado na isolamento, acarretando aceleração do envelhecimento do papel isolante. Assim, pode-se levar à ruptura do dielétrico.

Desta forma, um estudo associado aos tipos de deformações, oriundas de elevadas correntes de curto-circuito “passantes”, que possam se desenvolver nos enrolamentos do transformador torna-se fundamental e novas análises podem ser desenvolvidas para melhorar o diagnóstico dos transformadores, evitando assim através de manutenções preventivas novas falhas.

1.3 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

Tomando-se como base as questões apresentadas anteriormente, esta dissertação tem por objetivo estudar, analisar e realizar simulações computacionais sobre os estresses eletromecânicos em transformadores, quando os mesmos estão submetidos a curto-circuito trifásico. Vale ressaltar que embora o mais comum nas redes elétricas é a ocorrência de curtos-circuitos fase-terra, este trabalho fará uma abordagem apenas nos curtos trifásicos, já que apresentam maior magnitude comparado aos outros tipos de curtos-circuitos, e conseqüentemente produzirão maiores esforços nos enrolamentos dos transformadores.

Inicialmente, apresenta-se uma metodologia analítica que estima o estresse eletromecânico em transformadores, quando os mesmos são submetidos às sobrecorrentes. Complementando os aspectos anteriores, os resultados obtidos pelas formulações desenvolvidas para os cálculos analíticos serão comparados com os estudos obtidos em simulações computacionais, utilizando-se o método de elementos finitos (MEF).

O programa computacional para realizar a modelagem sob a técnica de elementos finitos será o FEMM (*Finite Element Method Magnetics*). Sua principal característica é a resolução de problemas eletromagnéticos. O FEMM é um programa livre que proporciona um completo conjunto de ferramentas para resolver problemas estáticos e de baixa frequência ou problemas assimétricos em eletrodinâmica, no domínio 2D. É um programa útil, pois manipula

internamente complicadas equações diferenciais que necessitam ser resolvidas quando se inter-relaciona distintas áreas do conhecimento científico, como é o caso desta dissertação.

1.4 ESTADO DA ARTE

Não obstante a importância incontestável dos transformadores para o sistema elétrico de potência, aliada à vasta quantidade de bibliografia e estudos encontrados na literatura, há uma grande carência de publicações sobre os efeitos dos esforços mecânicos decorrentes de elevadas correntes transitórias sobre estes equipamentos. Reconhecendo esta escassez, as investigações bibliográficas conduzidas e reportadas nesta dissertação procuraram obter, dentro do cenário nacional e internacional, um compêndio das publicações mais relevantes sobre o tema.

As investigações relacionadas às correntes de curto-circuito bem como sobre seus efeitos nos equipamentos, podem ser realizadas de diferentes maneiras, empregando-se para tanto: métodos analíticos, numéricos, experimentais e métodos que empregam técnicas no domínio do tempo.

Para uma melhor compreensão, as referências foram agrupadas com a seguinte estruturação: Normas e Recomendações; Livros; Teses e Dissertações e Artigos Técnicos. Estes últimos são divididos em dois subgrupos: Avaliação das falhas em transformadores e estimativa das forças eletromagnéticas e os estresses eletromecânicos nestes equipamentos.

Reconhecendo a abrangência de trabalhos científicos publicados sobre os temas em questão, esta dissertação, toma por foco, publicações de difusão mundial, tal como os periódicos do IEEE, CIGRÉ e outros eventos internacionais. Assim, acredita-se, que estas contribuam para uma melhor consolidação e corroboração do trabalho. É conveniente ressaltar também que o

processo da divulgação e acesso ao conhecimento constitui-se numa ação contínua e dinâmica, o que pode resultar na omissão de um ou outro documento de caráter relevante no corpo da presente pesquisa.

Destaca-se que a investigação bibliográfica realizada e que expressa o estado da arte do assunto em pauta, resultou no seguinte conjunto de publicações:

- 07 normas e recomendações;
- 07 livros;
- 03 dissertações de mestrado;
- 03 teses de doutorado;
- 18 artigos técnicos.

1.4.1 Síntese das Publicações

Na seqüência são sumarizados e apresentados os documentos, publicações científicas e livros considerados relevantes para fins do trabalho.

a) Normas e Recomendações

Dentre as normas e recomendações citadas neste trabalho, a referência [1], foi bastante importante para o subsídio das formulações analíticas desenvolvidas nessa dissertação. Esta referência tem por objetivo avaliar o desempenho de transformadores submetidos a curtos-circuitos a partir do contexto de quatro áreas correlatas, a saber: avaliação das condições de serviço dos equipamentos das concessionárias dos vários países que participaram da pesquisa; considerações sobre os métodos utilizados pelas concessionárias para calcular as forças eletromagnéticas e o estresse eletromecânico nos enrolamentos dos transformadores causados pelas correntes de curto-circuito. A terceira área analisada descreve os procedimentos que devem ser adotados para

avaliar a suportabilidade dos grandes transformadores de potência às forças eletromagnéticas, uma vez que tais equipamentos, normalmente não podem ser submetidos a testes de resistência mecânica. Por último são apresentadas e analisadas as técnicas utilizadas no diagnóstico e monitoramento de transformadores de potência sob curto-circuito. A referência [14] foi fundamental para balizar os assuntos relacionados às características das falhas nos transformadores. Dentre os assuntos abordados nesta referência, é desenvolvido um guia com o objetivo de gerenciar a vida útil do transformador, reduzir seu número de falhas, bem como estender sua vida útil, de forma a produzir um efetivo e confiável suprimento de energia. Por fim, as referências [21- 25] colaboraram nos assuntos associados às características das correntes de curto-circuito, incluindo, por exemplo, técnicas para estimar tais correntes, bem como procedimentos para realização de testes de curtos-circuitos.

b) Livros

A referência [18] representou um dos principais pilares para o desenvolvimento deste trabalho. Este livro aborda temas referentes aos curtos-circuitos e seus efeitos nos enrolamentos dos transformadores. Expressões para cálculo das forças eletromagnéticas axiais e radiais decorrentes das elevadas correntes em transformadores com enrolamentos concêntricos são apresentadas. Diversos arranjos de tapes são considerados nas expressões para se levar em consideração a força adicional devido às derivações. Os efeitos dinâmicos, bem como, as características mecânicas do material utilizado na construção dos transformadores também são tratados nessa referência. Também são apresentados alguns métodos para medição dessas forças eletromagnéticas, como o método do *strain gauge*. O documento [20] descreve análises e desenvolvimentos de equipamentos elétricos nas mais variadas situações normais e anormais. Dentre as quais, destacam-se os estudos dos efeitos

provenientes das sobrecargas e dos curtos-circuitos. As referências [17, 29,32] são obras que tratam da teoria de transformadores, proporcionando uma descrição dos princípios de projeto e construção, operação e manutenção, especificação e aquisição. Desta forma, foram fundamentais para auxiliar na compreensão dos fenômenos físicos associados à origem dos estresses eletromecânicos. Finalmente, os documentos [36, 37] forneceram ao trabalho informações para um entendimento básico dos assuntos associados com o método dos elementos finitos.

c) Teses e Dissertações

A tese de doutorado [2] representou um papel fundamental no trabalho desenvolvido, pois as melhorias desenvolvidas foram baseadas nos estudos realizados por esta referência. Esta tese foi direcionada em 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. A dissertação da referência [3] foi utilizada para auxiliar a compreensão das definições, causas e soluções das falhas em transformadores. Tal trabalho apresenta considerações gerais sobre a importância do transformador para o mundo moderno e a tendência indesejável do crescimento das taxas de falhas observadas no Brasil. Além disso, é apresentado um estudo sistemático sobre os modos de falhas. A referência [26] fornece subsídios aos estudos de falhas no transformador em consequência dos esforços mecânicos produzidos nos enrolamentos deste equipamento. Este último estudo também é tratado pelas referências [28, 31], embora tenham respectivamente como objetivo principal: desenvolver uma estratégia mais confiável para modelagem, a qual possibilite avaliar as deformações mecânicas nos enrolamentos e analisar o comportamento dinâmico dos enrolamentos de grandes transformadores submetidos às correntes de curtos-circuitos.

d) Artigos Técnicos

- **Avaliação das falhas em transformadores**

Os artigos técnicos associados a esta seção balizaram o conhecimento referentes às falhas em transformadores, compreendendo os diversos tipos de falhas, técnicas para avaliação e apresentação de algumas informações estatísticas.

A referência [4] contribuiu para o fornecimento dos resultados de uma pesquisa realizada pelo grupo de trabalho 12.05 do CIGRE, a qual se propôs em avaliar a taxa de falhas em transformadores e reatores. O artigo [5] relata a importância em manter o transformador sempre em boas condições de operação a fim de evitar a ocorrência de falhas, e conseqüentemente reduzir os elevados custos decorrentes desses eventos. O trabalho desenvolvido em [6] alerta para a importância no desenvolvimento de cálculos eletrodinâmicos e realização de testes de curto-circuito, a fim de não comprometer a confiabilidade do transformador, quanto à sua capacidade de suportar os esforços eletrodinâmicos. Além da importância em apresentar dados estatísticos de falhas em transformadores, a referência [7] faz um estudo no acompanhamento do envelhecimento de algumas unidades e uma perspectiva global na indústria de transformadores. As pesquisas [9, 11] colaboraram de forma fundamental na elaboração de um estudo de falhas e análises dos efeitos produzidos (FMEA – *Failure Modes and Effects Analysis*) em diversos componentes do transformador. Os trabalhos desenvolvidos em [10] forneceram uma visão geral dos processos de planejamento, construção, operação e monitoramento dos transformadores. Por fim, as referências [8, 12, 13, 15] serviram para fornecer uma visão geral de métodos utilizados para avaliação da condição em médios e grandes transformadores, relatando a preocupação com o aumento do risco de falhas em unidades que possuem elevado tempo de operação.

- **Forças eletromagnéticas e estresses mecânicos em transformadores**

Todos os artigos relacionados a esta seção contribuíram de alguma forma no entendimento das forças eletromagnéticas, sejam elas axiais ou radiais.

O trabalho desenvolvido em [16] apresenta os resultados de uma investigação realizada sobre o cálculo das forças eletromecânicas devido à efeitos de curto-circuito. A referência [19] faz uma consideração em detalhes das forças e estresses desenvolvidos nos enrolamentos e nas estruturas de fixação dos transformadores, devidos à ocorrência de curtos-circuitos ou de operações de chaveamento. O artigo [27] discute as complexas considerações associadas com o projeto e a capacidade dos transformadores de potência de suportar curtos-circuitos, abordando, dessa forma, as possibilidades de falhas que possam ocorrer devido à ocorrência das forças radiais e axiais. A referência [30], parte da obra [18], apresenta um método experimental para determinar as forças axiais em um projeto de transformador especial, o qual foi construído com a possibilidade de operar com diversas formas de derivações. Neste sentido, é desenvolvido um grande número de formulações baseadas no método do ampère-espiras residual, o qual considera todos os arranjos de tapes no transformador. O estudo em [33] foi importante para subsidiar na compreensão do efeito de tombamento (*tilting*). As análises mostraram que para garantir a integridade física do transformador, o limite crítico de instabilidade deve ser maior do que a força de compressão no enrolamento, sob a pior condição de corrente de curto-circuito. Finalmente, as pesquisas [34, 35] foram fundamentais para fornecer valores de referência dos estresses admissíveis associados aos enrolamentos dos transformadores.

1.5 CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

Dentro do contexto apresentado, esta dissertação irá contribuir nos seguintes aspectos:

a) Aperfeiçoamento da metodologia analítica para cálculo das forças eletromagnéticas

O presente trabalho faz uma varredura nas formulações atreladas com cálculos das forças e estresses eletromecânicos. Além de complementar àquelas utilizadas pela referência [2], as equações analíticas foram aplicadas em dois modelos de transformador, tornando-as mais didáticas. Além desse aspecto, tais formulações possibilitam aplicações em novos estudos, como por exemplo, análises no domínio do tempo utilizando o pacote computacional ATP (*Alternative Transient Program*). Este programa possui, por exemplo, uma ferramenta denominada MODELS, a qual permite desenvolver algum tipo de modelagem através de equações.

b) Aprimoramento da modelagem computacional do transformador utilizando o MEF

Um dos estudos realizados na referência [2] foi a implementação computacional de transformadores utilizando o MEF visando avaliar os esforços causados pelas elevadas correntes de curto-circuito. Neste sentido, esta dissertação faz uma melhoria na modelagem do transformador em elementos finitos, e conseqüentemente são apresentados resultados mais fidedignos quando do transformador submetido à altas correntes transitórias. Neste sentido, os enrolamentos do transformador foram modelados uniformemente distribuídos espira por espira e não somente uma modelagem como sendo um único condutor

[2]. Assim, esta estratégia possibilitou avaliar a distribuição das forças eletromecânicas ao longo de todo o enrolamento.

c) Identificação das origens dos diversos tipos de falhas devido aos esforços eletromecânicos nos enrolamentos do transformador

A partir de um estudo minucioso de como as forças e os estresses eletromecânicos atuam nos enrolamentos do transformador, foi possível identificar os principais tipos de deformações que possam vir a ocorrer nos enrolamentos do equipamento. Neste sentido, simulações computacionais podem ser desenvolvidas em um modelo de transformador, cujos enrolamentos apresentem deformações típicas. Desta forma, podem ser constatados os principais parâmetros que sofrem algum tipo de variação em relação às simulações com os enrolamentos sem deformação.

d) Informações sobre os parâmetros necessários para cálculo das solicitações eletromecânicas devido a um curto-circuito

No Anexo 2 deste trabalho é apresentado de forma resumida, os principais parâmetros primordiais para estimar os esforços eletromecânicos nos enrolamentos do transformador devido a uma corrente de curto-circuito. Esta é uma das principais contribuições desta dissertação, visto que a maioria do corpo técnico das empresas de energia elétrica não tem conhecimento dos principais parâmetros necessários para estimar durante a fase de projeto as solicitações mecânicas nos enrolamentos devido a uma corrente de curto-circuito trifásico.

e) Contribuição nas atividades desenvolvidas no projeto de P&D entre UFU, UFCG e CHESF

Esta dissertação foi fundamental para o desenvolvimento das atividades realizadas no projeto de P&D entre UFU, UFCG e CHESF intitulado como “Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado pelas Altas Correntes de Energização (“*Inrush*”) e de Curtos-Circuitos “Passantes”.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A fim de alcançar os objetivos aqui propostos, além do presente capítulo, esta dissertação é conduzida na seguinte estrutura:

Capítulo II ORIGEM DAS FALHAS EM TRANSFORMADORES

Este capítulo tem por objetivo apresentar inicialmente, de forma bem resumida, alguns tipos de falhas que ocorrem nos principais componentes do transformador. Algumas informações estatísticas são apresentadas, as quais indicam os tipos de falhas que ocorrem em maior frequência. Além disso, uma atenção é apontada para os transformadores com maiores tempos de operação. Em seguida, é desenvolvida uma seção que aborda as principais características das correntes de curto-circuito, visto que são uma das principais causadoras das falhas mecânicas. Por fim, são destacados os tipos de forças eletromagnéticas (força axial e radial) em consequência das elevadas correntes de curto-circuito “passante” originando deformações típicas nos

enrolamentos.

Capítulo III ESTRESSES ELETROMECAÑICOS EM TRANSFORMADORES SUBMETIDOS À CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO “PASSANTE”

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma metodologia analítica para o cálculo das forças e estresses eletromecânicos axiais e radiais. Uma atenção especial deve ser considerada na formulação que envolve as forças axiais, pois apesar de serem mais complexas que as radiais foram bem exploradas, complementando as apresentadas em [2]. A metodologia analítica foi aplicada, a partir de informações geométricas, magnéticas, mecânicas e elétricas de dois transformadores trifásicos típicos de 5 MVA e 15 kVA. Neste contexto, possibilitou-se um melhor entendimento sobre as magnitudes que os esforços podem atingir em consequência de elevadas correntes de curto-circuito nos enrolamentos dos transformadores.

Capítulo IV REPRESENTAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO NO FEMM (*FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS*)

Este capítulo tem por objetivo principal modelar o transformador de 15 kVA e obter os resultados dos esforços eletromecânicos devido a uma corrente de curto-circuito nos enrolamentos. Para tanto, foi utilizado o programa FEMM,

no domínio do tempo, o qual se baseia na técnica dos elementos finitos. Inicialmente, antes de analisar os esforços eletromecânicos, foi descrito um primeiro caso de estudo, onde se desenvolveu uma simulação com o transformador em sua condição nominal de operação. Em seguida, foram estudados mais dois casos, um com o transformador submetido a um curto-circuito, e outro semelhante a este, porém com os enrolamentos desalinhados entre si. Alguns dos valores obtidos no segundo caso foram comparados com aqueles oriundos da metodologia analítica, a fim de verificar o grau de fidelidade dos dois métodos supramencionados.

Capítulo V CONCLUSÕES FINAIS

Por fim, este capítulo destina-se em apresentar as principais investigações realizadas ao longo de todo o trabalho. Complementarmente, citam-se algumas sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO II

ORIGEM DAS FALHAS EM TRANSFORMADORES

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Atualmente, transformadores operam em sistemas elétricos complexos com topologia em malha e, em geral, interligados. A potência nominal destes equipamentos é da ordem de desde alguns kVA a dezenas de MVA. Naturalmente, o custo torna-se cada vez maior à medida que se aumenta a potência do transformador. Em geral, os transformadores de potência são bastante confiáveis, tendo uma vida útil em torno de 20 a 35 anos, podendo chegar a 60 anos quando da prática de uma boa manutenção [5]. A ocorrência de uma falha no equipamento em serviço pode trazer danos bem graves, tais como: perigo à equipe de trabalho, quando ocorrem explosões; danos ao ambiente quando há, por exemplo, vazamento de óleo; os custos de reparo ou substituição são elevados levando a uma perda de receita da concessionária ou indústria; etc.

A ocorrência de descargas elétricas, manobras e curtos-circuitos são alguns dos fenômenos que podem levar o transformador a uma falha. O equipamento logo depois de fabricado apresenta, normalmente, uma boa suportabilidade térmica, dielétrica, química e mecânica. Contudo, com o tempo, sua isolação pode degradar ao ponto em que não seja mais capaz de suportar, por exemplo, uma corrente de curto-circuito [5].

Assim, torna-se essencial evitar falhas e manter o transformador em boa condição de operação. Tradicionalmente, são realizados programas de manutenção preventiva que são baseados no tempo de operação do equipamento, porém com a intenção de diminuir os custos de manutenção, atualmente há uma tendência em se realizar manutenções baseadas na condição física do transformador. Conseqüentemente, existe um aumento da necessidade para melhores diagnósticos e ferramentas de monitoramento para avaliar a condição interna dos transformadores [6].

A fim de ilustrar as conseqüências que podem ocorrer no equipamento, a Figura 2.1 [7] apresenta um transformador danificado após ser submetido a algum tipo de falha.

Assim, dentro deste cenário este capítulo tem por objetivo realizar uma abordagem das principais características das falhas que surgem nos principais componentes do transformador.



Figura 2.1 - Transformador danificado após ocorrência de uma falha.

2.2 FALHAS E PROBLEMAS EM TRANSFORMADORES

As falhas em transformadores podem ser resultados de diferentes causas e condições. Geralmente, as falhas podem ser categorizados como sendo de origem dielétrica, mecânica, térmica, química e outros, sendo de causa interna ou externa [8].

De forma a analisar o equipamento e compor uma árvore de falhas, o transformador foi dividido em diferentes componentes, conforme apresentado pela Figura 2.2 [9].

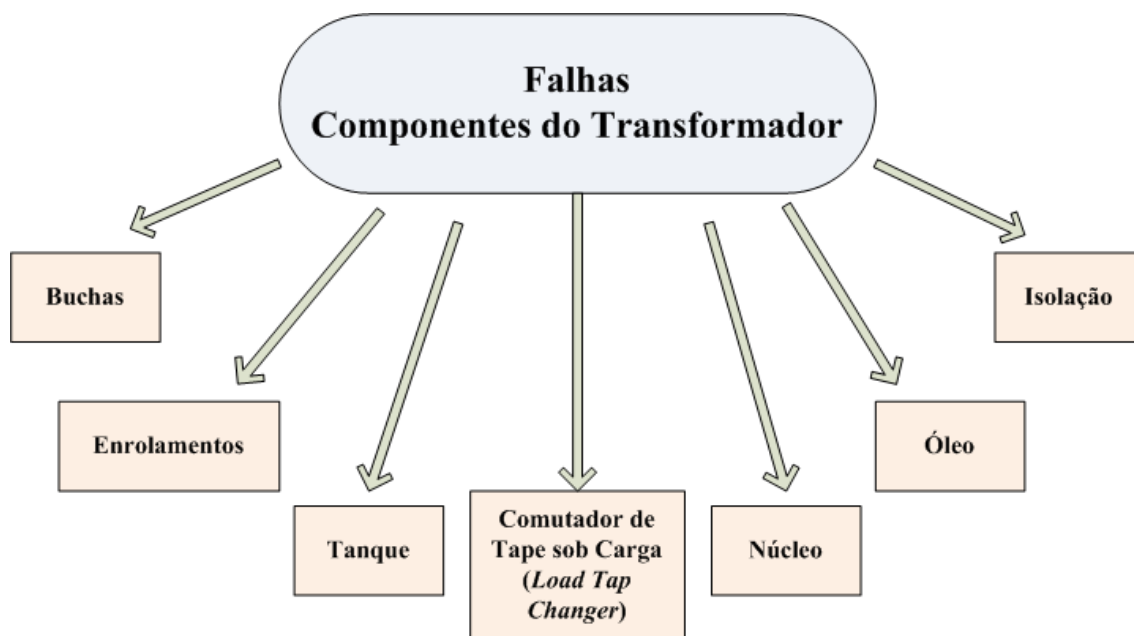


Figura 2.2 - Árvore de falha para o transformador.

Assim, a fim de resumir algumas causas, resultados e falhas, a seguir é apresentada, na Figura 2.3 a Figura 2.10, as árvores de falha para cada componente do transformador [9].

2.2.1 Núcleo

A função do núcleo é promover o fluxo magnético no transformador. O seu modo de falha é caracterizado por uma redução no rendimento do equipamento, e pode ser causada por uma falha mecânica no núcleo ou por não conformidade durante o processo de fabricação. A Figura 2.3 mostra a árvore de falha para o núcleo [9].

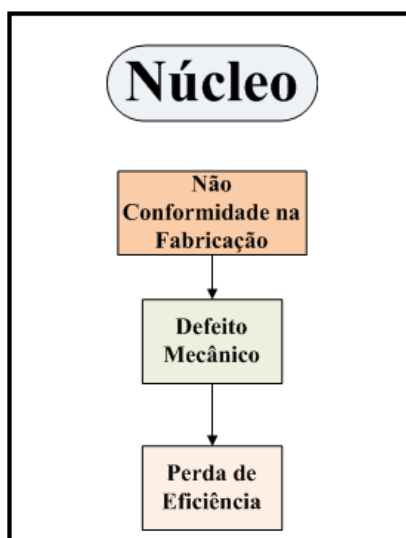


Figura 2.3 - Árvore de falha para o núcleo.

2.2.2 Tanque

O tanque é o componente responsável por armazenar o óleo e também por ser proteção física para a parte ativa do transformador (enrolamento, núcleo, etc). O mesmo deve suportar estresses oriundos do meio ambiente, tais como radiação solar e elevada umidade, e deveria desta forma, ser inspecionado, por exemplo, quanto a vazamentos de óleo e corrosão excessiva do material. A geração de arcos elétricos dentro do transformador pode causar um aumento da pressão interna e conseqüentemente levar a ruptura do tanque. Na Figura 2.4 é fornecida a árvore de falha deste componente [9].

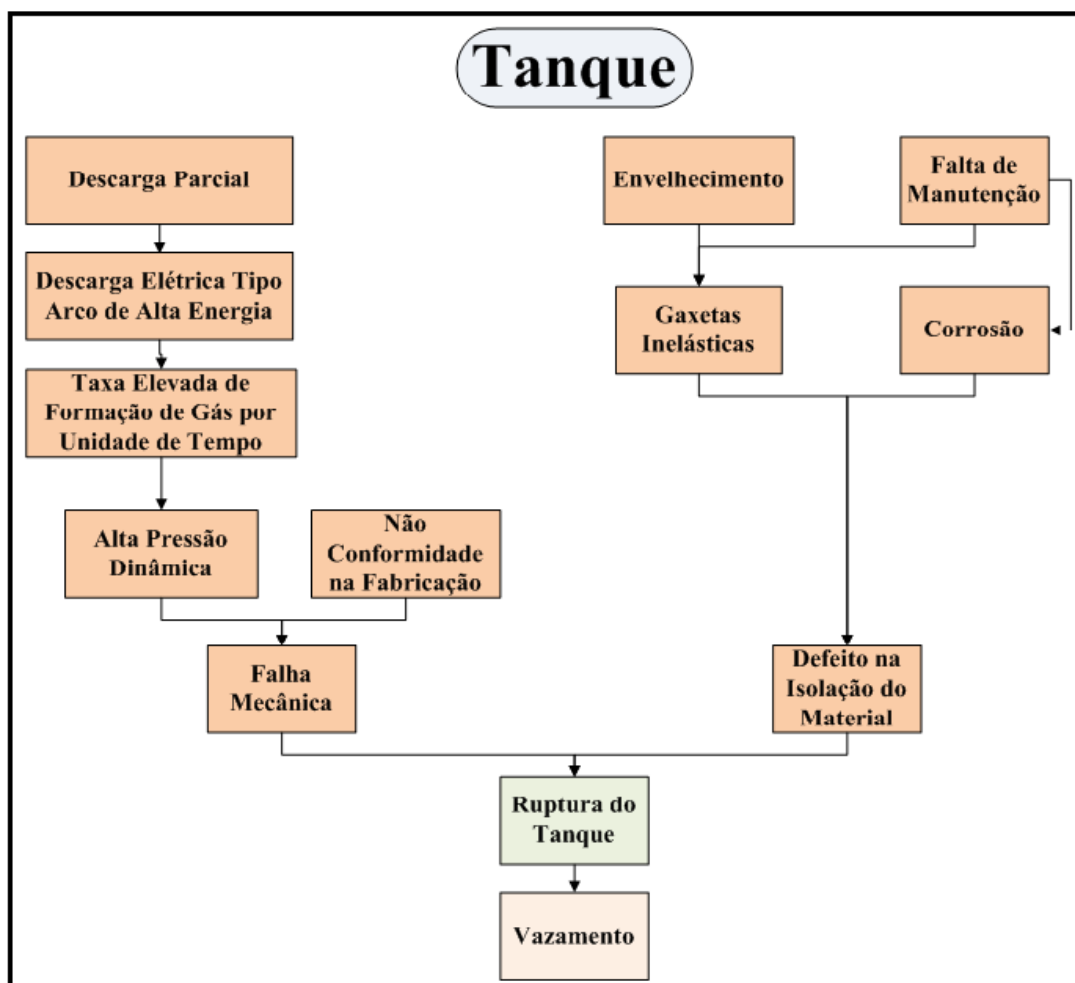


Figura 2.4 - Árvore de falha para o tanque.

2.2.3 Isolação Sólida – Celulose

A isolação sólida em um transformador é constituída por componentes fabricados de materiais cuja matéria prima básica é a celulose. São utilizados papel isolante e material de maior densidade denominado de *presspan*. A sua função é estabelecer isolação dielétrica e suporte mecânico para os enrolamentos.

Para indicação de uma boa qualidade do papel é utilizado o grau de polimerização (GP). Por exemplo, o papel novo apresenta GP com valor entre 1200 e 1400. Um valor de GP abaixo de 200 significa que o papel tem uma baixa resistência mecânica e pode não mais ser capaz de suportar solicitações

eletromecânicas. A degradação da celulose é irreversível e não é recomendada sua substituição. Além disso, seu envelhecimento é acelerado com a presença de água, oxigênio e calor.

Uma análise do papel pode fornecer o índice de umidade e o valor de DP da isolação. Um dos métodos bastante utilizado para manutenção do papel é a secagem do transformador, já que tal processo reduz o conteúdo de água na isolação.

A Figura 2.5 mostra a árvore de falha para a celulose [9].

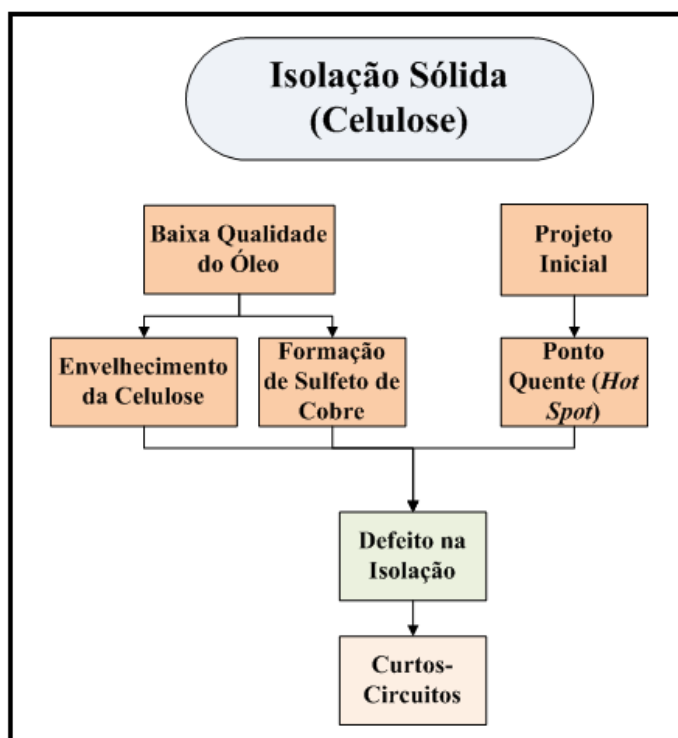


Figura 2.5 - Árvore de falha para a isolação sólida (Celulose).

2.2.4 Óleo e Resfriamento

A função do sistema de resfriamento (composto tipicamente de radiadores ou trocadores de calor, motoventiladores, motobombas, etc) e do óleo isolante é refrigerar a parte ativa do transformador. Além disso, o óleo isolante é responsável pela isolação elétrica entre as diferentes partes dentro deste

equipamento. Desta forma, a qualidade do óleo influi bastante nas propriedades de isolamento e refrigeração do transformador. Por exemplo, a formação de partículas no óleo devido ao envelhecimento da celulose e do tanque pode levar a um curto-circuito interno no equipamento.

O sistema de resfriamento pode ser baseado ou em uma circulação natural ou forçada (através de bombas) do óleo e ar/água. Em transformadores com circulação forçada existe um risco de uma falha na bomba, o que levaria a não circulação do óleo e conseqüentemente o aumento de sua temperatura dentro do transformador. Além disso, um defeito na bomba ou ventilador causaria também uma má circulação do segundo meio de refrigeração, ar ou água.

A Figura 2.6 apresenta a árvore de falha do óleo e resfriamento [9].



Figura 2.6 - Árvore de falha para o óleo e resfriamento.

2.2.5 Buchas

Existem diferentes tipos de buchas, e elas são classificadas de acordo com o tipo de isolamento do material nos terminais, tipo de isolamento do material utilizado em sua parte interna, ou pelo processo de construção. Em transformadores preenchidos a óleo, por exemplo, são utilizadas as buchas do tipo ar-óleo.

A função das buchas é isolar eletricamente o tanque dos enrolamentos, e realizar a conexão do transformador com o sistema.

O principal modo de falha das buchas é a ocorrência de um curto-circuito, que pode ser causado devido a defeitos no material (rachaduras na porcelana, gaxetas inelásticas ou má instaladas, etc) ou por vandalismo e outros danos (arremesso de pedras, processo de fabricação, etc).

A Figura 2.7 apresenta a árvore de falha das buchas no transformador [9].

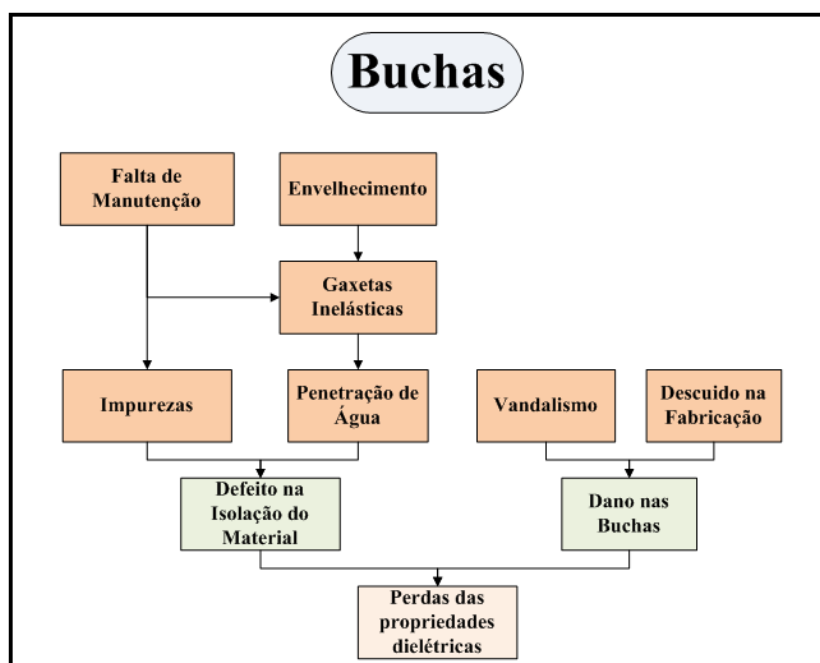


Figura 2.7 - Árvore de falha para a bucha.

2.2.6 Comutador de Derivações em Carga (CDC)

A função do comutador de derivações em carga (CDC) - *Load Tap Changer* - é regular o nível de tensão através da adição ou retirada de espiras do enrolamento do transformador. Além de um sistema de acionamento motorizado (montado externamente ao transformador), o CDC é construído em duas seções: uma chave comutadora e o seletor de tapes (Figura 2.8 [10]). Além disso, é composto de um mecanismo complexo de forma não interromper a corrente elétrica quando ocorre uma mudança de tape, o qual se baseia em dois processos básicos:

1. Inicialmente, o tape desejado é pré-selecionado pelo seletor de tapes, o qual desempenha tal função a vazio;
2. Em seguida, a chave comutadora transfere a carga para o tape selecionado.

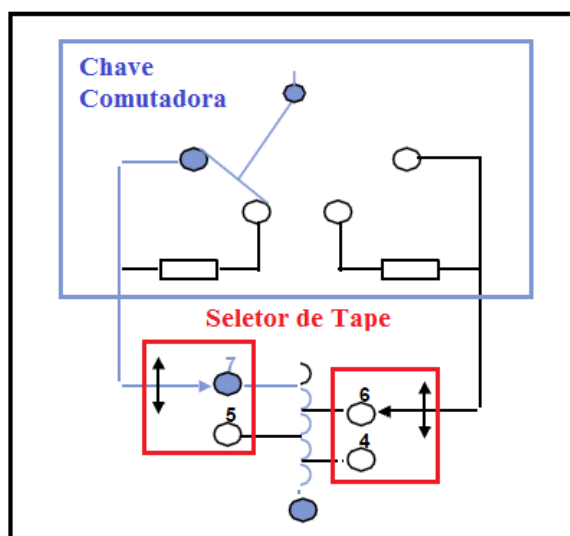


Figura 2.8 - Mecanismo de operação do comutador de tapes sob carga (CDC).

Para evitar a contaminação do óleo do transformador, a chave comutadora possui seu próprio compartimento de óleo, e requer limpezas periódicas. Inspeções anuais são realizadas para fazer a leitura do contador de operações da chave comutadora, a fim de determinar quando será necessária

uma revisão geral. As partes que requerem manutenções mais rigorosas são os contatos da chave comutadora, a qual pode ser substituída, e o mecanismo composto de um motor que permite a operação do CDC.

As falhas em comutadores sob carga geralmente decorrem de problemas de natureza mecânica, desgaste de contatos, procedimentos de manutenção inadequados e deterioração do óleo isolante da chave comutadora. Os efeitos desse tipo de falha podem ser catastróficos [11].

A Figura 2.9 apresenta a árvore de falha do comutador de tape sob carga [9].

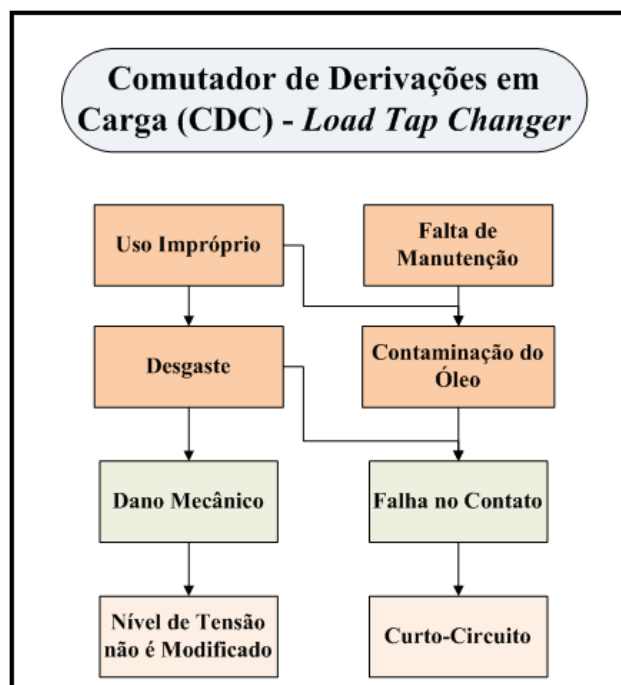


Figura 2.9 - Árvore de falha para o comutador de derivações em carga (CDC) - Load Tap Changer.

2.2.7 Enrolamentos

Os enrolamentos pertencem à parte ativa do transformador, e a função deles é prover a passagem da corrente elétrica. Além da suportabilidade térmica e dielétrica, os enrolamentos devem suportar também as forças mecânicas, as

quais podem ser causadas por uma corrente de curto-circuito, ou corrente de energização do transformador.

A Figura 2.10 mostra a árvore de falha do enrolamento [9].

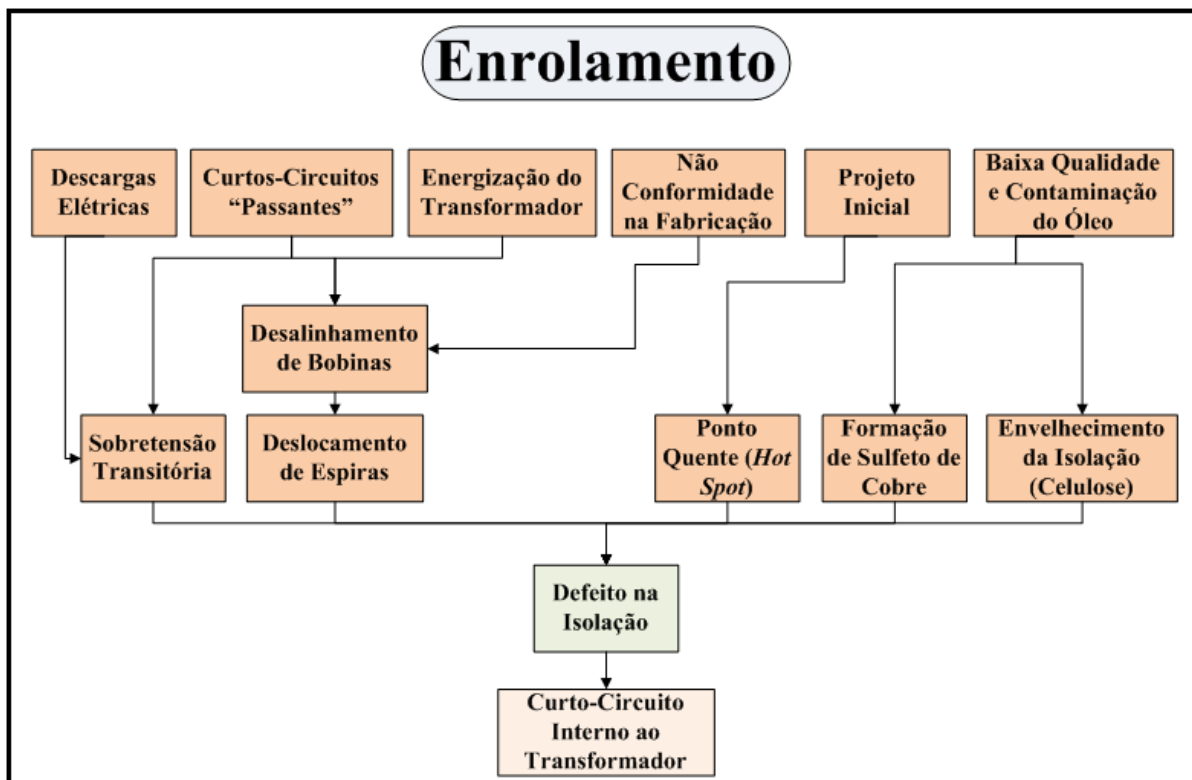


Figura 2.10 - Árvore de falha para o enrolamento.

2.3 ANÁLISE DE FALHAS EM TRANSFORMADORES

Diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de estabelecer índices estatísticos para falhas e os tipos de elementos envolvidos nos transformadores [12].

Um dos mais famosos foi realizado pelo grupo de trabalho 12.05 do CIGRE, que em 1988 publicou resultados de uma pesquisa realizada no período de 1968 a 1978 [4]. Neste estudo foi realizada uma análise de mais de 1000 falhas em uma população de transformadores, totalizando mais de 47.000 unidades-anos, sendo que mais de 7.000 unidades foram analisadas no ano de 1978.

As populações consideradas na pesquisa foram divididas conforme os seguintes parâmetros:

- Tipo da unidade: transformadores em subestações (SE's) de usina, transformadores em subestação convencional e autotransformadores, relacionados para diferentes níveis de tensão (60 a 100 kV, 100 a 300 kV e de 300 a 700 kV);
- Tempo de operação em cada tipo de unidade (0 a 5 anos, 5 a 10 anos e de 10 a 20 anos);
- Unidades com comutador de derivações com carga (CDC) e com comutador de derivações sem tensão (CDST).

Todavia, os resultados que serão apresentados neste trabalho incluirá apenas os dados das unidades com comutador de derivações em carga, tanto para transformadores em SE's de usina quanto para transformadores em SE's convencionais, já que correspondem a uma grande parte da população total de unidades (cerca de 70%). Além disso, para estas análises, o grupo de trabalho do CIGRE não fez nenhuma distinção quanto à idade e nem do nível de tensão do equipamento. Contudo, outros estudos foram realizados na pesquisa mostrando a influência desses parâmetros. De um ponto de vista geral, a taxa de falhas ficou ao redor de 2% e ficou evidenciado que a mesma tende a crescer com o nível de tensão do equipamento.

As Figuras 2.11 e 2.12 [4] apresentam as percentagens de falhas que ocorrem nos transformadores em SE's de usina e em SE's convencionais, destacando-se os principais componentes afetados, bem como a origem da falha.

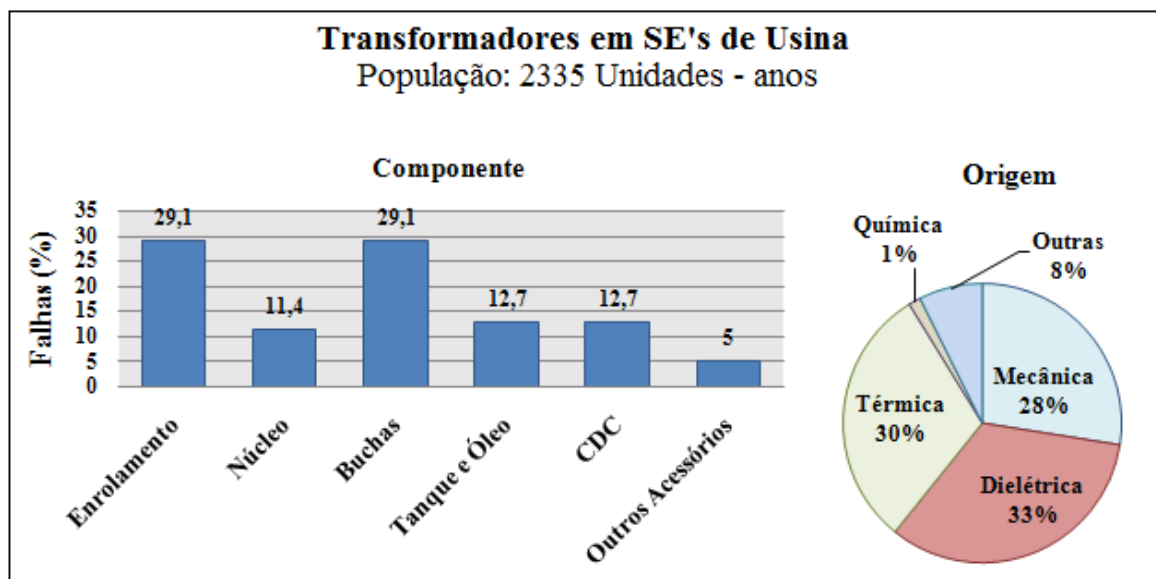


Figura 2.11 - Percentagem de falhas dos transformadores em SE's de usina em relação ao componente afetado e à origem da falha.

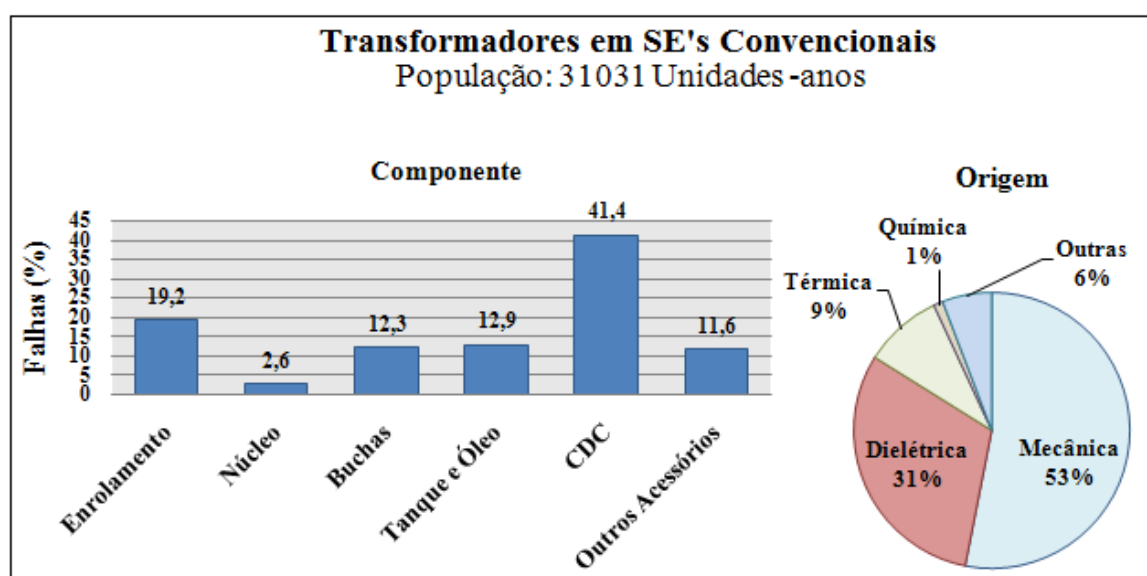


Figura 2.12 - Percentagem de falhas dos transformadores em SE's convencionais em relação ao componente afetado e à origem da falha.

Analisando estes resultados, observa-se que em ambos os tipos de unidades, as falhas nos enrolamentos foram significativas. Além disso, uma grande percentagem das falhas foi de origem mecânica e dielétrica. Quanto às falhas dielétricas, considera-se que algumas delas iniciam-se com os

movimentos mecânicos dos enrolamentos, os quais poderiam ser evitados por meio do monitoramento das condições mecânicas dos enrolamentos e do núcleo.

Deve-se salientar ainda que a percentagem de falhas referentes ao CDC dos transformadores em SE de usina, ilustrada na Figura 2.11, é menor que dos transformadores em SE convencional, identificadas na Figura 2.12. Isto acontece devido ao fato dos transformadores em SE de usina serem monitorados e possuírem programas de manutenção com maior frequência. Enquanto que na maioria dos transformadores em SE's convencionais não apresentam o mesmo rigor técnico mencionado anteriormente [4].

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. Concessionárias 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. Os resultados desta pesquisa estão sintetizados na referência [7], na forma de gráficos e tabelas. A Tabela 2.1 associa o custo total de cada causa de falhas em função do número de ocorrências.

Tabela 2.1 - Custos de falhas.

Causas das falhas	Número	Dólares pagos
Falhas na isolação	24	\$149,967,277
Projeto/material	22	\$64,696,051
Desconhecida	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 (Causa natural ou humana)	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 2.13 [3] 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 da “Banheira”) e evidencia que os períodos mais críticos, em termos de probabilidade de falha de um transformador, ocorrem no início de sua operação e depois de decorridos alguns anos de funcionamento do equipamento.

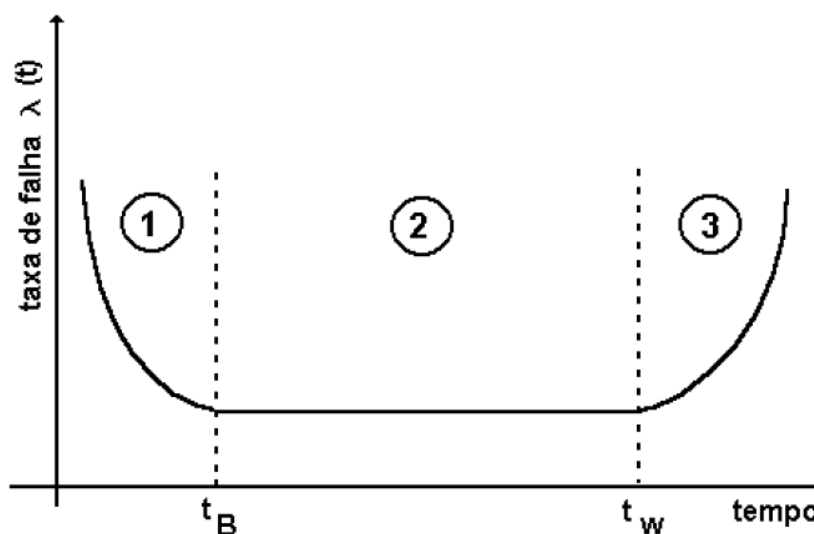


Figura 2.13 - Curva da “Banheira”.

A curva da “banheira” é caracterizada em três regiões típicas [3, 5]:

- Região 1 : Mortalidade infantil (Juventude)
- Região 2 : Vida útil (Maturidade)
- Região 3 : Envelhecimento (Obsolescência)

A região 1, conhecida como de mortalidade infantil (juventude), representa a influência das inadequações de projeto, erros de fabricação, problemas ocorridos durante as fases de transporte e de montagem. Nessa região, a taxa de falha decresce em função do tempo ou da idade.

A região 2, conhecida como a de vida útil (maturidade), é caracterizada por uma taxa de falha constante. Isto é particularmente verdadeiro para componentes de sistemas eletrônicos e sistemas elétricos. Desta forma, durante a vida útil dos componentes, a taxa de falha instantânea mantém-se constante com o tempo.

Nessa região, as falhas ocorrem puramente ao acaso (aleatórias), sendo a única fase na qual a distribuição exponencial é válida, ou seja, como a taxa de falha é constante, as falhas se distribuem exponencialmente ao longo do tempo.

Este período é o de melhor rendimento do componente ou sistema. Isto será particularmente verdadeiro para os vários componentes que integram os sistemas elétricos de potência, desde que, durante o período de vida útil, seja aplicada uma política e uma estratégia adequada de técnicas preditivas associadas a uma manutenção preventiva de boa qualidade. Este fato é muito importante, pois a previsão de confiabilidade de um equipamento, baseado, nos valores de taxa de falha correspondentes ao período de vida útil, não é válida, por extremamente otimista que seja, se os componentes estiverem no seu período de envelhecimento (obsolescência).

A região 3, conhecida como de envelhecimento (obsolescência), representa a fase de fadiga e é caracterizada por um rápido crescimento da taxa de falha com o tempo. É muito comum encontrar desgastes mecânicos, fadiga, envelhecimento, erosão ou corrosão. Quando a taxa de falhas, $\lambda(t)$, atinge patamar muito elevado, o componente ou o sistema deverão ser analisados por critérios técnico-econômicos no que tange a sua permanência em operação. Em alguns casos, é indicada a retirada de operação do componente ou do sistema, para ser submetido a um processo de revitalização e de reconstituição da sua confiabilidade.

Vale ressaltar que é bastante difícil a substituição de um transformador antes que se atinja efetivamente o fim de sua vida útil, devido ao seu elevado custo. Contudo, ao longo do tempo, os custos indiretos envolvidos para se manter um transformador em operação podem tornar tão altos que seja mais viável substituir o equipamento, já que o envelhecimento reduz sua confiabilidade. Dessa forma, o fim de operação de um transformador não está ligado somente à fatores econômicos, mas também com índices técnicos e estratégicos [13].

A falha em um transformador ocorre quando sua suportabilidade em relação à alguns parâmetros chaves (esforços mecânicos, dielétricos, etc) é excedida por estresses intermitentes durante toda sua vida de operação. Esta situação pode-se ser visualizada na Figura 2.14, onde se observa que naturalmente a suportabilidade do transformador é reduzida devido ao seu envelhecimento normal (curva verde). Porém, a falha do equipamento pode-se tornar mais rápida que o normal sob influências de fatores adversos (presença excessiva de umidade, descarga parcial destrutiva, etc) – curva marrom [14].

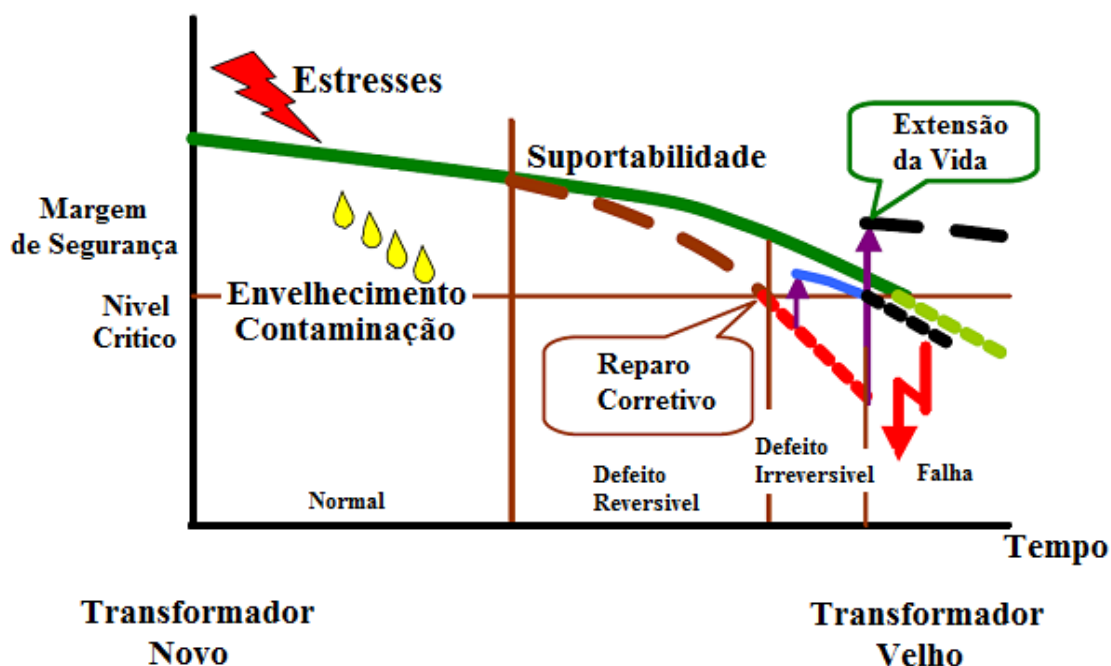


Figura 2.14 - Processo de envelhecimento e redução da suportabilidade do transformador.

Notam-se ainda pela Figura 2.14, diferentes condições de operação durante a vida útil do transformador, as quais são definidas pela Tabela 2.2 [14].

Tabela 2.2 - Definição da classificação das condições de operação de um transformador.

Condição	Definição
Normal	Não há nenhum problema óbvio; nenhuma ação corretiva é necessária; nenhuma evidência de degradação.
Defeito Reversível (Defective)	Nenhum impacto significativo em curto prazo da confiabilidade, porém em longo prazo pode acarretar em um problema, caso nenhuma medida corretiva seja tomada.
Defeito Irreversível (Faulty)	Pode permanecer em serviço, porém existe uma redução da confiabilidade em curto prazo. Pode ou não ser possível melhorar a condição através de uma medida corretiva.
Falha (Failed)	Não pode permanecer em serviço. Ação corretiva a ser realizada antes que o equipamento seja retornado para operação (contudo, o custo de reparo pode não ser viável, sendo necessária a substituição do transformador).

O envelhecimento do sistema de isolamento reduz tanto a suportabilidade mecânica quanto a elétrica do equipamento. Com o tempo, o transformador é sujeito a curtos-circuitos passantes, que resultam em elevadas forças

eletromecânicas. Assim, a isolamento do condutor é enfraquecida ao ponto em que não possa mais ser capaz de suportar solicitações mecânicas devido, por exemplo, a um curto-circuito passante. A isolação espira por espira sofre então uma falha dielétrica, ou ocorre um afrouxamento das amarrações do enrolamento, reduzindo conseqüentemente a capacidade do transformador de suportar futuros curtos-circuitos [2].

O mundo passou por um crescimento industrial significativo pós Segunda Guerra Mundial, principalmente as empresas do setor de energia. O consumo da energia mundial cresceu de um trilhão para 11 trilhões de kWh nas décadas seguintes à guerra. Desta forma, a maioria dos transformadores está agora em seu período de envelhecimento (Região 3 da Figura 2.13). Para ilustrar este fato, o departamento de comércio dos E.U.A. fez um levantamento do total de potência instalada em GVA dos transformadores nos Estados Unidos entre 1964 – 1996 [7]. Esta pesquisa está ilustrada na Figura 2.15.

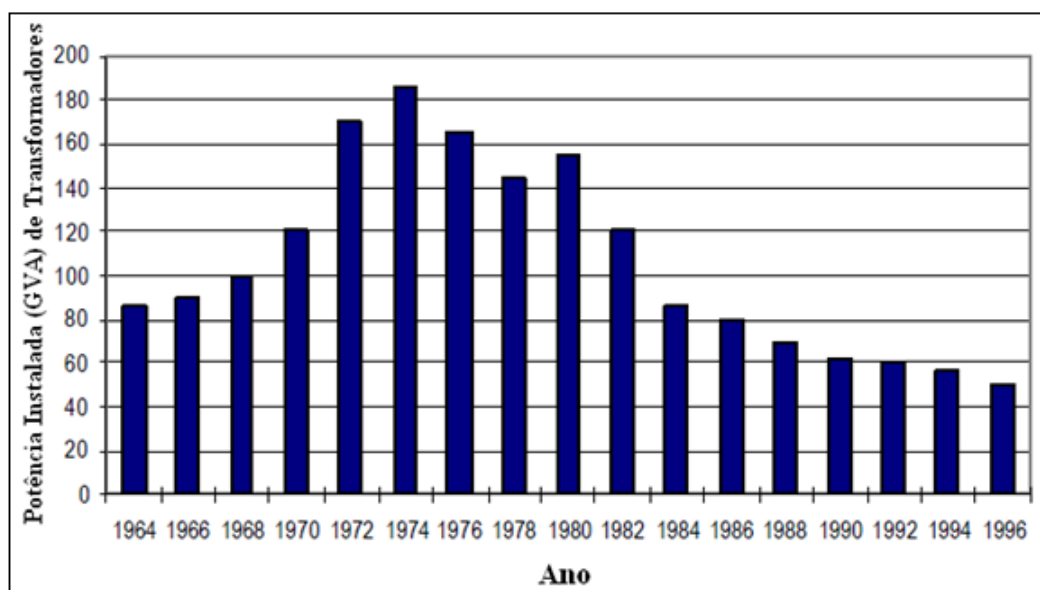


Figura 2.15 - Potência instalada (GVA) de transformadores por ano.

Atualmente, estes equipamentos estão aproximadamente com 30 anos de tempo de operação. Assim, as taxas de falhas destes transformadores foram previstas ao longo do tempo. Este prognóstico, indicado na Figura 2.16, foi

realizado apenas para ilustrar a magnitude de problemas que as indústrias do setor de energia teriam ou terão que enfrentar. Para desenvolvimento desta análise foi realizada a soma das falhas que ocorreriam em virtude dos transformadores produzidos em cada ano (foi considerado o período de 1964 a 1992). Por exemplo, para prever as falhas no ano de 1975, foi realizada a soma das falhas previstas que ocorreriam nos transformadores produzidos em 1964, 1966, 1968, 1970, 1972 e 1974.

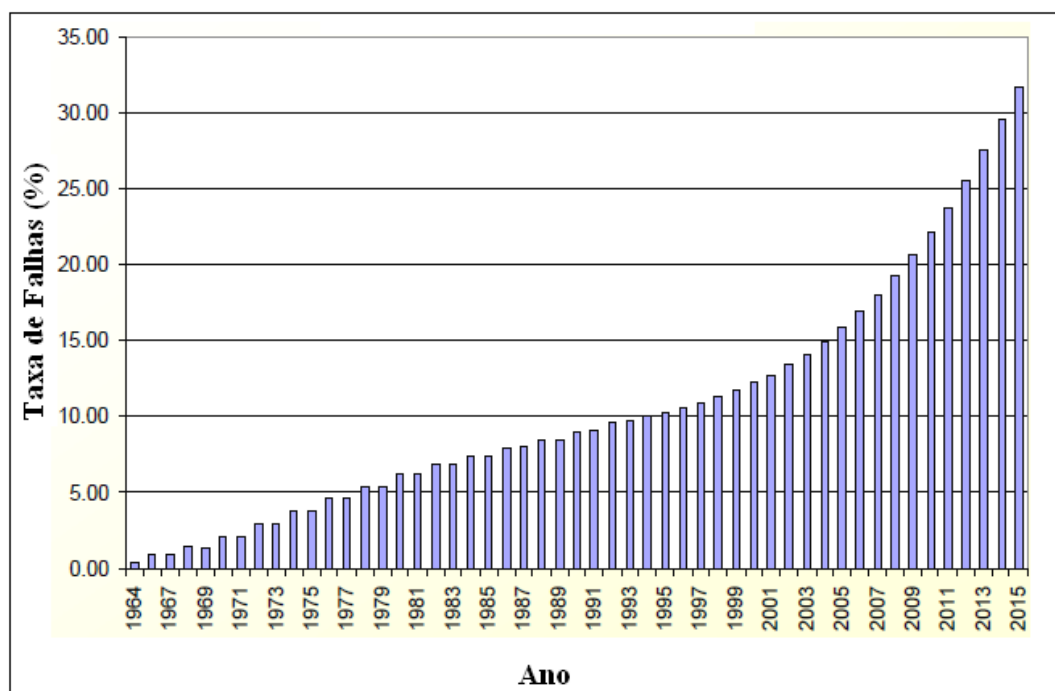


Figura 2.16 - Previsão de falhas em transformadores entre 1964 e 2015.

A Tabela 2.3 apresenta uma distribuição de falhas no transformador em relação ao seu tempo de operação. A “idade média” quanto à falha foi de 18 anos [7].

Tabela 2.3 - Distribuição de falhas pela “idade” do transformador.

“Idade” do Transformador (Anos)	Número de Falhas	Dólares pagos
0 – 5	9	\$11,246,360
6 – 10	6	\$22,465,881
11 – 15	9	\$3,179,291
16 – 20	9	\$10,518,283
21 – 25	10	\$16,441,930
Acima de 25	16	\$15,042,761
Idade desconhecida	35	\$207,734,306

Somado às considerações anteriores, tem-se ainda a impossibilidade de quantificar os estresses intermitentes que ocorrem, tornando-se improvável prever quando realmente o equipamento será submetido a uma falha. Desta forma, atualmente ao invés de se investigar uma avaliação quantitativa, é realizada uma análise qualitativa, tomando-se como base a condição real de operação do transformador.

Da mesma forma que é avaliada a saúde humana, o transformador passa por um processo semelhante, ou seja, apresenta as seguintes fases de análise: qual o seu sintoma; como diagnosticar o problema e por fim se há um tratamento para “curá-lo”. Dentro deste contexto, para a monitoração do desempenho operacional do transformador, necessita-se de empregar uma forma de monitoramento para fornecer uma indicação de um provável defeito. [14].

Desta forma, conforme indica a Figura 2.17 [14], ao transformador pode ser aplicado a seguinte estratégia para condição de monitoramento:

1. Inicialmente, para avaliar se o equipamento está operando normalmente ou se existe algum tipo de defeito, há necessidade de se aplicar em todos os componentes do transformador, técnicas de monitoramento ou detecção de algum defeito que sejam de baixo custo (idealmente aplicadas on-line) e ainda sensíveis e com larga banda de variação, tal que qualquer problema possa ser detectado (não necessariamente diagnosticado). Uma das técnicas de

monitoramento utilizadas geralmente para esta rotina é a análise de gás dissolvido no óleo isolante (*dissolved gas analysis* - DGA);

2. O segundo passo, o qual pode ser descrito como avaliação da condição do equipamento, deveria normalmente ser realizado em poucas unidades (menos que 10 %) e que não fossem classificadas como normal (transformadores categorizados como defeito reversível, defeito irreversível e condição de falha). Para estes transformadores é necessária a aplicação de testes mais precisos e caros (avaliação off-line), de forma que seja capaz de avaliar se o defeito é sério ou não. O objetivo deste passo é identificar o problema do sintoma. Exemplos de testes que possam ser aplicados nesta etapa são medições da corrente de magnetização, da resistência do enrolamento, da análise da resposta em frequência, e de descargas parciais;

3. Finalmente, tendo identificado o problema, é descrito quais são as conseqüências que possam ocorrer, caso não seja tomada nenhuma ação. Além disso, são sugeridas medidas corretivas para o problema detectado.

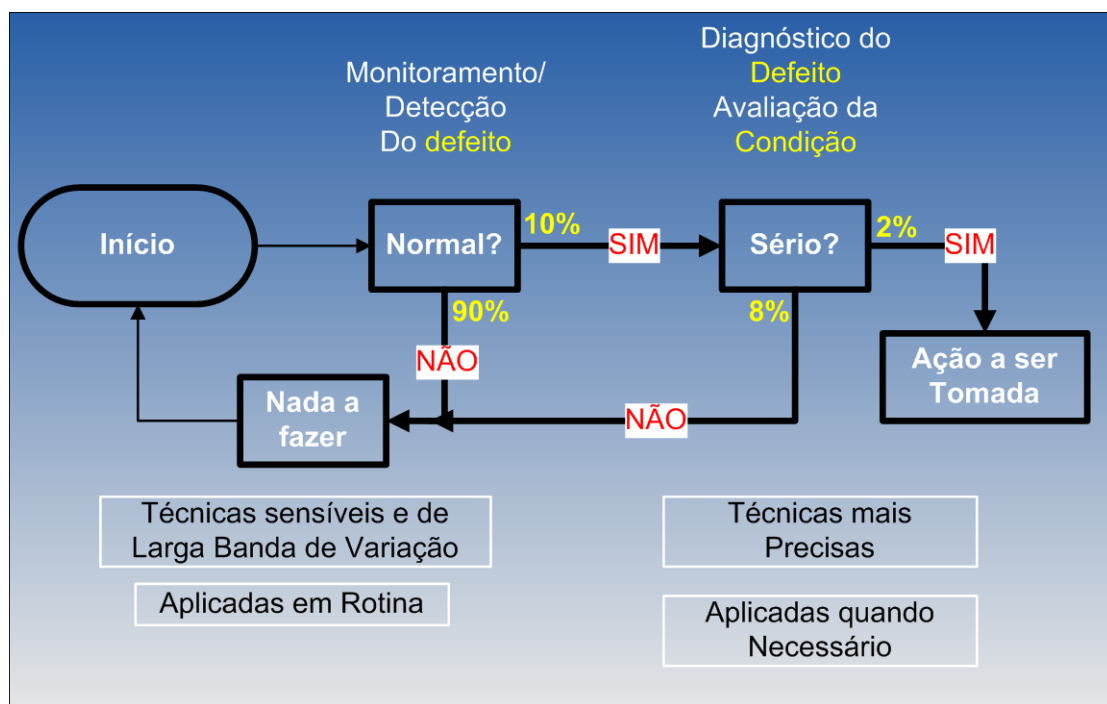


Figura 2.17 - Estratégia para monitoramento da condição do transformador.

Verifica-se, portanto, através dos gráficos e tabelas apresentados ao longo desse capítulo, que as falhas estão vinculadas aos estresses térmicos, dielétricos, mecânicos e químicos. Deve-se salientar ainda que tais fenômenos não ocorrem isoladamente. Contudo, esta dissertação de mestrado avançará somente nos efeitos relacionados às falhas mecânicas.

Neste sentido, este trabalho se baseia nas falhas eletromecânicas causadas pela corrente de curto-circuito “passante” nos enrolamentos do transformador. Diversos trabalhos já foram publicados referentes a problemas do ponto de vista elétrico, dielétrico e térmico. Não obstante a esta consideração, ainda há necessidade de mais estudos, análises e modelagens referentes às falhas de origem mecânica, as quais serão tratadas na sequência deste capítulo.

2.4 ORIGEM DAS FALHAS MECÂNICAS

Os enrolamentos do transformador de potência são dimensionados mecanicamente para suportar os esforços produzidos pela corrente de curto-circuito [15]. Entretanto, existem eventos que ocorrem durante a vida útil do equipamento que, em algum momento, podem provocar algum tipo de falha mecânica. Neste sentido, de caráter introdutório, apresenta-se a seguir uma descrição básica sobre as forças eletromagnéticas. Uma abordagem mais detalhada será apresentada no capítulo subsequente.

2.4.1 Caracterização das Forças Eletromagnéticas

Sabe-se que, de acordo com a teoria eletrodinâmica, a densidade de força num dado volume de um enrolamento de um transformador é igual ao produto vetorial da densidade de corrente no enrolamento pela densidade de fluxo

magnético de dispersão. Esta correlação é dada pela Equação 2.1 [16], que se fundamenta na expressão básica das forças de Lorentz.

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (2.1)$$

Onde $\vec{f}$ é a densidade volumétrica de força magnética [N/m³]; $\vec{J}$ é a densidade superficial de corrente [A/m²] e $\vec{B}$ é a densidade de fluxo magnético de dispersão [T].

A distribuição de fluxo magnético de dispersão é quase que exclusivamente axial (linhas de fluxo paralelas aos enrolamentos) ao longo da maior parte da altura dos enrolamentos e inclina-se nas extremidades dos enrolamentos, buscando o menor caminho de retorno [17]. Essa inclinação provoca a decomposição do campo de dispersão em duas componentes: uma axial e outra radial nas extremidades superior e inferior do enrolamento, conforme mostra a Figura 2.18 [8].

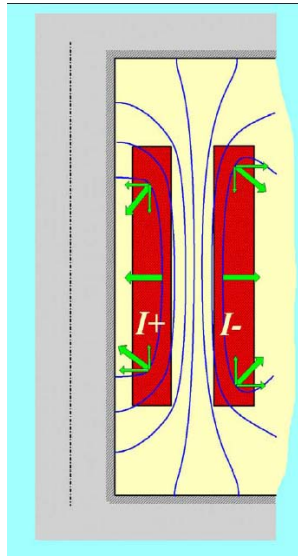


Figura 2.18 - Direção das forças eletromecânicas em uma parte do enrolamento do transformador devido à presença da corrente elétrica.

O processo de interação entre o fluxo de dispersão e a corrente acontece da seguinte forma: a densidade de fluxo magnético de dispersão axial interage com a corrente do enrolamento, resultando em uma força radial. Por outro lado,

a interação entre o campo de dispersão radial com a corrente originando uma força axial, responsável pelos esforços de compressão axial [17-19].

Visto que, a corrente de curto-circuito é determinante na estimativa das forças eletromagnéticas mencionadas anteriormente, optou-se nesta dissertação em apresentar resumidamente a estimativa do cálculo do curto-circuito trifásico.

2.4.2 Curto-circuito trifásico

Os defeitos de isolação permitem o contato direto entre pontos com diferença de potencial, provocando drástica redução na impedância de um circuito. Em consequência, a corrente sobe instantaneamente, na mesma proporção, com ação devastadora sobre os componentes de um sistema.

A consequência do curto-circuito é sempre um corte no fornecimento de energia, interrupção nos processos de fabricação, com prejuízos na produção, prejuízo dos componentes, como também risco à segurança de operadores.

Os prejuízos são minimizados se os componentes como cabos, barramentos, elementos de fixação, transformadores de corrente e comutadores forem especificados para suportar às solicitações térmicas e dinâmicas causadas pela corrente de curto-circuito.

A solicitação térmica, além de ser função do quadrado do valor eficaz da corrente de curto-circuito, depende do tempo de duração desta corrente. Desta forma, é necessária que a proteção contra curto-circuito atue o mais rapidamente possível e separe o ponto de falta da fonte de tensão.

A solicitação dinâmica depende principalmente do quadrado do valor do pico da corrente de curto-circuito. Desta forma, isto exige uma rápida atuação dos equipamentos de proteção. Além disso, os componentes da instalação terão solicitações térmicas e dinâmicas reduzidas, principalmente, caso a corrente de curto-circuito não atinja o seu valor de pico.

Em condições normais, a corrente de um circuito é determinada basicamente pela tensão aplicada e pela impedância da carga. Quando ocorre um curto-circuito, a tensão da fonte de alimentação passa a ser aplicada a uma carga cuja impedância é muito pequena, constituída pela impedância dos condutores situados entre a fonte e o ponto em que se deu a falta, pela impedância do transformador de onde parte o circuito e pelas impedâncias dos equipamentos eventualmente existentes entre o transformador e a falta. A corrente de curto-circuito é praticamente independente da carga e está diretamente relacionada com a capacidade da fonte de energia. Quanto maior a potência do equipamento que funciona como fonte para o sistema, maior será a corrente de curto-circuito.

O impacto que os efeitos térmicos e mecânicos 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, 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 [2].

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 [15]. Para que isso aconteça, os enrolamentos devem ter resistência mecânica suficiente para suportar as forças eletromagnéticas produzidas pelas altas correntes, 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 curto-circuito.

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 transformador [18]. 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 defeitos 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 curtos-circuitos. Muitos destes, no entanto, alcançarão valores inferiores à máxima corrente de curto-circuito possível de ocorrência, e somente em casos raros, um transformador estará sujeito a este fenômeno em seus terminais com a capacidade de curto-circuito total do sistema disponível no lado energizado.

Os sistemas trifásicos distinguem-se essencialmente em 4 classes de curtos-circuitos, que estão representados na Figura 2.19, junto com as indicações dos sentidos de percurso das correntes de curto-circuito. Entre todos os tipos de curto-circuito, o tripolar é o mais fácil de compreender e calcular [20].

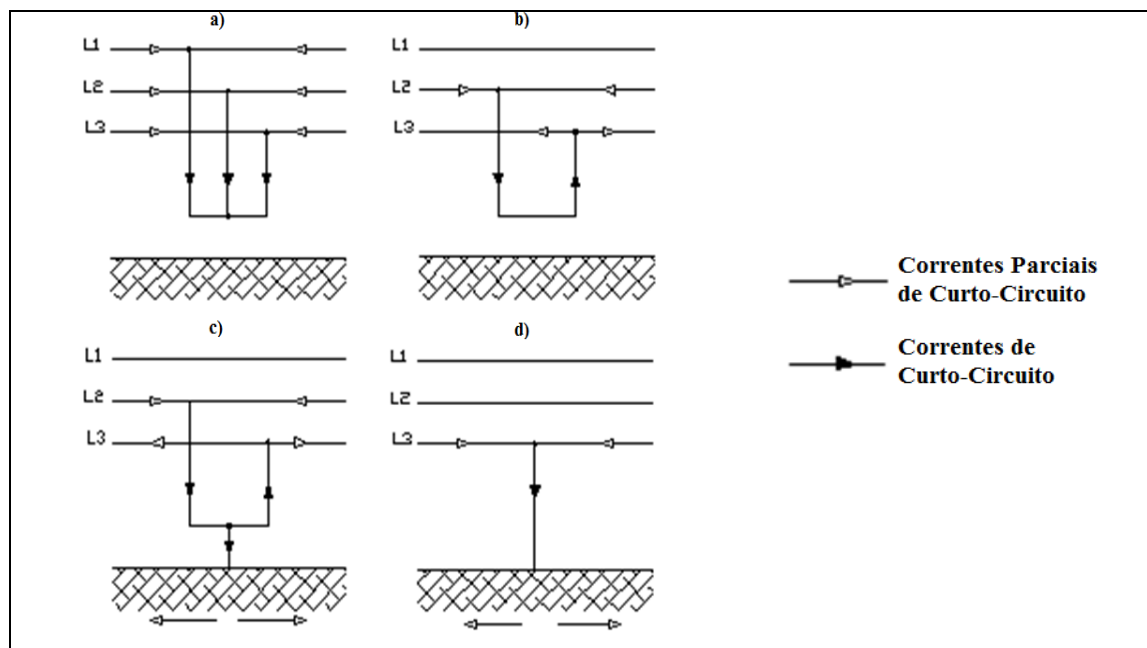


Figura 2.19 - Tipos de faltas e sentido das correntes de curto-circuito em sistemas trifásicos. a) curto-circuito tripolar; b) curto-circuito bipolar sem contato à terra; c) curto-circuito bipolar com contato à terra; d) curto-circuito unipolar à terra.

Dados estatísticos do setor elétrico mostram que a maioria dos curtos-circuitos nos sistemas elétricos ocorre entre fase-terra. Seguem, em termos da frequência de ocorrência, os curtos-circuitos bifásicos e bifásicos à terra e, por último, os curtos-circuitos trifásicos [2]. Destaca-se que apesar dos curtos-circuitos trifásicos ocorrerem com menor frequência, geralmente são os que apresentam maior severidade e, portanto, são os responsáveis pelos maiores esforços mecânicos que ocorrem nos enrolamentos dos transformadores. Por esse motivo, é prática comum projetar transformadores para resistir a esse tipo de curto-circuito em seus terminais [18].

2.4.2.1 Análise do curto-circuito trifásico (tripolar)

Sabe-se que, os sistemas elétricos de potência, geralmente possuem características indutivas. Desta forma, um curto-circuito pode ser representado pelo fechamento da chave “S” no circuito da Figura 2.20 [20].

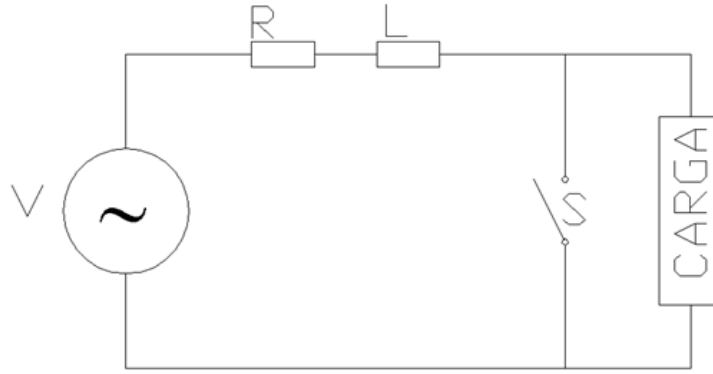


Figura 2.20 - Circuito equivalente de uma rede em curto-circuito trifásico.

Aplicando a Lei de Kirchhoff na Figura 2.20, tem-se:

$$v = Ri + L \frac{di}{dt}$$

Ou de forma mais detalhada a Equação 2.2 [20, 21]:

$$\sqrt{2} \cdot U_f \cdot \text{sen}(wt + \alpha) = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

Onde:

U_f : valor eficaz da tensão (na fase) [V];

R : Resistência do circuito (instalação) da entrada até o ponto em que ocorreu o curto-circuito [Ohm];

L : Indutância do circuito (instalação) da entrada até o ponto em que ocorreu o curto-circuito [H].

A solução da Equação 2.2 é dada pela relação apresentada na Expressão 2.3 [20, 21]:

$$i = -\frac{\sqrt{2}U_f}{\sqrt{R^2 + X^2}} \cdot \text{sen}(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{\sqrt{2}U_f}{\sqrt{R^2 + X^2}} \cdot \text{sen}(wt + \alpha - \varphi) \quad (2.3)$$

Onde:

$X = \omega L$: Reatância indutiva do circuito (instalação) da entrada até o ponto em que ocorreu o curto-circuito [Ohm];

α : Instante em que ocorre o fechamento da chave “S”;

φ : Defasagem entre a tensão e a corrente.

Observando a Equação 2.3, conclui-se que a corrente de curto-circuito é composta de duas parcelas, ou seja [20, 21]:

- Uma parcela de comportamento senoidal, dada por:

$$i_{AC}(t) = \frac{\sqrt{2}U_f}{\sqrt{R^2 + X^2}} \cdot \text{sen}(\omega t + \alpha - \varphi)$$

- Uma parcela de comportamento exponencial, unidirecional, dada por:

$$i_{DC}(t) = \frac{\sqrt{2}U_f}{\sqrt{R^2 + X^2}} \cdot \text{sen}(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

Nestas condições, a corrente de curto-circuito tem a forma de onda típica ilustrada na Figura 2.21 [20].

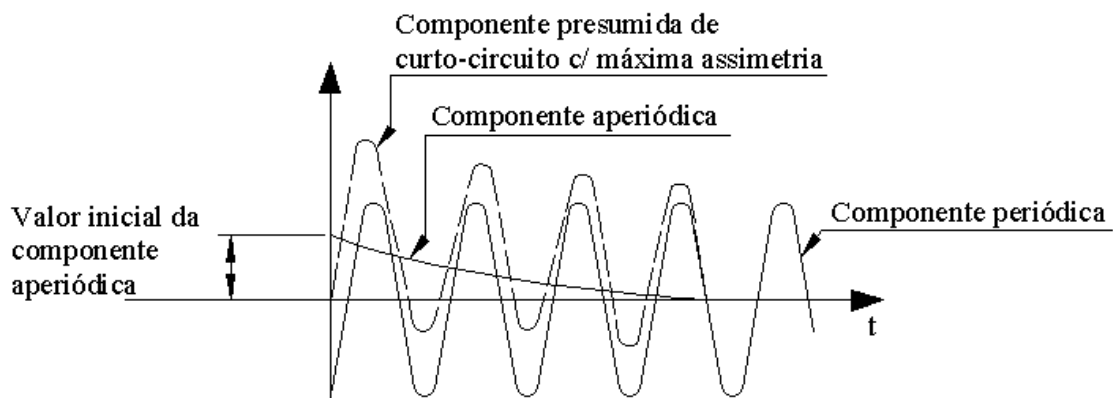


Figura 2.21 - Corrente de curto-circuito ($\alpha = \varphi \pm 90^\circ$).

a) Cálculo do valor eficaz da corrente de curto-circuito (simétrico)

Para analisar os efeitos térmicos provocados pela corrente de curto-circuito em um equipamento, lança-se mão de um artifício, que simplifica bastante a seqüência de cálculo [20].

Como a componente alternada da corrente de curto-circuito tem a mesma forma de onda da tensão, seu valor eficaz (valor simétrico) pode ser obtido a partir do valor eficaz da tensão, a qual é calculada pela Equação 2.4[20]:

$$I''_K = \frac{U_f}{Z} \quad (2.4)$$

Onde:

Z : Impedância do circuito (instalação) da entrada até o ponto em que ocorreu o curto-circuito [Ohm].

b) Cálculo do valor de crista (pico) da corrente de curto-circuito (assimétrico)

O efeito dinâmico provocado por uma falta trifásica é o maior valor instantâneo da corrente de curto-circuito. Como a partir da Expressão 2.4, é conhecido o valor eficaz da componente alternada, o maior valor instantâneo da corrente de curto-circuito pode ser determinado a partir da Expressão 2.5 [20].

$$I_s = f_i * \sqrt{2} * I''_K \quad (2.5)$$

Onde:

f_i : Fator de impulso ou fator de assimetria, que leva em consideração a influência da componente contínua.

O fator de impulso ou de assimetria pode ser obtido a partir de dados do circuito, com auxílio da Equação 2.6 [20, 21].

$$f_i = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3,03 \frac{R}{X}} \quad (2.6)$$

O valor de f_i , também, pode ser obtido a partir da curva da Figura 2.22[20] e/ou Tabela 2.4 [22], que representa a Equação 2.6.

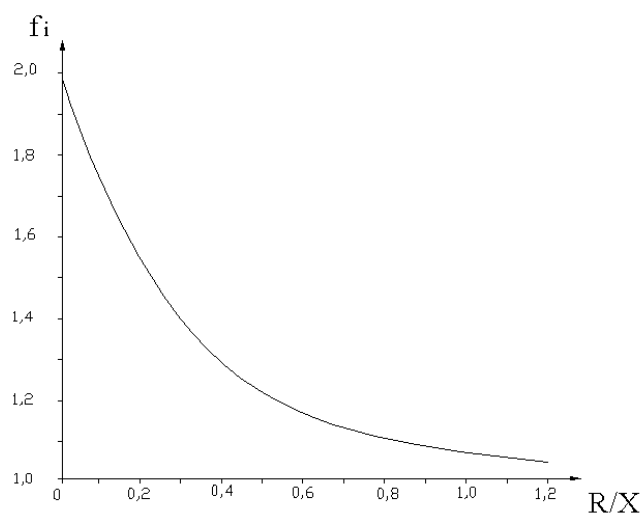


Figura 2.22 - Fator de impulso em função da relação R/X .

Tabela 2.4 - Valores para o fator de impulso de acordo com a relação R/X .

Relação R/X	1	0,67	0,5	0,33	0,25	0,2	0,167	0,125	0,1	$\geq 0,071$
Fator de Impulso f_i	1,07	1,16	1,25	1,38	1,48	1,55	1,61	1,68	1,74	1,8
Fator $f_i \cdot \sqrt{2}$	1,51	1,64	1,76	1,95	2,09	2,19	2,27	2,38	2,46	2,55

Conclui-se então que para determinação das solicitações térmicas e mecânicas provocadas pela corrente de curto-circuito, deve-se calcular o seu valor eficaz, responsável pelo efeito térmico, e o seu valor de pico, responsável pelo efeito dinâmico.

2.4.2.2 Cálculo das correntes de curto-circuito utilizando-se o método simplificado

Para efetuar uma estimativa para o cálculo do nível de curto-circuito de uma instalação, considera-se que o curto-circuito trifásico ocorra na saída do transformador. Nestas condições, a única impedância envolvida no sistema será a do equipamento mencionado. Com isso, substitui-se a impedância equivalente do circuito pela do transformador. Nestas condições, tem-se que o valor eficaz da corrente de curto-circuito pode ser calculado pela Expressão 2.7 [20]:

$$Ik'' = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{trafo}} \quad (2.7)$$

Onde:

$$Z_{trafo} = \frac{Z\% \cdot U_n^2}{S_n \cdot 100} \quad (2.8)$$

Sendo:

$Z\%$: impedância percentual do transformador;

U_n : tensão eficaz nominal fase-fase (V);

S_n : potência nominal de saída do transformador (VA).

Portanto:

$$Ik'' = \frac{S_n \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot Z\% \cdot U_n} \quad (2.9)$$

O valor dinâmico da corrente de curto-circuito será dado pela Equação 2.10 [20]:

$$Is = fi \cdot \sqrt{2} \cdot Ik'' \cong 2 * Ik'' \quad (2.10)$$

Dentro do exposto, pode-se calcular com base no esquema elétrico fornecido, as correntes de curto-circuito trifásico, levando-se em consideração os métodos completo e o simplificado.

A título de ilustração a Figura 2.23 [2] mostra uma situação de máxima assimetria da corrente de curto-circuito trifásica (relação X/R de aproximadamente 0,075). Diante do interesse em analisar o comportamento dos esforços eletromecânicos, a Figura 2.24 ilustra a forma de onda da força devido à esta corrente imposta nos enrolamentos dos transformadores.

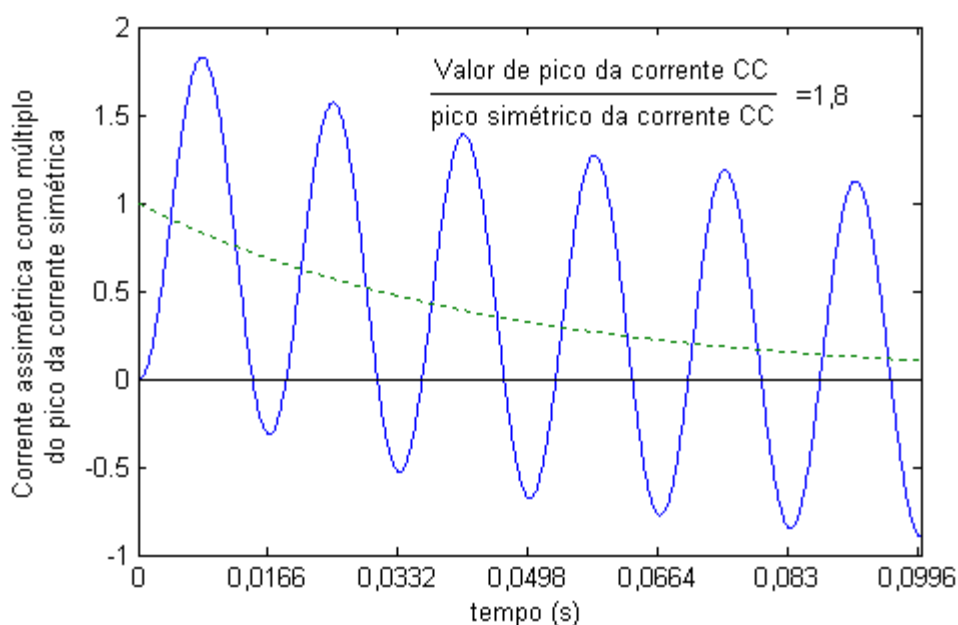


Figura 2.23 – Forma de onda da corrente de curto-circuito trifásico em função do tempo.

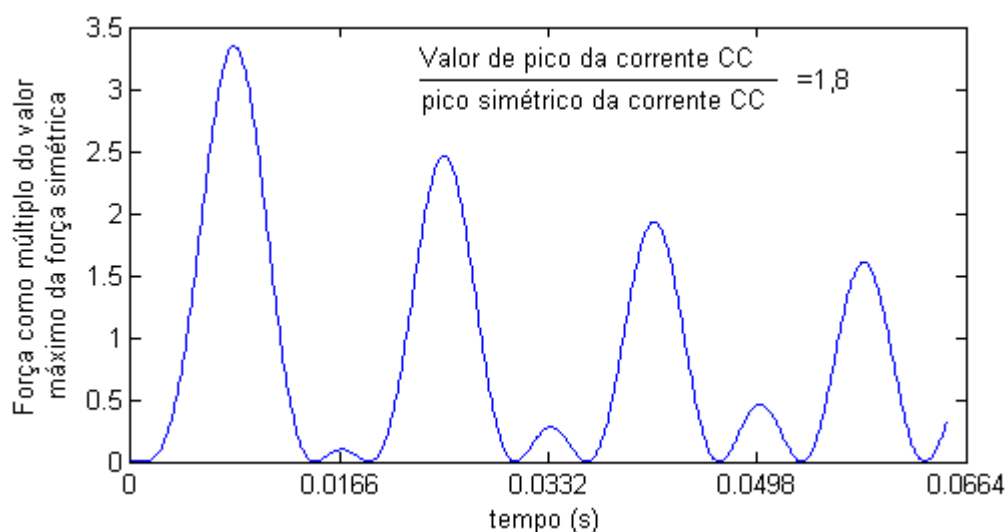


Figura 2.24 – Forma de onda da força em função do tempo durante um curto-circuito trifásico.

Tomando-se como base as Figuras 2.23 e 2.24, observa-se que os esforços que agem nos condutores são pulsantes e aumentam com o quadrado da corrente.

Em geral, a impedância de curto-circuito de transformadores de potência são superiores a 4% ou mesmo superiores a 8%, que resultam em correntes dinâmicas de simplificação $I_s = f_i \cdot \sqrt{2} \cdot I_k \cong 1.8 \cdot \sqrt{2} \cdot 1/0.08 \cong 32$ vezes a corrente nominal. Todavia este valor é muito conservativo e deriva da simplificação da Expressão 2.3. Portanto, as forças nos enrolamentos podem alcançar um valor de 1024 vezes em relação àquelas em regime normal de operação do equipamento [17].

Finalmente, deve-se destacar que outro fator importante para a vida de transformadores é a frequência da ocorrência dos curtos-circuitos. Embora, as estruturas de suporte e os sistemas isolantes sejam projetados para resistir aos máximos estresses provocados por estas correntes, a ocorrência com maior frequência de curtos, tende a prejudicar a isolação, reduzindo gradativamente sua resistência aos esforços mecânicos. Assim, os estresses eletromecânicos merecem uma atenção especial durante fenômenos de curto-circuito.

2.5 FALHAS ELETROMECAÂNICAS EM TRANSFORMADORES

Este item tem por objetivo abordar os principais aspectos relacionados com as solicitações mecânicas resultantes de curto-circuito trifásico. Adicionalmente, destacam-se os principais tipos de falhas ocorridas em transformadores. Entretanto, objetivando uniformizar o entendimento sobre a terminologia existente sobre o assunto é realizada uma breve revisão dos termos e definições comumente empregados em estudos da mecânica dos materiais.

Os defeitos mecânicos em transformadores de potência ocorrem na parte ativa do equipamento, e constituem-se da deformação e/ou o deslocamento dos enrolamentos. Esses defeitos são provocados por esforços mecânicos internos (interação dos campos magnéticos) ou externos ao equipamento.

A ocorrência desse tipo de defeito muitas vezes não é imediatamente perceptível. Por isso, geralmente não retiram o transformador de operação. Entretanto, o transformador com alterações mecânicas em seus enrolamentos tem menor robustez, o que pode reduzir o final de sua vida útil.

Destaca-se, que os mecanismos de falhas em transformadores de núcleo envolvido diferem de núcleo envolvente. Neste trabalho será analisado como as forças se distribuem em um transformador de núcleo envolvido, já que os transformadores a serem estudados nos capítulos posteriores apresentam este modelo de núcleo. Contudo, tipos de falhas para ambos os tipos de configuração dos enrolamentos podem ser encontrados em [1].

2.5.1 Tipos de Falhas Mecânicas nos Enrolamentos

A seguir serão analisados alguns tipos de falhas nos enrolamentos devido aos esforços eletromecânicos.

2.5.1.1 Falhas Devido a Forças Radiais

Forças radiais produzem efeitos diferentes nos enrolamentos externo e interno de transformadores. Em equipamentos de núcleo envolvido a tendência dos esforços eletrodinâmicos é comprimir (estresses de compressão) o enrolamento interno e expandir (estresses de tração) o enrolamento externo, conforme ilustra a Figura 2.25 [26].

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 [1].

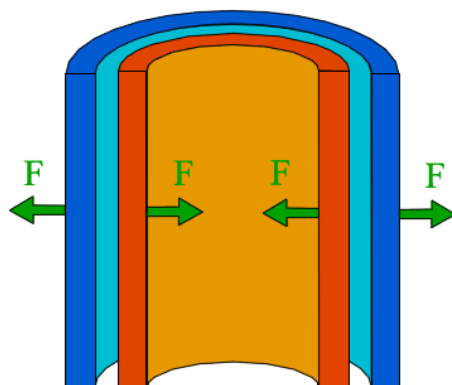


Figura 2.25 - Sentido das forças radial do enrolamento interno e externo em um transformador.

As consequências desse tipo de deformação são [26, 27]:

- Alongamento do isolante que reveste os condutores dos enrolamentos. Isto é altamente prejudicial, pois degrada significativamente o material isolante, reduzindo a vida útil do transformador;
- Diminuição das distâncias de isolamento entre o enrolamento interno e o núcleo. Com isso há uma redução da capacidade do transformador de

suportar surtos de tensão. Além disso, modifica a distribuição do campo elétrico ao longo do enrolamento, podendo submeter partes do material isolante a maiores estresses elétrico;

- Diminuição das distâncias de isolamento do enrolamento externo ao tanque ou a outro enrolamento do equipamento. No caso de transformadores trifásicos, provoca os mesmos efeitos do anterior;
- Afrouxamento das amarrações dos enrolamentos. Isto permite certa mobilidade dos condutores, o que provoca vibrações e, em longo prazo, a fadiga do material isolante e das conexões. Além disso, reduz a robustez do transformador frente a correntes de curto-circuito.

a) Enrolamentos Sujeitos aos 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*. Sobre este quesito é importante destacar alguns aspectos relacionados à resistência mecânica dos condutores submetidos às forças de tração.

Nos condutores utilizados em enrolamentos compactos, tipo disco ou em qualquer uma das camadas de enrolamentos multicamadas, verifica-se uma força de tração uniforme. Essa força, dependendo de seu valor, poderá causar danos à isolamento do condutor, caso o estresse de tração exceda o limite de escoamento do condutor [1, 18].

b) Enrolamentos Sujeitos aos Estresses de Compressão

Este tipo de esforço é experimentado pelos enrolamentos de um transformador, em decorrência das cargas de compressão radial a que podem ficar expostos. A Figura 2.26 [1] ilustra este evento em um transformador.

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 2.26 (a). Os espaçadores neste caso estão localizados axialmente, e a estrutura de suporte como um todo, tem rigidez mecânica maior que a dos condutores [18]. 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 “instabilidade forçada” (*forced buckling*), está ilustrado na Figura 2.26 (b), assemelhando-se a uma estrela de várias pontas. Este tipo de deformação também é ilustrado pela Figura 2.27 [28].

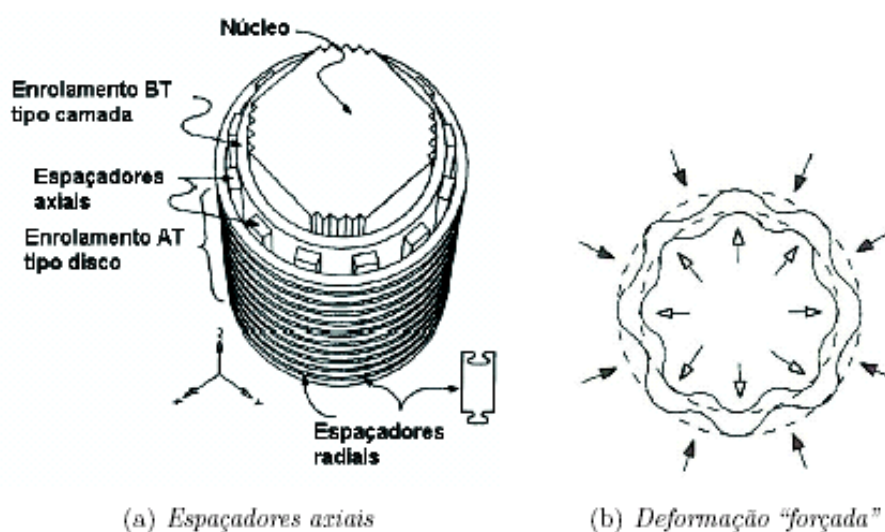


**Figura 2.26 - a) Ilustração dos espaçadores axiais e outros componentes do transformador;
b) “Instabilidade forçada” (*forced buckling*) no enrolamento.**

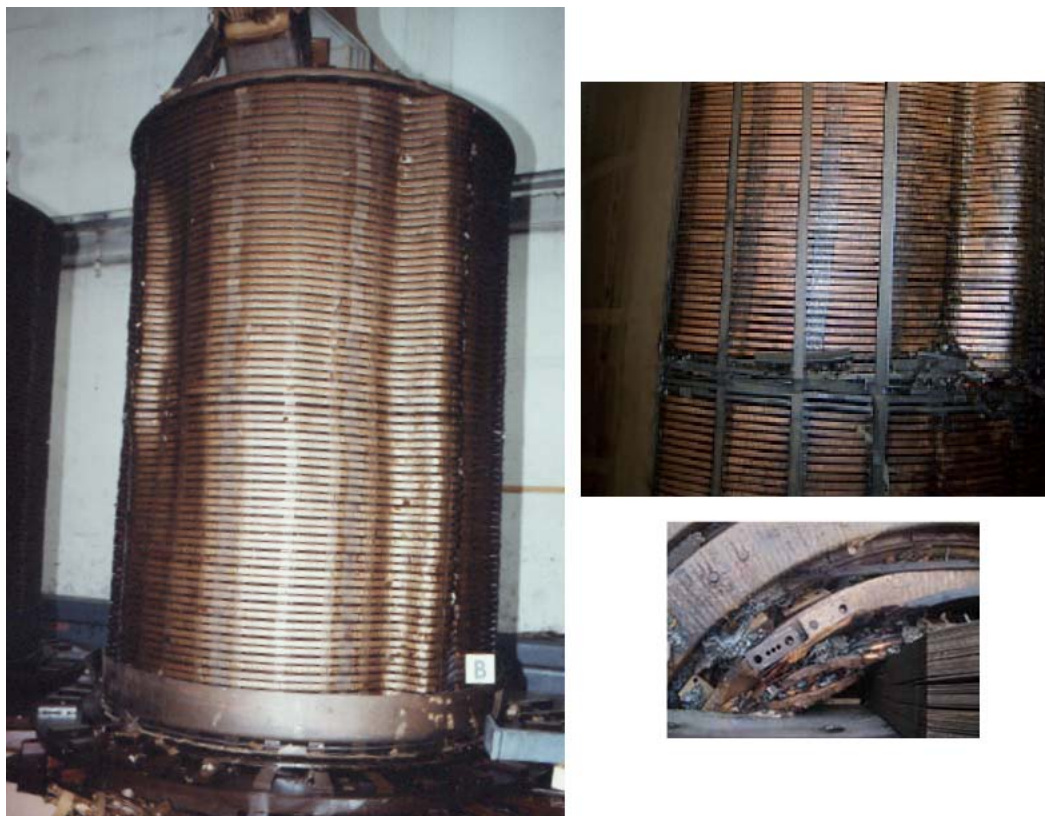


Figura 2.27 - Falha em enrolamentos devido à uma alta compressão radial no enrolamento causando uma saliência no mesmo – *forced buckling*.

A outra forma de deformação que afeta o enrolamento é chamada “instabilidade 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 2.28 [1].

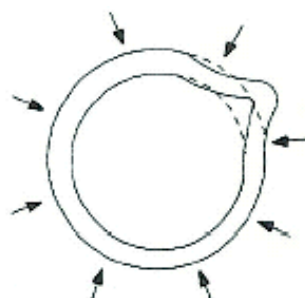


Figura 2.28 - Instabilidade livre no enrolamento interno: *free buckling*.

A Figura 2.29 [1, 10, 13] também ilustra este evento em um transformador real.



Figura 2.29 - Falha em enrolamentos devido à uma alta compressão radial causando uma saliência nos mesmos – free buckling.

Os dois tipos de deformações relatados podem ser vistos como um conjunto seqüencial de falhas, que iniciam no condutor mais externo do enrolamento interno e caminha no sentido do condutor mais interno deste enrolamento (próximo ao núcleo) [29]. Existem muitos fatores que podem favorecer a ocorrência da deformação dos enrolamentos, dentre os quais, pode-se citar: enrolamentos “frouxos”, utilização de materiais com características inferiores às mínimas requeridas, excentricidade dos enrolamentos, baixa resistência das estruturas de suporte em relação ao condutor, etc.

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 [29]. 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.

2.5.1.2 Falhas Devido a Forças Axiais

A deformação axial se configura como mostra a Figura 2.30 [26] apresentando uma vista de frente dos enrolamentos de um transformador figurativo antes e depois da deformação. Enquanto que, a Figura 2.31 [10] ilustra o problema em um transformador real.

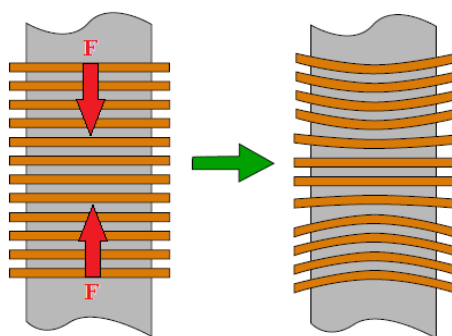


Figura 2.30 - Representação de uma deformação axial em um enrolamento do transformador.



Figura 2.31 - Colapso axial devido a uma excessiva força axial causada por um curto-circuito.

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 isolação do condutor e, eventualmente, levar a um curto-circuito entre espiras. Outro tipo de falha ocorre quando um enrolamento vibra sob a ação de forças axiais. Nessa situação, a isolação do condutor pode danificar-se devido ao movimento relativo entre enrolamento e os espaçadores isolantes localizados axialmente [27].

Altas forças de compressão axial nas extremidades enrolamentos 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 [1].

Adicionalmente, às falhas devido às forças axiais descritas anteriormente, existem outros dois importantes tipos de falhas, a saber: flexão entre espaçadores radiais (*bending*) e o tombamento (*tilting*), os quais são analisados na sequência deste capítulo [1].

a) Flexão de Condutores Entre Espaçadores Radiais (*Bending*)

Sob a ação de forças axiais, o condutor de um enrolamento pode curvar-se entre os espaçadores isolantes localizados radialmente. Essa flexão do condutor ilustrada na Figura 2.32 [2, 8] e Figura 2.33 [6, 10] pode, também, resultar em danos à sua isolação. Portanto, observa-se que a curvatura da deformação ocorrerá num plano vertical e não horizontal como ocorre na ação das forças radiais.

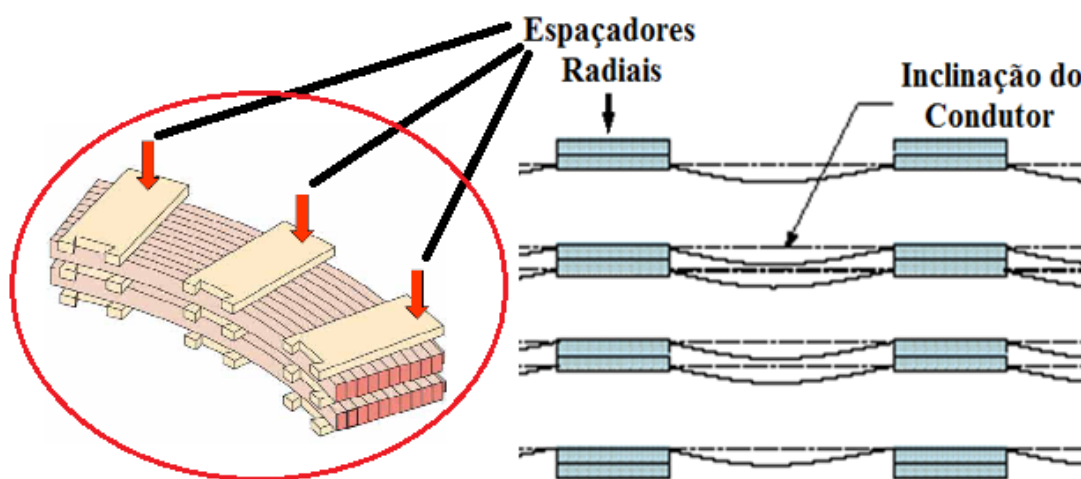


Figura 2.32 - Flexão dos condutores entre espaçadores radiais (*Bending*).

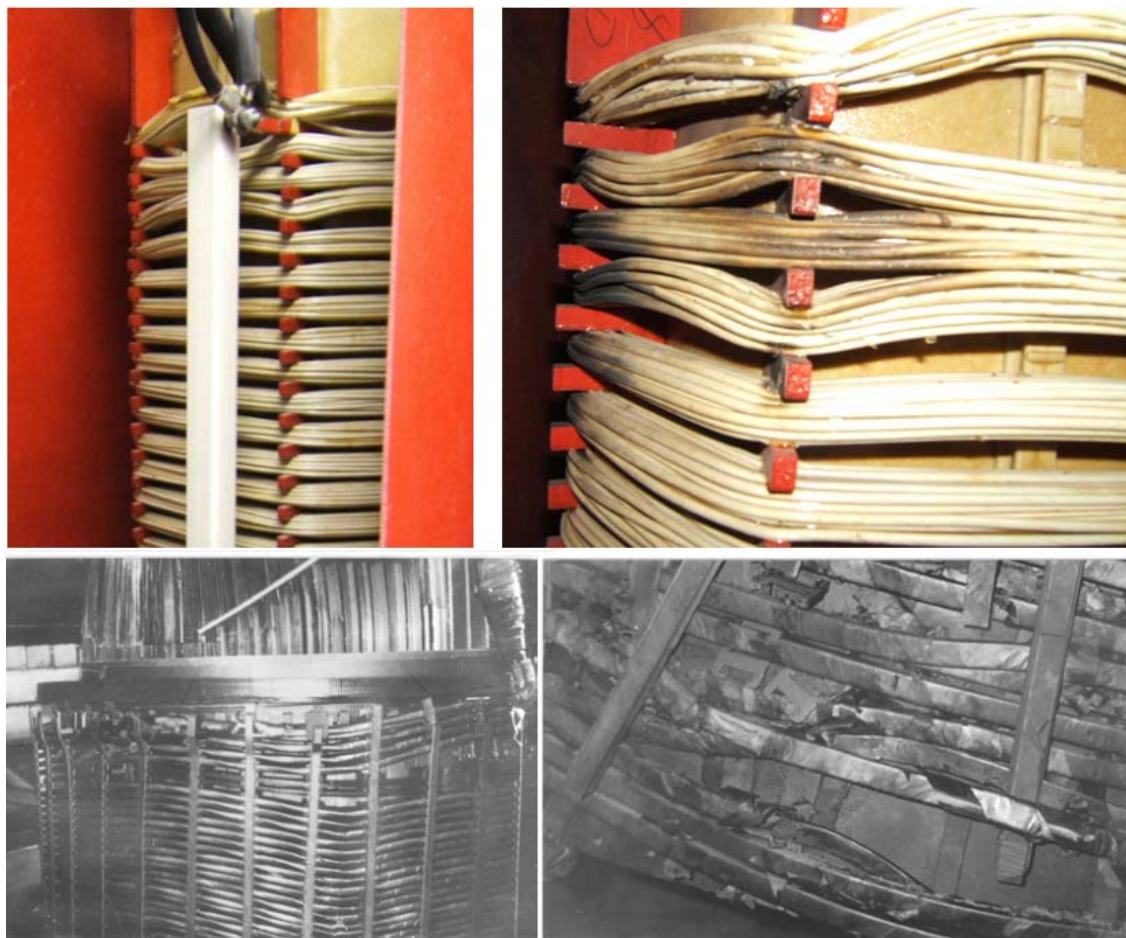


Figura 2.33 - Problema da flexão dos condutores entre espaçadores radiais (Bending) em transformadores.

b) Tombamento Devido à Carga Axial (Tilting)

Este tipo de falha, devido também à 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 2.34 [8] mostra os condutores na posição normal e a inclinação dos mesmos deformados devido à ação de forças axiais críticas. Nota-se que, devido à força imposta, ocorre um deslocamento da seção transversal dos condutores em torno do eixo de simetria perpendicular.

Além dessas ilustrações, pode-se observar a ocorrência de inclinação em um transformador real mostrado pela Figura 2.35 [12].

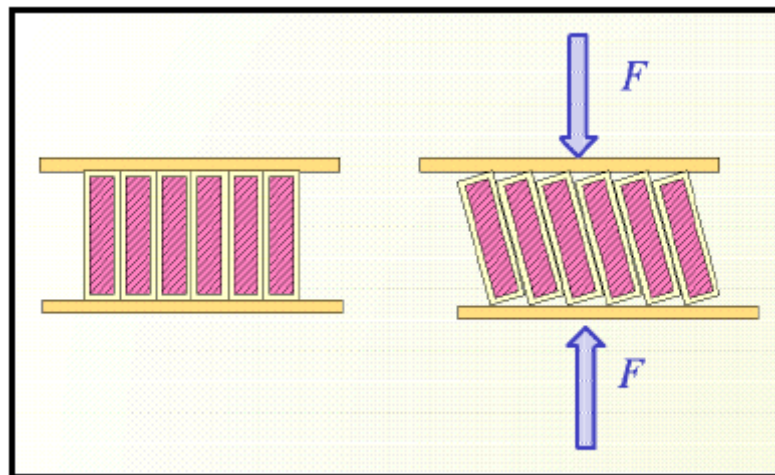


Figura 2.34 - Tombamento devido a forças axiais – seção transversal.



Figura 2.35 - Ocorrência do fenômeno de tombamento (Tilting) – Os condutores deveriam estar todos na vertical.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo inicialmente apresentou uma abordagem geral das falhas em transformadores. Para tanto, foram desenvolvidos alguns fluxogramas denominados por árvores de falhas, onde foram tratadas possíveis causas e efeitos das falhas nos principais componentes do equipamento. Em seguida, foram fornecidas algumas informações estatísticas associadas às falhas em transformadores, quais sejam: origem dielétrica, térmica, química e mecânica. Verificou-se que a presença de falhas no equipamento demanda altos custos ao setor elétrico. A questão relacionada à vida útil do transformador também foi explorada, alertando que há uma tendência ao crescimento na quantidade de unidades com aproximadamente 30 anos de operação. Nesta situação operacional, os transformadores são mais propensos a um maior risco de falha, pois, com o envelhecimento, a suportabilidade do equipamento é bastante reduzida. Dessa forma, o capítulo retrata a importância no emprego de técnicas e metodologias capazes de diagnosticar a condição do transformador, a fim de evitar inesperadas saídas de operação, e conseqüentemente grandes impactos econômicos. Baseado na grande ocorrência de falhas mecânicas, e no objetivo principal desta dissertação. Este capítulo faz uma explanação relacionada à origem das falhas mecânicas, destacando-se as forças eletromagnéticas e as correntes de curto-circuito trifásico. Assim, são fornecidos métodos analíticos aproximados e exatos para estimar tais correntes. Por fim, são apresentados os principais tipos de falhas mecânicas, os quais estão associados às forças radiais e axiais. Constata-se que a força radial provoca o efeito de tração no enrolamento externo e de compressão no interno. Além disso, é mais comum a ocorrência de falhas por compressão que por tração. A compressão pode manifestar-se de duas maneiras distintas. Uma delas ocorre quando o enrolamento interno está firmemente sustentado por espaçadores, causando o tipo de deformação

denominada *forced buckling*. Por outro lado, quando não se faz uso desses suportes, o efeito de compressão pode dar origem à deformação denominada *free buckling*. Em relação à força axial, ambos os enrolamentos estarão sujeitos a esforços de compressão, podendo causar outros tipos de falhas, tais como, o efeito *bending* nas espiras e o efeito de *tilting* dos condutores.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA ANALÍTICA PARA CÁLCULO DOS ESFORÇOS ELETROMECAÑICOS EM ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Sabe-se que uma das maiores razões de falhas internas dos transformadores é a redução da suportabilidade mecânica da isolação dos seus condutores/enrolamentos face às vibrações causadas pelas forças eletromecânicas produzidas pelas altas correntes de curto-circuito. Neste contexto, este capítulo apresenta uma metodologia analítica para estimar o estresse eletromecânico em transformadores causados por curtos-circuitos trifásicos. Desta forma, detalham-se as características das forças radiais e axiais e conseqüentemente os estresses eletromecânicos passíveis de ocorrência nos enrolamentos dos transformadores. Complementando os aspectos anteriores, a metodologia analítica é aplicada em um transformador típico de força, com potência de 5 MVA e um outro de distribuição de 15 kVA. Ambos com dois enrolamentos concêntricos.

3.2 METODOLOGIA ANALÍTICA PARA CÁLCULO DAS FORÇAS RADIAIS EM ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS

As componentes das forças agindo radialmente em enrolamentos concêntricos de um transformador são facilmente e precisamente calculadas por métodos elementares. A Figura 3.1 [2, 18] mostra uma seção transversal de um lado dos dois enrolamentos de um transformador. Esta é a figura simples em 2D freqüentemente usada para cálculos de reatância. O enrolamento externo está em um campo axial, o qual causa uma força radial agindo para fora tendendo a “esticar” o condutor. Por outro lado, o enrolamento interno experimenta uma força similar agindo para dentro tendendo a comprimi-lo. Observa-se que a distribuição do campo axial pode ser aproximada por um trapézio, onde seu máximo valor é constante na região entre o enrolamento interno e externo.

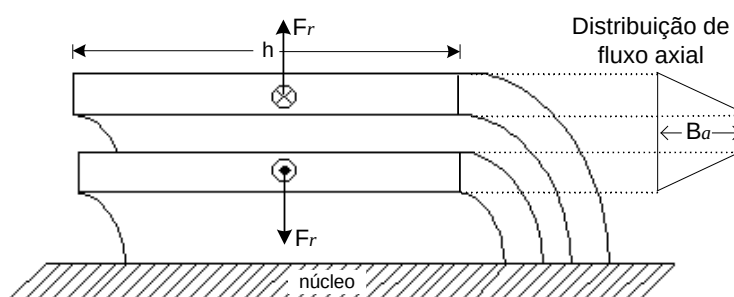


Figura 3.1 - Seção transversal de um transformador com enrolamentos concêntricos mostrando as forças radiais (F_r) e a distribuição de fluxo axial (B_a).

A Figura 3.2 [2, 18] também apresenta o sentido das forças em ambos os enrolamentos, a partir de um vista em planta superior.

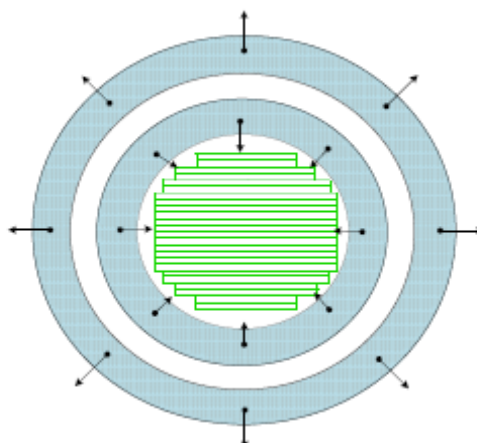


Figura 3.2 - Forças produzindo estresse de tração nos enrolamentos externos e estresses compressivos no enrolamento interno.

Deve-se salientar que as forças radiais são levemente menores ao final dos enrolamentos devido a uma curvatura do fluxo magnético, a qual pode ser notada pela Figura 3.3 [1]. Com o objetivo de facilitar os cálculos necessários à obtenção das forças, a curvatura do campo próximo às extremidades dos enrolamentos é desprezada. Esta aproximação é perfeitamente justificável, uma vez que é o valor máximo da força que interessa e este ocorre no ponto médio do enrolamento.

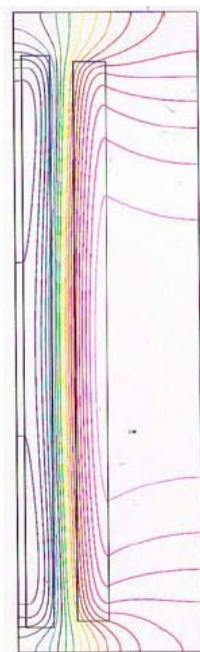


Figura 3.3 – Detalhe da curvatura do fluxo magnético nas extremidades dos enrolamentos.

3.2.1 Forças e estresses no enrolamento externo

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 Expressão (3.1):

$$dF = B \cdot I_s \cdot dl \cdot \sin\theta \quad (3.1)$$

Onde, θ é o ângulo formado pelos vetores $d\vec{l}$ e $\vec{B}$. A partir da Equação anterior, determinam-se as forças eletromagnéticas atuando em um enrolamento de n espiras, percorridas por uma corrente de curto-circuito I_s (valor de crista [A]), lembrando-se que $\theta = 90^\circ$. Dessa maneira, integrando-se a Equação, o módulo da força que atua nas bobinas do transformador pode ser obtido pela Equação (3.2).

$$F = n \cdot I_s \cdot B \cdot l \quad (3.2)$$

Sendo, n o número de espiras do enrolamento, e l o comprimento da espira.

Considerando que o comprimento de uma espira circular é igual a $l = \pi \cdot D_m$, a Equação, que define a força radial total atuando sobre o enrolamento, pode ser reescrita na forma da Equação (3.3).

$$F = B \cdot n \cdot I_s \cdot \pi \cdot D_m \quad (3.3)$$

Onde, D_m é o diâmetro médio do enrolamento [m].

Sabe-se que o fluxo axial, B_a , é fornecido pela Expressão (3.4).

$$B_a = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot I_s}{h} = \frac{4\pi 10^{-7} \cdot n \cdot I_s}{h} [T] \quad (3.4)$$

Onde, h é a altura do enrolamento [m].

Como todos os enrolamentos estão envolvidos com o valor médio da densidade de fluxo ($1/2 B_a$). Então:

$$F_r = \frac{1}{2} \cdot \frac{4\pi 10^{-7} \cdot nI_s \cdot nI_s \cdot \pi \cdot D_m}{h} = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_s)^2 \cdot D_m}{h} \cdot 10 \quad (3.5)$$

O estresse médio de tração em um enrolamento externo pode ser calculado seguindo como referência a Figura 3.4 [2, 18]. A força média F_{rmed} nas duas metades opostas do enrolamento é equivalente a pressão no diâmetro, enquanto que a força radial total F_r é equivalente a pressão na circunferência πD_m .

Conseqüentemente $F_{rmed} = \frac{F_r}{\pi}$, então a força radial média será dada pela Equação 3.6 [18].

$$F_{rmed} = \frac{2\pi \cdot (nI_s)^2 \cdot D_m}{h} 10^{-7} [N] \quad (3.6)$$

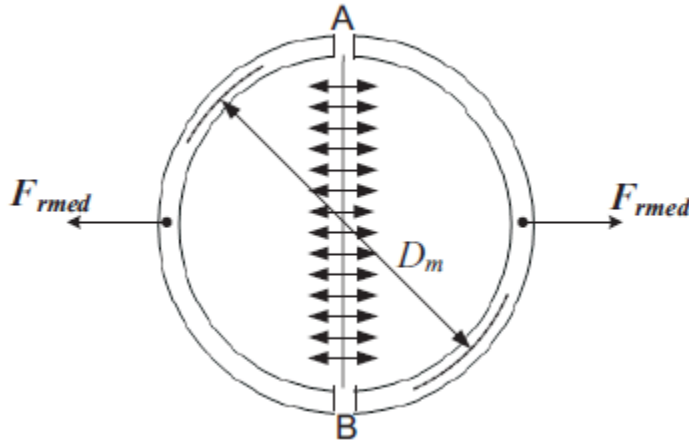


Figura 3.4 - Método de cálculo do estresse médio de tração.

Além disso, a força radial distribuída ao longo de cada espira pode ser obtida pela Expressão 3.7:

$$F_{rad-dist} = \frac{2\pi \cdot n \cdot I_s^2}{h} 10^{-7} [N / m] \quad (3.7)$$

Desta forma, o estresse médio de tração no enrolamento externo será dado pela Equação 3.8 [1]:

$$\sigma_{r-medio} = \frac{F_{rad-dist} \cdot D_m}{2 \cdot a_c} [N / m^2] \quad (3.8)$$

Sendo:

a_c : seção transversal do condutor [m^2];

Além das considerações já realizadas, deve ser lembrado que se o enrolamento externo ou interno consiste de várias camadas e não exista nenhuma transferência de estresse entre eles, então o estresse na camada adjacente ao canal principal entre enrolamentos do transformador é quase duas vezes ao valor médio calculado considerando todo o enrolamento, e o estresse nas camadas sucessivas decrescem linearmente em direção a zero. Por exemplo, se existem k camadas, o estresse na camada próxima ao ducto é $(2k - 1)/k$ vezes o valor dado pela Equação (3.8). A segunda camada tem um estresse $(2k - 3)/k$ vezes o valor médio, a terceira $(2k - 5)/k$ vezes, e assim sucessivamente. Valores mais precisos podem ser obtidos, considerando cada camada individualmente com seu próprio diâmetro e em sua correta posição no campo axial. No entanto, pouco se ganha com este procedimento [18].

3.2.2 Forças e estresses no enrolamento interno

As forças e estresse médio que atuam no enrolamento interno podem ser calculados pelas mesmas expressões desenvolvidas para o enrolamento externo (Equações 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8), usando, no entanto, o correto diâmetro médio.

Entretanto, o cálculo dos estresses para o enrolamento interno exige considerações de projeto mais detalhadas.

Conforme descrito no capítulo anterior, o enrolamento interno do transformador pode estar sujeito a dois tipos de deformações: “*free buckling*” e “*forced buckling*”.

O nível crítico do “*buckling*” é função da seção transversal do condutor, bem como do tipo do material utilizado. O valor crítico pode ser aumentado fazendo uso de um maior estresse de prova do material do condutor. Os fabricantes geralmente fornecem valores críticos para vários tipos de materiais e arranjos do condutor. Um exemplo típico do estresse de prova do cobre para vários níveis de dureza é mostrado na Figura 3.5 [1]. Os valores indicados são para 0,2% de estresse de prova (0.2% de alongamento do material do condutor no ensaio de tração x deformação correspondente), mas é comum na prática utilizar somente 80% desse valor. Alguns fabricantes utilizam 85% de 0,1% de estresse de prova [1].

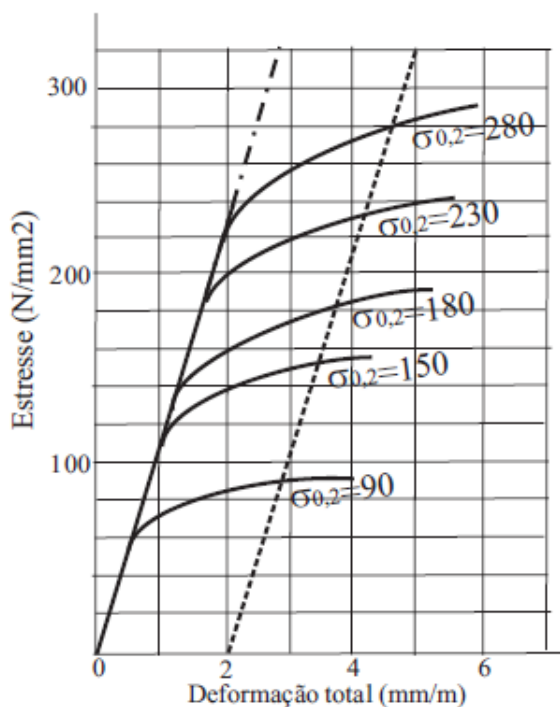


Figura 3.5 - Estresse de prova do cobre para vários níveis de dureza.

Existem dois valores críticos de estresse radial levando em consideração o efeito “*buckling*”, os quais dependem da utilização ou não de suportes axiais [1]. Para os casos de enrolamentos desprovidos de estruturas de sustentação axial (*free buckling*), o valor do estresse crítico pode ser calculado pela Equação 3.9 [1].

$$\sigma_{crit-free-buckling} = \frac{E \cdot e^2}{D_m^2} [N / m^2] \quad (3.9)$$

Sendo:

E : módulo de elasticidade do material [N/m²];

e : dimensão radial do condutor [m];

Por outro lado, para os casos de enrolamentos providos de estruturas de sustentação axial (*forced buckling*), o valor do estresse crítico pode ser calculado pela Equação 3.10 [1].

$$\sigma_{crit-forced-buckling} = \frac{E(\delta) \cdot (x \cdot e^2) \cdot Esp_{axial}^2}{12 \cdot D_m^2} [N / m^2] \quad (3.10)$$

Sendo:

$E(\delta)$: Módulo de elasticidade incremental ao valor crítico [N/m²];

x : Constante do fabricante para espessura equivalente do condutor;

Esp_{axial} : Quantidade de suportes axiais.

Quando se faz uso de suportes, o estresse neste caso é função da distância entre esses suportes e das dimensões do condutor, cujo valor é dado pela Equação 3.11 [1].

$$\sigma_{medio-buckling} = \frac{F_{rad-dist} \cdot L_{ax}^2}{2 \cdot b \cdot e^2} [N / m^2] \quad (3.11)$$

Sendo:

L_{ax} : Distância entre os suportes axiais [m];

b : Dimensão axial do condutor [m];

3.3 METODOLOGIA ANALÍTICA PARA CÁLCULO DAS FORÇAS AXIAIS EM ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS

As componentes axiais das forças de um transformador com enrolamentos convencionais concêntricos não podem ser calculadas com exatidão por métodos elementares, principalmente porque a curvatura do fluxo de campo magnético não pode ser referenciada sem a utilização de soluções bastante complexas, as quais requerem uso de uma modelagem computacional. Entretanto, antes que os computadores fossem disponíveis um grande processo de criatividade foi expandido no planejamento de métodos aproximados para cálculo das forças axiais. E uma dessas metodologias é o método do ampère-espira residual, o qual é utilizado principalmente nas condições em que há uma contribuição para o aumento das forças axiais nos enrolamentos, as quais são diversas, podendo citar, por exemplo, o uso de derivação (tapes) e o desalinhamento axial dos enrolamentos, os quais serão tratados em detalhes na sequência deste capítulo [18].

3.3.1 Método ampère-espira residual

Este método 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-espira balanceado, um produzindo um campo axial e o outro um campo radial. Os ampère-espiras

radiais originam os fluxos radiais e, por conseguinte, as forças axiais entre os enrolamentos [18, 30, 31].

Os ampère-espiras radial agindo em determinado ponto do enrolamento são calculados assumindo a soma algébrica do ampère-espiras do primário e secundário entre este ponto e as extremidades dos enrolamentos. Uma curva plotada para todos os pontos do enrolamento resulta em um diagrama ampère-espira residual ou desequilibrado, de onde surge o nome do método. É claro que para enrolamentos sem derivação de igual comprimento e sem desalinhamento axial, não existirá nenhum ampère-espira residual e conseqüentemente nenhuma força axial adicional, embora existirão forças compressivas internas em ambos os enrolamentos, conforme será mostrado no tópico 3.3.2, caso *a*.

O método para determinação da distribuição de ampère-espiras radial é ilustrado na Figura 3.6 [31].

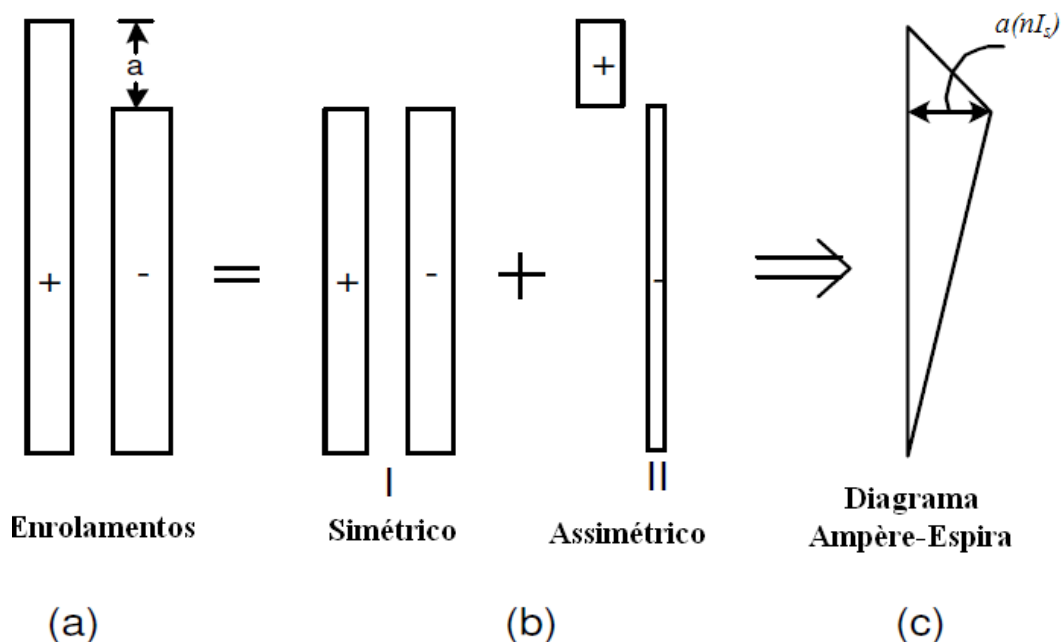


Figura 3.6 - Determinação do diagrama de ampère-espiras residual para enrolamento com derivação em uma extremidade.

A Figura 3.6(a) mostra um enrolamento concêntrico com uma derivação em uma das extremidades do enrolamento externo, onde *a* é a relação entre o

comprimento da derivação e a altura do enrolamento. Os dois arranjos da Figura 3.6(b) representam grupos de ampère-espiras equilibrados que, quando superpostos, reproduzem a configuração original do enrolamento. O diagrama dos ampère-espiras radiais, plotado em função da altura do enrolamento, resulta em um triângulo, conforme ilustra a Figura 3.6(c). O valor máximo alcançado é de $a(nI_s)$, onde (nI_s) representa o ampère-espira do enrolamento interno ou externo.

Para determinar as forças axiais, é necessário encontrar o fluxo radial produzido pelo ampère-espira radial, ou em outras palavras conhecer o comprimento efetivo do caminho para o fluxo radial para todos os pontos ao longo do enrolamento. A princípio foi suposto este comprimento ser constante e que não variasse com a posição axial no enrolamento. Esta idéia foi considerada uma aproximação rústica e feita principalmente para obter um resultado simples. Entretanto, testes mostram que esta aproximação é considerada precisa e que o fluxo segue de fato uma curva de distribuição triangular da mesma forma que a curva ampère-espira residual. A Figura 3.7 [18] mostra a distribuição do fluxo radial para a derivação apresentada na Figura 3.6.

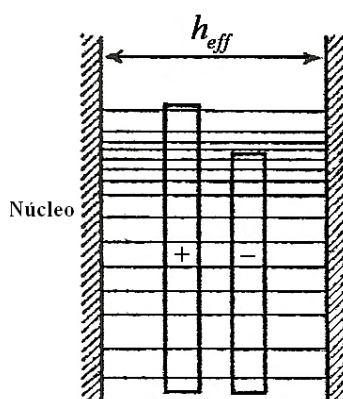


Figura 3.7 - Distribuição de densidade de fluxo de dispersão radial h_{eff} , utilizando o método ampère-espira residual.

Assim, denominando o comprimento efetivo do caminho do fluxo radial por h_{eff} , e que o valor médio do ampère-espiras seja igual a $(1/2)a(nI_s)$, então a

densidade do fluxo radial médio no diâmetro médio do transformador denominada por B_r será fornecida pela Expressão 3.12 [18].

$$B_r = \frac{4\pi}{10^4} \cdot \frac{a \cdot (nI_s)^2}{2h_{eff}} [T] \quad (3.12)$$

Assim, a força axial no enrolamento de (nI_s) ampère-espiras pode ser determinada através da Equação 3.13 [18].

$$F_{ax-deriv} = \frac{2\pi \cdot a \cdot (nI_s)^2}{10^7} \cdot \frac{\pi D_m}{h_{eff}} [N] \quad (3.13)$$

O segundo fator desta expressão, $\frac{\pi D_m}{h_{eff}}$, é a permeância por unidade de comprimento da coluna de um transformador para fluxo radial, referido ao seu diâmetro médio. Ela é independente do tamanho físico do transformador e depende somente da configuração do núcleo e enrolamentos. A variação da força com a potência aparente do transformador é determinado pelo primeiro fator da expressão, o qual mostra que a força é proporcional ao quadrado do ampère-espiras de um enrolamento.

Como o ampère-espira pode ser calculado e o diagrama ampère-espira residual facilmente obtido, então para maioria dos arranjos de enrolamentos, o principal problema é determinar a permeância por unidade de comprimento da coluna a ser usado em cada caso [18].

Na escolha de uma fórmula para uso prático, é conveniente selecionar um parâmetro, o qual independe do tamanho do núcleo, mas depende somente de sua configuração. A permeância por unidade de comprimento, $\frac{\pi D_m}{h_{eff}}$, é apropriada para esta proposta. Desta forma, a Equação 3.13 pode ser reescrita dando origem a Equação 3.14 [18].

$$F_{ax-deriv} = \frac{2\pi \cdot a \cdot (nI_s)^2}{10^7} \times \Lambda \text{ [N]} \quad (3.14)$$

$$\text{Onde } \Lambda = \frac{\pi D_m}{h_{eff}}.$$

A Equação 3.14 é aplicada para um simples arranjo de derivação. Para os demais arranjos, o método do ampère-espira residual pode também ser aplicado. Dessa forma, a força magnetomotriz deve ser determinada, o diagrama ampère-espira residual construído ou calculado. Assim, com a obtenção do valor de Λ , a força axial na parte de cada enrolamento sob cada volta do diagrama ampère-espira residual pode ser estimada.

O valor de Λ a ser usado em cada caso tem sido estudado empiricamente [18, 30], onde foram usados dois transformadores projetados especialmente a permitir medições do fluxo radial.

Fatores de projeto, tais como largura do ducto, espaço entre enrolamento e núcleo, proximidade do tanque, espessura radial dos enrolamentos, todos têm um efeito em Λ .

Deve-se salientar que a força calculada neste caso não é uniformemente distribuída ao redor da circunferência. Há uma maior concentração na região próxima às colunas vizinhas, particularmente devido ao ampère-espiras nestas colunas. Por exemplo, é estimado que em um transformador monofásico envolvido em duas colunas a força axial por unidade de comprimento do condutor é 50 % maior que a média na região que compreende a janela do transformador. Por outro lado, em um transformador trifásico esta elevação local da força acima da média é de 25%. Para propostas de projetos, conseqüentemente, somente a coluna do meio precisa ser considerada em transformadores trifásicos [18].

3.3.2 Forças axiais para diversos arranjos de derivação

Neste item apresenta-se a estimativa das forças axiais na condição de arranjos considerada ideal, ou seja: não se utiliza nenhum tipo de derivação e não há desalinhamento axial entre os enrolamentos. Complementarmente, são estudados os arranjos onde exista a presença de tapes, e a situação em que há um desalinhamento axial entre os enrolamentos.

a) Enrolamentos Concêntricos de Tamanho Igual sem Derivações e sem Desalinhamento Axial – caso ideal

Em transformadores que têm distribuição uniforme de forças magnetomotrizes, ou seja, enrolamentos concêntricos de igual comprimento, que não apresentam nenhum tipo de derivação ou desalinhamento de eixo entre o enrolamento interno e externo, as forças axiais que ocorrem devido aos campos radiais nas duas extremidades dos enrolamentos estão dirigidas para o ponto médio dos enrolamentos.

As curvas de compressão total para este caso, que pode ser considerado ideal, podem ser visualizadas através da Figura 3.8 [32]. Neste exemplo foram analisadas as forças compressivas no enrolamento interno e externo de um determinado transformador. A curva pontilhada representa a soma das compressões, e tem um valor constante ao longo da maior parte do enrolamento. Este indicador é estimado pela Equação 3.15 [18].

$$F_{cTotal} = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_s)^2 D_{mt} \cdot 10^{-7}}{h^2} \left[d_0 + \frac{d_i + d_e}{3} \right] [N] \quad (3.15)$$

Sendo:

D_{mt} : Diâmetro médio do transformador, ou seja, considerando ambos os enrolamentos [m];

(nI_s) : Representa o ampère-espira em um dos enrolamentos;

d_0 : ducto do transformador [m];

d_i e d_e : Espessura radial do enrolamento interno e externo, respectivamente [m].

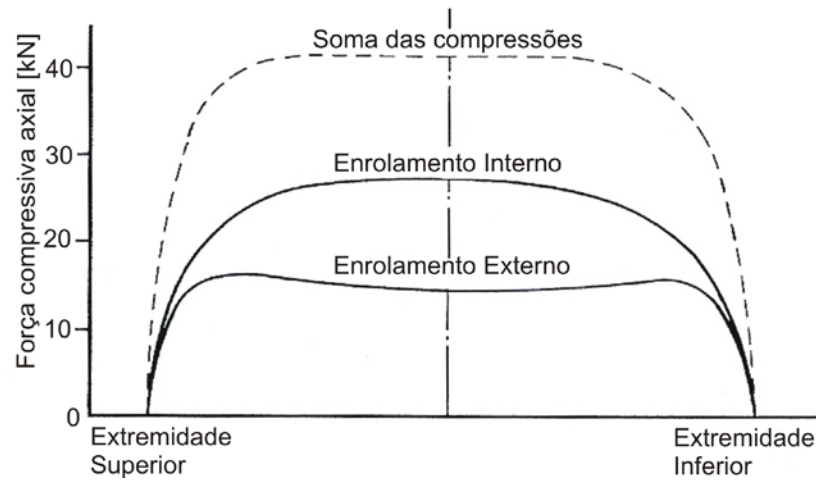


Figura 3.8 - Curvas de uma compressão axial para enrolamentos concêntricos sem tape.

Considerando a força no pico da primeira metade do ciclo de curto-circuito, e assumindo um fator de impulso de f_i , tem-se um valor máximo fornecido pela Expressão 3.16 [18, 32].

$$F_{cTotal} = \frac{2,83 \cdot f_i \cdot S_\phi \times 10^5}{Z_{\%} \cdot f \cdot h} \text{ [N]} \quad (3.16)$$

Onde:

S_ϕ : Potência aparente por fase em MVA;

f : Frequência em ciclos por segundo.

Para transformadores maiores, 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 (F_{c-i}) e os 1/3 a 1/4 restantes estão distribuídos no enrolamento externo (F_{c-e}) [18, 30].

b) Enrolamentos Concêntricos de Tamanho Igual sem Derivações, mas com Deslocamento Axial

O arranjo do enrolamento fornecendo as menores forças axiais possíveis é aquele de dois enrolamentos uniformes de mesmo tamanho, conforme descrito anteriormente.

Na prática, entretanto, é impossível arranjar os enrolamentos totalmente alinhados entre si. Desta forma, deslocamentos axiais mesmo que pequenos originam grandes esforços axiais. Assim, tais forças não podem ser desconsideradas e são fundamentais durante a fase de projeto do equipamento.

O desalinhamento axial causa uma força axial entre enrolamentos tendendo aumentar o deslocamento, conforme pode ser visto pela Figura 3.9 [32]. Esta força pode ser calculada pela Equação 3.17 [18].

$$F_{ax-deslocamento} = \frac{4\pi \cdot a_f \cdot \left(1 - \frac{1}{2}a_f\right) \cdot (nI_s)^2 \cdot \Lambda}{10^7} [N] \quad (3.17)$$

Onde a_f é o deslocamento axial final expresso como uma fração do comprimento do enrolamento. Além disso, a permeância tem o mesmo valor para derivações no final do enrolamento.

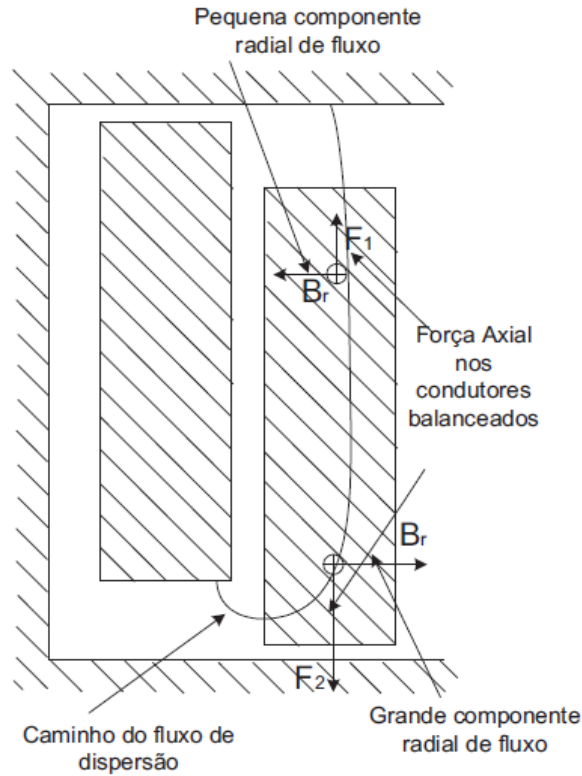


Figura 3.9 - Forças axiais nos enrolamentos com desalinhamento axial: $F_1 < F_2$.

A força devido ao deslocamento axial é quase uniforme ao longo dos enrolamentos, tal que em cada enrolamento a compressão aumenta quase linearmente de zero em uma das extremidades até um valor final dado pela Equação 3.17, a qual é exercida à outra extremidade.

Seja F_{int} [N] a força capaz de produzir um deslocamento unitário (devido à elasticidade da isolação de ambos os enrolamentos), a_0 um pequeno deslocamento inicial, e a_f o deslocamento final, então se tem as seguintes relações:

Força Elástica:

$$F_{\text{ax-deslocamento}} = (a_f - a_0) \cdot F_{\text{int}}$$

Força Eletromagnética desconsiderando $\frac{1}{2}a$:

$$F_{ax-deslocamento} = \frac{4\pi \cdot a_f \cdot (nI_s)^2 \cdot \Lambda}{10^7}$$

Usando a premissa de que as equações acima devam ser iguais, obtém-se o deslocamento final, o qual é fornecido pela Equação 3.18 [18].

$$a_f = a_0 \times \frac{F_{int}}{F_{int} - \frac{4\pi(nI_s)^2 \Lambda}{10^7}} \quad (3.18)$$

Assim, a força axial final pode ser expressa pela Equação 3.19 [18].

$$F_{ax-deslocamento} = \frac{4\pi a_0 (nI_s)^2 \Lambda}{10^7} \times \frac{F_{int}}{F_{int} - \frac{4\pi(nI_s)^2 \Lambda}{10^7}} \quad (3.19)$$

A força e o deslocamento aumentam indefinidamente quando F_{int} é igual a $\frac{4\pi(nI_s)^2 \Lambda}{10^7}$. Nesta situação pode-se definir um valor crítico para os ampère-espiras, fornecido pela Expressão 3.20 [18].

$$(nI_s)_{crit} = 9 \times 10^2 \sqrt{\frac{F_{int}}{\Lambda}} \quad (3.20)$$

Para qualquer valor de ampère-espira maior que $(nI_s)_{crit}$, não importando quão pequeno seja o deslocamento inicial, o aumento desta força pode causar uma falha. Se não existisse nenhum deslocamento inicial e a corrente fosse aumentada em direção ao valor crítico, nenhum deslocamento ocorreria até que o valor crítico fosse alcançado. Nesta situação, no instante de um deslocamento, aconteceria inevitavelmente uma falha mecânica.

Observa-se, portanto, que o valor crítico do ampère-espira é diretamente proporcional ao valor de F_{int} . Desta forma, fazendo uso de uma boa isolamento, a força F_{int} capaz de provocar um deslocamento deverá ser elevada e conseqüentemente o valor crítico, $(nI_s)_{\text{crit}}$, também será alto. Neste sentido, através de um projeto adequado, pode-se projetar o valor crítico, tal que ele seja maior que a corrente normal de curto-circuito, de forma que falhas por deslocamento axial possam ser evitadas.

O parâmetro F_{int} é a força responsável pelo movimento dos centros de gravidade do enrolamento interno e externo por unidade de comprimento. O movimento de cada enrolamento deve ser analisado em separado. A isolamento na extremidade dos enrolamentos fica submetida por uma compressão e sua rigidez é calculada considerando seu comprimento, área e módulo de elasticidade.

O valor de F_{int} para um enrolamento é dado pela Equação 3.21 [18].

$$F_{\text{int}} = \frac{h}{\frac{1}{3} \left(\frac{h_1}{E_1 A_1} + \frac{h_2}{E_2 A_2} \right) + \frac{h_3}{E_3 A_3}} [N] \quad (3.21)$$

Onde:

h_1 : dimensão axial total dos espaçadores [m];

A_1 : Área total dos espaçadores [m²];

E_1 : Módulo da elasticidade dos espaçadores [N/m²];

O índice 2 refere às mesmas especificações para a isolamento do condutor e o índice 3 refere à isolamento utilizada na extremidade do enrolamento.

Sendo F_{int1} [N] e F_{int0} [N] as forças calculadas para os dois enrolamentos, então o valor para o transformador será dado pela Expressão 3.22 [18].

$$\frac{1}{F_{int}} = \frac{1}{F_{int1}} + \frac{1}{F_{int0}} \quad (3.22)$$

Embora uma falha mecânica dos enrolamentos pelo mecanismo descrito possa ser evitada por um projeto satisfatório, as forças devido aos deslocamentos iniciais não podem ser evitadas, já que não é possível realizar um perfeito alinhamento dos enrolamentos.

c) Enrolamentos Concêntricos com Derivação na Extremidade do Enrolamento

A Tabela 3.1 [18, 31, 32] apresenta o diagrama ampère-espira residual e os valores de permeância a serem utilizados para dois tipos de relações (altura da janela/diâmetro do núcleo) para este tipo de derivação.

O impulso axial adicional é calculado pela Equação 3.14, já definida anteriormente.

Tabela 3.1 - Diagrama ampère-espira residual e valores de permeância a ser usado para enrolamentos concêntricos com derivação na extremidade do enrolamento.

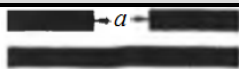
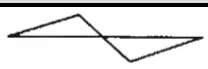
Arranjo	Diagrama ampère-espira residual	Λ para $\left(\frac{\text{Altura Janela}}{\text{Diâmetro Núcleo}} = 4,2 \right)$	Λ para $\left(\frac{\text{Altura Janela}}{\text{Diâmetro Núcleo}} = 2,3 \right)$
		5,5	6,4

Deve-se salientar que este arranjo normalmente não é usado na prática por causar grandes esforços, os quais podem ocasionar falhas mecânicas mais facilmente.

d) Transformador com Derivação no Meio do Enrolamento Externo

Este é um importante arranjo freqüentemente utilizado em pequenos e médios transformadores. A Tabela 3.2 [18, 31, 32] apresenta o diagrama ampère-espira residual e os valores de permeância a serem utilizados para dois tipos de relações (altura da janela/diâmetro do núcleo) para este tipo de derivação.

Tabela 3.2 - Diagrama ampère-espira residual e valores de permeância a ser usado para enrolamentos concêntricos com derivação no meio do enrolamento externo.

Arranjo	Diagrama ampère-espira residual	Λ para $\left(\frac{\text{Altura Janela}}{\text{Diâmetro Núcleo}} = 4,2 \right)$	Λ para $\left(\frac{\text{Altura Janela}}{\text{Diâmetro Núcleo}} = 2,3 \right)$
		5,8	6,6

Para calcular o fluxo radial, os enrolamentos são separados em componentes balanceadas como mostradas na Figura 3.10 [18]. Nesta ilustração, o enrolamento do Grupo II produz um diagrama de campo radial como mostrado em 3.10(c) e na Tabela 3.2. As duas metades do enrolamento externo estão sujeitas às forças em sentidos opostos em direção às culatras. Além disso, existe uma compressão axial de magnitude semelhante no meio do enrolamento interno. O máximo valor do ampère-espira agindo radialmente é somente metade, caso elas estivessem com derivações no final do enrolamento.

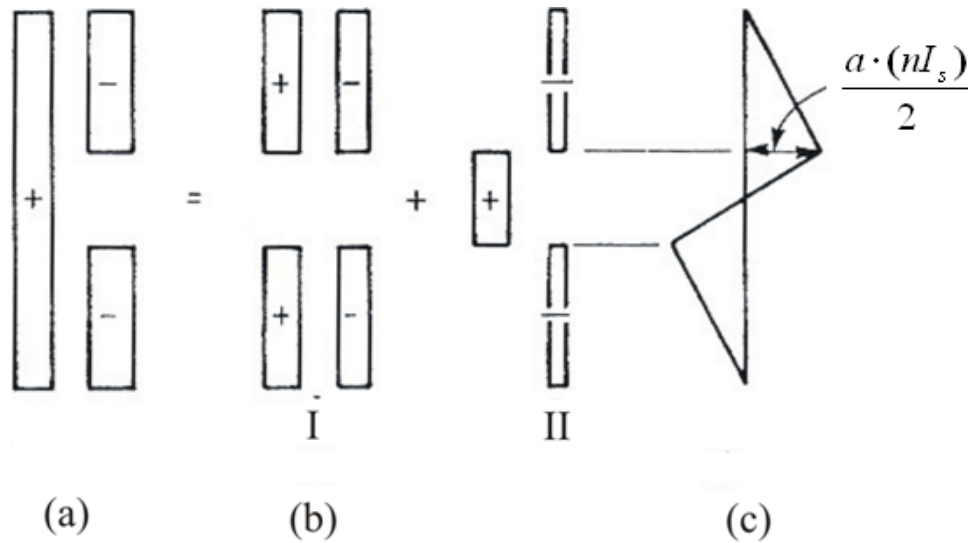


Figura 3.10 - Determinação do diagrama ampère-espira residual para enrolamento derivado no meio.

Desta forma, a força axial é somente um quarto do valor estimado pela Equação 3.14 e é dada pela Equação 3.23 [18, 31, 32].

$$F_{ax-deriv} = \frac{\pi \cdot a \cdot (nI_s)^2 \cdot \Lambda}{2 \times 10^7} [N] \quad (3.23)$$

A fim de ilustrar este tipo de derivação, a Figura 3.11 apresenta as curvas para uma seção derivada no meio do enrolamento externo para o mesmo transformador, onde foram extraídas as curvas de compressão, representadas pela Figura 3.8 (caso ideal).

Observa-se pela Figura 3.11 [32] que a compressão máxima no enrolamento externo ocorre nas espiras das extremidades, ou seja, em direção às culatras, e em relação ao enrolamento interno, a compressão máxima ocorre em seu ponto médio.

Se F_{cTotal} é a soma de ambas as compressões como dado pela Equação 3.16 e assume-se que dois terços estão no enrolamento interno, então a máxima compressão neste enrolamento é fornecida pela Expressão 3.24 [32].

$$F_{ax-max-i} = \frac{2}{3} \times \frac{2,83 \cdot f_i \cdot S_\phi}{Z_{pu} \cdot f \cdot h} \cdot 10^5 + \frac{\pi \cdot a \cdot (nI_s)^2 \Lambda}{2 \times 10^7} [N] \quad (3.24)$$

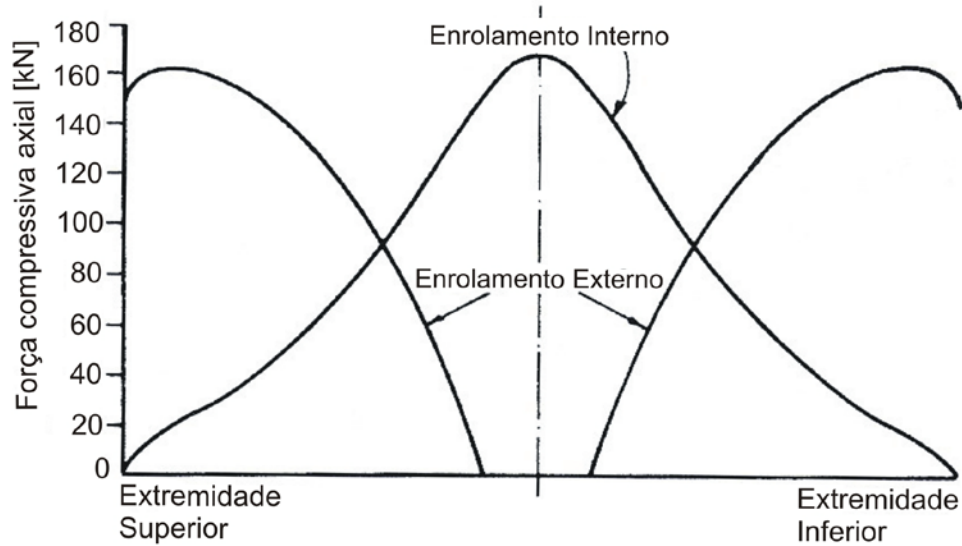


Figura 3.11 - Curvas de compressão axial para uma derivação no meio do enrolamento externo.

O cálculo para a máxima compressão no enrolamento externo é semelhante à expressão anterior. No entanto, a componente de força causada pela derivação deve ser somada com 1/3 da força compressiva total, resultando na Equação 3.25 [32].

$$F_{ax-max-e} = \frac{1}{3} \times \frac{2,83 \cdot f_i \cdot S_\phi}{Z_{pu} \cdot f \cdot h} \cdot 10^5 + \frac{\pi \cdot a \cdot (nI_s)^2 \Lambda}{2 \times 10^7} [N] \quad (3.25)$$

A Figura 3.12 [32] apresenta as curvas representando as máximas compressões nos enrolamentos interno e externo, e as forças em direção às culatras, em função da percentagem de derivação realizada no meio do enrolamento externo.

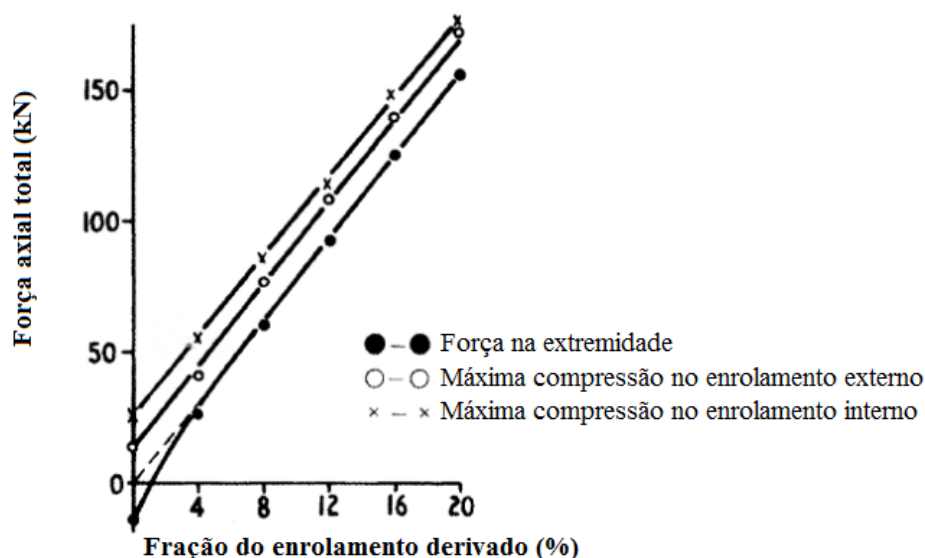


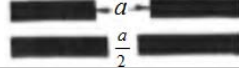
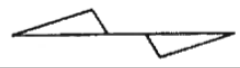
Figura 3.12 - *Curvas do impulso em direção às culatras e das máximas compressões, em função de derivações no meio do enrolamento externo.*

Observa-se ainda pelos valores das forças, que embora esta nova componente de força axial devido à presença de derivação no meio do enrolamento externo foi reduzida em $\frac{1}{4}$ do caso anterior, obteve-se um acréscimo fundamental em relação ao caso ideal, onde não há nenhum tipo de derivação e nem desalinhamento axial. Ilustra-se a seguir que alguns outros arranjos podem colaborar substancialmente na redução das compressões axiais.

e) Derivações no Meio do Enrolamento Externo com presença de “gap” localizado no enrolamento interno oposto à derivação

A Tabela 3.3 [18, 31, 32] apresenta o diagrama ampère-espira residual e os valores de permeância a serem utilizados para dois tipos de relações (altura da janela/diâmetro do núcleo) para este tipo de derivação.

Tabela 3.3 - Diagrama ampère-espira residual e valores de permeância a ser usado para enrolamentos concêntricos com derivação no meio do enrolamento externo com presença de “gap” no enrolamento interno.

Arranjo	Diagrama ampère-espira residual	Λ para $\left(\frac{\text{Altura Janela}}{\text{Diâmetro Núcleo}} = 4,2 \right)$	Λ para $\left(\frac{\text{Altura Janela}}{\text{Diâmetro Núcleo}} = 2,3 \right)$
		5,8	6,6

Diante deste arranjo, existe uma força axial no enrolamento interno quando todos os tapes estejam presentes no circuito e um impulso de mesma magnitude no enrolamento externo quando todos os tapes estejam fora do circuito. Esta força pode ser calculada pela Equação 3.26 [18, 31, 32].

$$F_{ax-deriv} = \frac{\pi \cdot a \cdot (nI_s)^2 \cdot \Lambda}{4 \times 10^7} \quad [N] \quad (3.26)$$

Por outro lado, quando todos os tapes estão fora do circuito, o impulso no enrolamento interno é dado pela Equação 3.27 [18, 31, 32].

$$F_{ax-deriv} = \frac{\pi \cdot a (nI_s)^2 \cdot \Lambda}{4 \left(1 - \frac{1}{2} a \right) \times 10^7} \quad [N] \quad (3.27)$$

Nestas equações a significa a fração de derivação no enrolamento externo, a qual é compensada por um comprimento $\frac{1}{2}a$ referente ao “gap” inserido no enrolamento interno.

f) Dois Pontos de Derivação Eqüidistantes entre o Meio e Final do Enrolamento Externo

A Tabela 3.4 [18, 31, 32] apresenta o diagrama ampère-espira residual e os valores de permeância a serem utilizados para dois tipos de relações (altura da janela/diâmetro do núcleo) para este tipo de derivação.

Tabela 3.4 - Diagrama ampère-espira residual e valores de permeância a ser usado para enrolamentos concêntricos com dois pontos de derivação eqüidistantes entre o meio e o final do enrolamento externo.

Arranjo	Diagrama ampère-espira residual	Λ para $\left(\frac{\text{Altura Janela}}{\text{Diâmetro Núcleo}} = 4,2 \right)$	Λ para $\left(\frac{\text{Altura Janela}}{\text{Diâmetro Núcleo}} = 2,3 \right)$
		6,0	6,8

Observe através da Figura 3.13 [32] (linhas não tracejadas) que as compressões axiais sofreram uma redução em relação aos valores apresentados pelo gráfico da Figura 3.11.

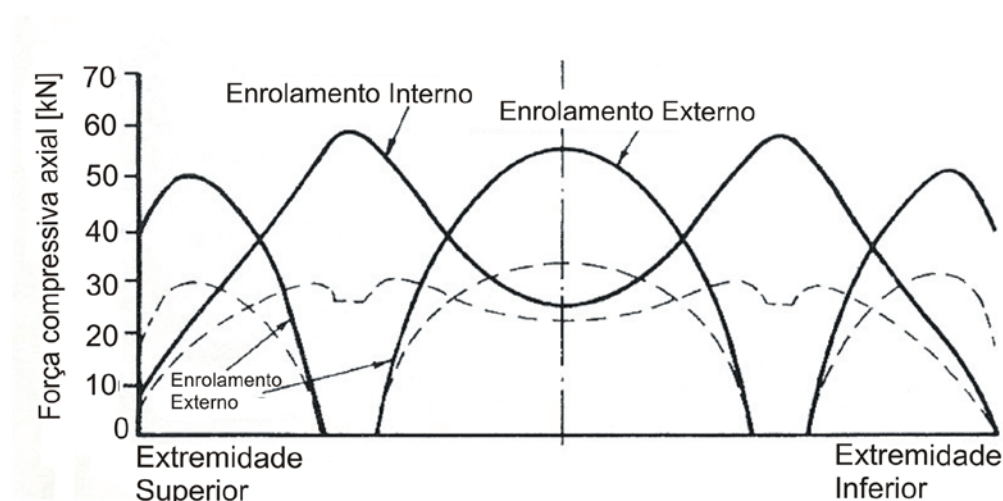


Figura 3.13 - Curvas de compressão axial para derivações em dois pontos no enrolamento externo.

A componente da força axial adicional pode ser calculada pela Expressão 3.28 [18, 31, 32].

$$F_{ax-deriv} = \frac{\pi \cdot a \cdot (nI_s)^2 \cdot \Lambda}{8 \times 10^7} [N] \quad (3.28)$$

Esta força é aproximadamente $\frac{1}{16}$ daquela apresentada pela Expressão 3.14, onde a derivação é no final do enrolamento.

g) Dois Pontos de Derivação Equidistantes entre o Meio e Final do Enrolamento Externo com presença de “gaps” localizados no enrolamento interno opostos às derivações

A Tabela 3.5 [18, 31, 32] apresenta o diagrama ampère-espira residual e os valores de permeância a serem utilizados para dois tipos de relações (altura da janela/diâmetro do núcleo) para este tipo de derivação.

Tabela 3.5 - Diagrama ampère-espira residual e valores de permeância a ser usado para enrolamentos concêntricos com dois pontos de derivação equidistantes entre o meio e o final do enrolamento externo com presença de “gaps” no enrolamento interno.

Arranjo	Diagrama ampère-espira residual	Λ para $\left(\frac{\text{Altura Janela}}{\text{Diâmetro Núcleo}} = 4,2 \right)$	Λ para $\left(\frac{\text{Altura Janela}}{\text{Diâmetro Núcleo}} = 2,3 \right)$
		6,0	6,8

Este arranjo é o limite daquilo que possa ser feito a fim de reduzir a componente de força axial devido à presença de uma derivação. As curvas tracejadas na Figura 3.13 mostram o efeito da introdução de “gaps” no enrolamento interno com a metade do comprimento das seções com tapes.

Semelhante ao caso *e*, existe um impulso axial no enrolamento interno quando todos os tapes estejam presentes no circuito e um impulso de mesma magnitude no enrolamento externo quando todos os tapes estejam fora do circuito. Contudo esta nova força será ainda menor e pode ser calculada pela Equação 3.29 [18, 31, 32].

$$F_{ax-deriv} = \frac{\pi \cdot a \cdot (nI_s)^2 \cdot \Lambda}{16 \times 10^7} \quad [N] \quad (3.29)$$

Por outro lado, quando todos os tapes estão fora do circuito, o impulso no enrolamento interno é dado pela Equação 3.30 [18, 31, 32].

$$F_{ax-deriv} = \frac{\pi \cdot a \cdot (nI_s)^2 \cdot \Lambda}{16 \left(1 - \frac{1}{2}a\right) \times 10^7} \quad [N] \quad (3.30)$$

Nestas equações *a* significa a fração de derivação no enrolamento externo, a qual é compensada pelos dois “*gaps*” inseridos no enrolamento interno.

3.3.3 Forças axiais em espiras individuais

a) Enrolamento sem presença de derivação

Os estresses individuais mais altos ocorrem no final dos enrolamentos como mostrado pelas inclinações das curvas na Figura 3.8. Testes têm mostrado, que as forças no final dos enrolamentos externos e internos são aproximadamente as mesmas, como pode ser visto também na Figura 3.8. Neste sentido, a força axial total na extremidade de qualquer enrolamento é dada pela Equação 3.31 [18, 30]:

$$F_a = 0,366 \cdot q \cdot F \cdot \log \left(1 + \frac{4 \cdot d_1^2}{w^2} \right) [N] \quad (3.31)$$

Onde:

q : Ampère-espira no final do enrolamento;

w : Representa a dimensão axial do condutor, considerando sua isolação e a isolação entre espiras [m];

d_1 : Largura equivalente do ducto $d_0 + \frac{1}{3}(d_i + de)$ do transformador [m];

$$F = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_s)^2 \cdot D_{mt}}{10^7 \times h} [N] .$$

Caso o enrolamento interno fique mais perto do núcleo do que o normal, a força nas espiras da extremidade deste enrolamento tenderá a ser maior que aquela fornecida pela Expressão 3.31 e a força nas extremidades das espiras do enrolamento externo tenderá a ser menor.

b) Presença de Tape no Meio do Enrolamento Externo

A maior força eletromagnética é exercida imediatamente nas espiras vizinha à derivação. Assim, nestes enrolamentos ocorre a máxima tendência de curvatura (*bending*), caso espaçadores sejam utilizados. A força em uma espira no enrolamento externo imediatamente vizinha ao “gap” é dada teoricamente pela Expressão 3.32 [18, 30]:

$$F_a = 0.773 \cdot q \cdot F \cdot \log \left(\frac{2a'}{w} + 1 \right) [N] \quad (3.32)$$

Usando a mesma notação como para Equação 3.31, mas com a' [m] representando o comprimento da região derivada.

Quando as forças são reduzidas utilizando “gap” entre as espiras no enrolamento sem tape, a Equação 3.32 pode ser usada para calcular a força na espira vizinha ao “gap”. Neste caso a' deveria ser o comprimento do “gap”. Além disso, a utilização de “gap” fornece uma redução de aproximadamente 20% nos valores estimados por esta equação.

3.3.4 Casos especiais – Estimativa dos estresses axiais

Quanto aos estresses causados pelas forças axiais, têm-se aqueles relacionados com a tendência de curvatura (*bending*), quando são utilizados espaçadores, e podem ser calculados utilizando a Equação 3.33 [1].

$$\sigma_{ax-bending} = \frac{F_{ax-dist} \cdot L_{rad}^2}{2 \cdot e \cdot b^2} [N / m^2] \quad (3.33)$$

Sendo:

$$F_{ax-dist} = \frac{F_a}{\pi \cdot D_m} : \text{Força axial distribuída ao longo da espira [N/m].}$$

Lembrando que F_a é a força axial na extremidade do enrolamento ou adjacente à derivação, quando existente;

L_{rad} : Distância entre espaçadores radiais [m];

Além disso, conforme já abordado pode existir uma inclinação dos condutores devido à carga axial (*Tilting*), a qual ocorre em transformadores do tipo disco. Esse tipo de falha 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 [1, 18, 33]. Esta carga crítica

pode ser determinada pela Equação 3.34 [18, 33] e Equação 3.35/Equação 3.36 [1, 18, 33].

Ressalta-se que para o uso das Equações 3.34 e 3.35, a força e estresse crítico são devidos apenas ao condutor, ao contrário da Equação 3.36, onde se considera o efeito da isolação.

$$F_{ax-crit} = \frac{k_m \cdot \pi \cdot E \cdot a_c \cdot b}{3 \cdot D_m} [N] \quad (3.34)$$

Sendo:

k_m : Quantidade média de condutores em cada disco do enrolamento;

$$\sigma_{ax-crit} = \frac{E \cdot b^2}{3 \cdot D_m^2} [N / m^2] \quad (3.35)$$

$$\sigma_{ax-crit} = \frac{E \cdot b^2}{14 \cdot R^2} + \frac{m \cdot s \cdot c \cdot e^2}{12 \cdot \pi \cdot R \cdot b^2} [N / m^2] \quad (3.36)$$

Sendo:

R : Raio do enrolamento [m];

m : Quantidade de espaçadores radiais;

s : Largura dos espaçadores radiais [m];

c : Módulo equivalente de elasticidade do papel isolante [N/m²].

3.4 EXEMPLOS DE CÁLCULOS DOS ESFORÇOS ELETROMECAÑICOS EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS SUBMETIDOS À CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

Este item tem por objetivo apresentar através de dois exemplos, a metodologia analítica para o cálculo de estresses e forças eletromecânicas em transformadores submetidos a um curto-circuito trifásico.

As equações que foram utilizadas são devidamente referenciadas a fim de uma melhor compreensão dos resultados analíticos obtidos.

3.4.1 Exemplo para um Transformador Trifásico de 5 MVA

Na Tabela 3.6 apresenta-se as características elétrica, magnética e geométrica do transformador trifásico de 5 MVA – 11/22 kV. Outras informações adicionais podem ser encontrados em [18]. Além disso, o valor assimétrico da corrente de curto-circuito foi estimado, considerando-se um fator de impulso igual a 1,8.

Tabela 3.6 - Características elétrica, magnética e geométrica do transformador de 5MVA.

Potência do transformador	5 MVA	
Número de fases	3	
Tensão	Enrolamento externo	22 kV
	Enrolamento interno	11 kV
Tipo de ligação (enrolamentos com terminais acessíveis)	Enrolamento externo	Delta
	Enrolamento interno	Estrela
Dimensões do fio de cobre	Enrolamento externo	2,54 x 11,43 mm
	Enrolamento interno	9,652 x 8,9 mm
Número de espiras	Enrolamento externo	Máximo de 840 em 32 discos duplos
	Enrolamento interno	231 em duas camadas
Diâmetro	Enrolamento externo	0,59 m
	Enrolamento interno	0,466 m
Núcleo	Área aparente	$1080 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
	Área líquida	$986 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
	Diâmetro	0,4 m
	Altura Janela	1,42 m
Densidade de fluxo magnético	1,26 Tesla	
Impedância percentual	6,7 %	
Tapes	+- 5% (Em 4 discos duplos no meio do enrolamento)	
Frequência de operação	60 Hz	
Valor assimétrico da corrente de curto-circuito	Enrolamento Interno	9970,7
	Enrolamento Externo	2878,4

Diante dos dados apresentados, foram realizados os cálculos para as forças e estresses radiais e axiais.

a) Cálculo das forças e estresses radiais

Tomando-se como base a metodologia mencionada anteriormente, as Tabelas 3.7 e 3.8 apresentam os resultados referentes à força e estresse radial.

Tabela 3.7 - Resultados obtidos para força radial – Transformador 5 MVA.

Enrolamento	Força Radial Total (F_r) [N] <i>Equação 3.5</i>	Força Radial Média (F_{rmed}) [N] <i>Equação 3.6</i>	Força Radial Distribuída ($F_{rad-dist}$) [N / mm] <i>Equação 3.7</i>
Interno	4060×10^3	1290×10^3	12,0
Externo	5150×10^3	1640×10^3	3,5

Tabela 3.8 - Estresses causados pela força radial – Transformador 5 MVA.

Estresse Radial Calculado	Valor [N / mm ²]
Estresse radial no enrolamento interno ($\sigma_{r-medio}$) - <i>Equação 3.8</i>	32,6
Estresse radial no enrolamento externo ($\sigma_{r-medio}$) - <i>Equação 3.8</i>	35,3

Diante dos resultados obtidos pelos esforços radiais, pode-se observar o quanto são elevadas as forças e estresses eletromecânicos. Além disso, estes últimos deveriam ser comparados com os estresses suportados pelo condutor. Desta forma, os valores devem ser inferiores ao limite de ruptura admissível.

b) Cálculo das forças e estresses axiais

A Tabela 3.9 apresenta os resultados referentes à força axial, considerando o enrolamento completo, o qual possui 800 espiras. Nota-se que os parâmetros F_{c-i} e F_{c-e} representam respectivamente 2/3 e 1/3 da força compressiva total (Equação 3.13).

Tabela 3.9 - Força axial para o enrolamento completo – Transformador 5 MVA.

Força Axial Calculada	Valor [N]
Força Compressiva Total (F_{cTotal}) - Equação 3.16	$175,9 \times 10^3$
Força Compressiva Enrolamento Interno (F_{c-i})	$117,3 \times 10^3$
Força Compressiva Enrolamento Externo (F_{c-e})	$58,6 \times 10^3$

Deve-se salientar que neste transformador há presença de tapes, os quais estão localizados na parte central do enrolamento externo. Assim, na Tabela 3.10 mostra-se o tipo de derivação, o diagrama ampère-espira residual e o valor da variável Λ utilizada (obtida por interpolação dos valores apresentados na Tabela 3.2).

Tabela 3.10: Diagrama ampère-espira residual para arranjo de derivação do enrolamento externo – Transformador 5 MVA.

Derivação	Diagrama Ampère-Espira Residual	Altura $\Lambda \frac{\text{Janela}}{\text{Diâmetro Núcleo}} = 3,55$
		6.1

Desta forma, tanto a força compressiva axial no enrolamento externo, quanto no enrolamento interno, irão aumentar devido à derivação no enrolamento externo.

A Tabela 3.11 apresenta os resultados referentes à força axial, considerando o efeito da derivação no enrolamento externo, ou seja, são apresentados os valores para a situação em que o enrolamento esteja incompleto, o qual possui 760 espiras. Nota-se nesta situação operacional que a contribuição da força axial causada pela derivação foi bem significativa.

Tabela 3.11 - Força axial para o enrolamento incompleto – Transformador 5 MVA.

Força Axial Calculada	Valor [N]
Força Causada pela Derivação ($F_{ax-deriv}$) - Equação 3.23	560×10^3
Máxima Compressão Enrolamento Interno ($F_{ax-max-i}$) - Equação 3.24	677×10^3
Máxima Compressão Enrolamento Externo ($F_{ax-max-e}$) - Equação 3.25	619×10^3

Conforme descrito pelo tópico 3.3.3, as maiores forças axiais e conseqüentemente os maiores estresses estão localizadas nas extremidades dos enrolamentos ou adjacentes às derivações quando existentes. Estes esforços foram calculados e são apresentados pela Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Força axial na extremidade dos enrolamentos – Transformador 5 MVA.

Força Axial Calculada	Valor
Força Extremidade Enrolamento Interno (F_a) <i>Equação 3.31</i>	$39 \times 10^3 [N]$
Força Axial Distribuída Extremidade Enrolamento Interno ($F_{ax-dist}$)	$27,0 [N/mm]$
Força Extremidade Enrolamento Externo (F_a) <i>Equação 3.31</i>	$39 \times 10^3 [N]$
Força Axial Distribuída Extremidade Enrolamento Externo ($F_{ax-dist}$)	$21,0 [N/mm]$
Força Adjacente à Derivação Enrolamento Externo (F_a) <i>Equação 3.32</i>	$73 \times 10^3 [N]$
Força Axial Distribuída Adjacente à Derivação Enrolamento Externo ($F_{ax-dist}$)	$39,0 [N/mm]$

Este transformador possibilita o cálculo de alguns parâmetros peculiares apresentados no tópico 3.3.4. A presença de suportes distribuídos de forma radial no enrolamento externo nos permite estimar os valores dos estresses axiais, considerando a tendência de curvatura entre esses suportes - efeito “*bending*”. Este será mais evidenciado nas extremidades dos enrolamentos ou adjacente a uma derivação, já que conforme explanado, os maiores esforços ocorrem nessas regiões. Além desse efeito, deve-se calcular a força crítica devido à possibilidade de *tilting*, pelo fato do enrolamento externo ser do tipo disco.

Os resultados, considerando tais fenômenos, são fornecidos pela Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Estresse devido ao efeito Bending e Força crítica ao efeito Tilting – Transformador 5 MVA.

Parâmetro	Valor
Estresse <i>Bending</i> – Extremidade Enrolamento Externo $(\sigma_{ax-bending})$ - Equação 3.33	10,3 [N / mm ²]
Estresse <i>Bending</i> – Adjacente Derivação Enrolamento Externo $(\sigma_{ax-bending})$ - Equação 3.33	17,9 [N / mm ²]
Força Axial Crítica – Efeito <i>Tilting</i> ($F_{ax-crit}$) Equação 3.34	844×10^3 [N]

c) Análise dos Resultados

De posse dos resultados apresentados anteriormente, este item tem por objetivo apresentar uma análise comparativa de alguns dos valores obtidos analiticamente com àqueles admissíveis pelos enrolamentos do transformador, a fim de identificar a possibilidade de danos físicos no equipamento.

Antes de ilustrar os resultados, devem-se tecer algumas considerações:

- Diferentemente do estresse de tração radial, o qual não exige uma análise mais complexa, o estresse radial de compressão deve ser especificado em função do número mínimo de suportes axiais a serem projetados, e desta forma pode ocorrer o efeito de *buckling*. Como neste transformador não há presença de tais espaçadores, nenhuma análise comparativa foi realizada em relação a este tipo de estresse;
- O máximo estresse axial deve ser calculado devido ao efeito *bending* causado pela força axial, e nesta situação específica, o maior estresse está localizado no enrolamento externo, já que neste há presença de derivações (tapes);

- Como o enrolamento externo deste transformador é do tipo disco, há a possibilidade de realizar uma comparação com uma força crítica (admissível), levando-se em consideração o efeito *tilting*;
- Para os exemplos de aplicação da metodologia analítica, os limites críticos (admissíveis) de estresses mecânicos foram baseados em [18, 34, 35]. Não obstante, para a obtenção desses valores de forma mais precisa, devem-se realizar ensaios mecânicos dos condutores utilizados nos enrolamentos. Além disso, os valores admissíveis variam em função da construção do equipamento.

Na Figura 3.14 ilustra-se uma comparação entre o valor calculado e aquele de referência para o estresse de tração radial máximo suportável.

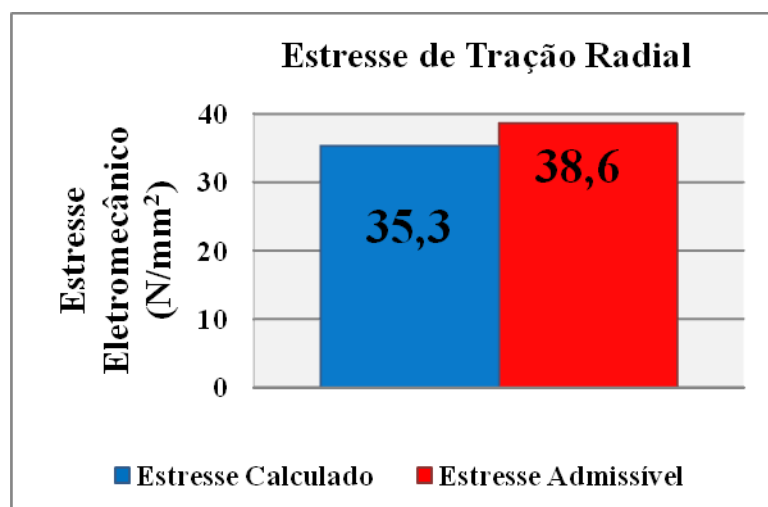


Figura 3.14 - Estresse de tração radial no enrolamento externo comparando com o estresse admissível – Transformador 5 MVA.

Observa-se que o estresse de tração radial (35,3 N/mm²) está bem próximo do limite. Contudo, geralmente os valores de referência são bem maiores que o utilizado.

A Figura 3.15 detalha uma comparação entre os valores estimados e aqueles de referência para o estresse axial máximo suportável, levando-se em consideração o efeito *bending*.

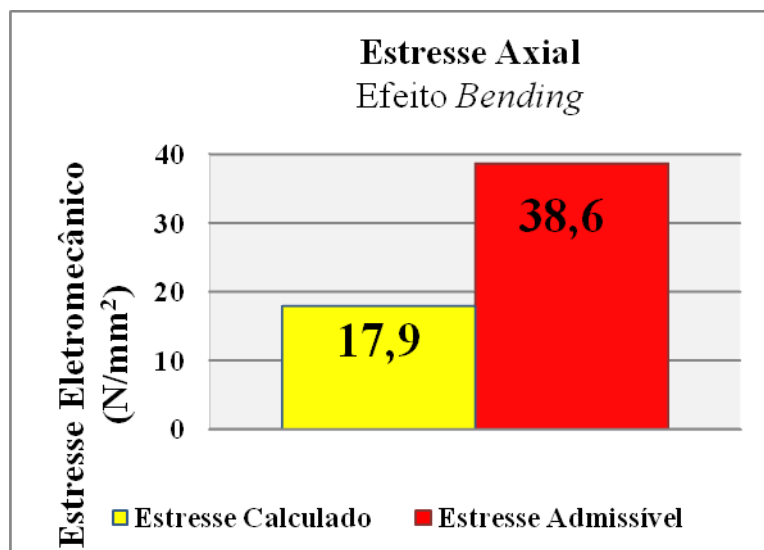


Figura 3.15 - Estresse axial (efeito *bending*) no enrolamento externo comparando com o estresse admissível – Transformador 5 MVA.

Considerando-se o máximo efeito de *bending* que ocorre no enrolamento externo devido à presença de tapes, o valor calculado (17,9 N/mm²) ficou abaixo do limite admissível.

Finalmente, na Figura 3.16 é realizada uma comparação com o valor de referência para a máxima força axial de compressão suportável, levando-se em conta o efeito *tilting*.

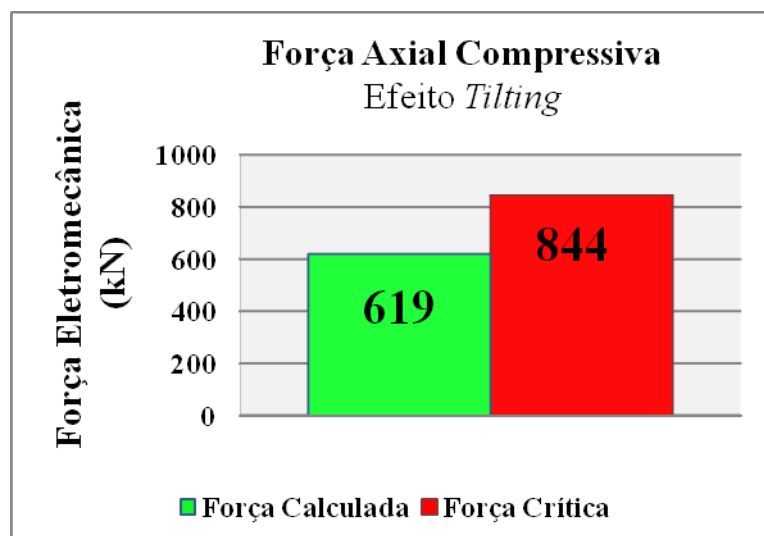


Figura 3.16 - Força axial (efeito tilting) no enrolamento externo comparando com a força admissível – Transformador 5 MVA.

De acordo com a referência [18] e conforme foi explicado na seção 3.3.1, sugere-se que seja aplicado um aumento de 25%, em relação ao valor total calculado, nas forças axiais localizadas na janela do transformador vinculadas ao enrolamento externo. Assim, aplicando-se esta elevação ao valor calculado de 619 [kN], resulta-se em uma força de aproximadamente 774 [kN]. Portanto, observa-se ainda um valor abaixo do admissível igual a 844 [kN], garantindo a suportabilidade ao efeito *tilting*.

d) Comentários

A partir dos resultados apresentados, verificam-se elevadas magnitudes das forças e estresses eletromecânicos desenvolvidos nos enrolamentos do transformador quando submetidos a curto-circuito trifásico. Além disso, quando há presença de tapes, o cálculo das forças axiais é bem complexo, exigindo maior atenção nos resultados, já que os esforços axiais podem aumentar significativamente.

3.4.2 Exemplo para um Transformador Trifásico de 15 kVA

O transformador a ser estudado não possui tapes. Além disso, os enrolamentos não são providos de espaçadores (radiais e axiais), e os mesmos são de configurações simples (tipo camada). Assim, diferentemente do caso anterior, neste exemplo evidencia-se que o grau de complexidade dos cálculos analíticos é minimizado

Na Tabela 3.14 apresentam-se as características elétrica, magnética e geométrica do transformador trifásico de 15 kVA – 220/220 V.

A corrente de curto-circuito, a qual apresenta um fator de assimetria de aproximadamente 1,36, foi obtida em simulação realizada no software ATP, cujos resultados serão apresentados no próximo capítulo. Este valor é totalmente justificável, pois o valor de $R\%$ considerado na simulação foi de 1%. Através do valor de $Z\%$, igual a 3,47%, pode-se estimar o valor de $X\%$, o qual será de aproximadamente 3,3%. Assim, a relação $R\%/X\%$ será de 0,3. Conforme Tabela 2.4, este valor representa um fator de impulso f_i aproximado de 1,38.

Tabela 3.14 - Características elétrica, magnética e geométrica do transformador de 15 kVA.

Potência do transformador	15 kVA	
Número de fases	3	
Tensão	Enrolamento externo	220 V
	Enrolamento interno	220 V
Tipo de ligação (enrolamentos com terminais acessíveis)	Enrolamento externo	Estrela ou delta
	Enrolamento interno	Estrela ou delta
Dimensões do fio de cobre	Enrolamento externo	3,5 x 4,5 mm
	Enrolamento interno	3,5 x 4,5 mm
Densidade de corrente	Enrolamento externo	2,58 A/mm ²
	Enrolamento interno	2,58 A/mm ²
Número de espiras	Enrolamento externo	66 em duas camadas
	Enrolamento interno	66 em duas camadas
Enrolamento interno	Diâmetro externo	106x10 ⁻³ m
	Diâmetro interno	87x10 ⁻³ m
Enrolamento externo	Diâmetro externo	151x10 ⁻³ m
	Diâmetro interno	132x10 ⁻³ m
Área aparente	Coluna	49,996x10 ⁻⁴ m ²
	Culatra	52,826x10 ⁻⁴ m ²
Área líquida	Coluna	47,496x10 ⁻⁴ m ²
	Culatra	50,185x10 ⁻⁴ m ²
Largura	Coluna	80x10 ⁻³ m
	Culatra	66x10 ⁻³ m
Densidade de fluxo magnético	Coluna	1,55 Tesla
	Culatra	1,44 Tesla
Impedância percentual	3,47 %	
Frequência de operação	60 Hz	
Valor assimétrico da corrente de curto-circuito	Enrolamento Interno	2192 A
	Enrolamento Externo	2192 A

Diante das informações coletadas, foram realizados os cálculos para as forças e estresses radiais e axiais.

a) Cálculo das forças e estresses radiais

As Tabelas 3.15e 3.16 apresentam os resultados referentes à força e estresse radial.

Tabela 3.15 - Resultados obtidos para força radial – Transformador 15 kVA.

Enrolamento	Força Radial Total (F_r) [N] <i>Equação 3.5</i>	Força Radial Média (F_{rmed}) [N] <i>Equação 3.6</i>	Força Radial Distribuída ($F_{rad-dist}$) [N / mm] <i>Equação 3.7</i>
Interno	$23,87 \times 10^3$	$7,6 \times 10^3$	2,39
Externo	$35,0 \times 10^3$	$11,14 \times 10^3$	2,39

Tabela 3.16 - Estresses causados pela força radial – Transformador 15 kVA.

Estresse Radial Calculado	Valor [N / mm ²]
Estresse radial no enrolamento interno ($\sigma_{r-medio}$) - <i>Equação 3.8</i>	3,65
Estresse radial no enrolamento externo ($\sigma_{r-medio}$) - <i>Equação 3.8</i>	5,36

Diante dos resultados obtidos, pode-se observar novamente que os esforços, ainda que inferior aos da seção anterior, são elevados. Para este transformador os estresses deveriam também ser comparados com aqueles suportados pelo condutor.

b) Cálculo das forças e estresses axiais

A seguir, a Tabela 3.17 apresenta os resultados referentes aos esforços axiais.

Tabela 3.17 - Resultados obtidos para força axial – Transformador 15 kVA.

Força Axial Calculada	Valor
Força Compressiva Total (F_{cTotal}) - Equação 3.16	$5,62 \times 10^3 [N]$
Força Compressiva Enrolamento Interno (F_{c-i})	$3,74 \times 10^3 [N]$
Força Compressiva Enrolamento Externo (F_{c-e})	$1,87 \times 10^3 [N]$
Força Extremidade Enrolamento Interno (F_a) <i>Equação 3.31</i>	$0,57 \times 10^3 [N]$
Força Axial Distribuída Extremidade Enrolamento Interno ($F_{ax-dist}$)	$1,89 [N/mm]$
Força Extremidade Enrolamento Externo (F_a) <i>Equação 3.31</i>	$0,57 \times 10^3 [N]$
Força Axial Distribuída Extremidade Enrolamento Externo ($F_{ax-dist}$)	$1,29 [N/mm]$

Como neste transformador não há presença de suportes distribuídos radialmente, e seus enrolamentos são ambos do tipo camada, não existirá o estresse pelo efeito *bending*, nem pelo efeito *tilting*, causados pela força axial.

c) Análise dos Resultados

De posse dos resultados apresentados anteriormente, este item tem por objetivo apresentar uma análise comparativa entre o estresse de tração radial com o valor admissível pelo enrolamento, a fim de identificar a possibilidade de danos físicos no equipamento.

Na Figura 3.17 ilustra-se uma comparação entre o valor calculado e aquele de referência para o estresse de tração radial máximo suportável.

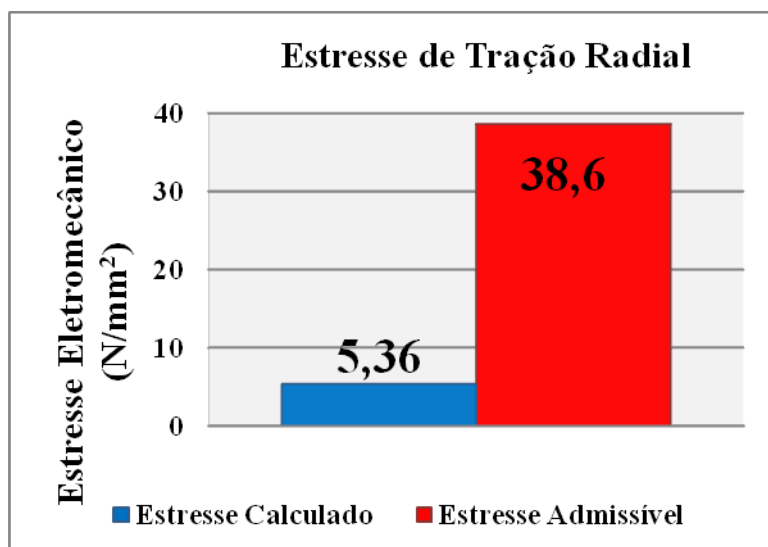


Figura 3.17 - Estresse de tração radial no enrolamento externo comparando com o estresse admissível – Transformador 15 kVA.

Observa-se que o estresse de tração radial ($5,36 \text{ N/mm}^2$) é bem inferior ao limite. Desta forma, a possibilidade de ocorrência de uma falha mecânica é menor comparada com o transformador de 5 MVA.

Diante da ausência de espaçadores tanto radiais, quanto axiais, os efeitos do tipo *buckling* e *bending* não foram analisados. Além disso, como não há nenhum enrolamento do tipo disco, o efeito *tilting* também não foi estudado.

d) Comentários

Contrariamente ao exemplo anterior, os cálculos para este transformador foram bem mais simples. Ressalta-se mais uma vez que os esforços axiais tendem a ser 25% maior que o valor médio calculados para o enrolamento localizado na janela do equipamento. Este aumento é evidenciado principalmente em maiores transformadores, onde a distância entre colunas é tal que propicie um maior fluxo de dispersão entre os enrolamentos. Além disso, a distribuição da força compressiva total de 2/3 para o enrolamento interno e de

1/3 para o enrolamento externo pode não ser totalmente verdadeira no caso deste transformador.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados dos esforços para o transformador de 15 kVA por meio de simulações computacionais através de uma modelagem baseada no método dos elementos finitos, utilizando o software FEMM 2D.

Assim, alguns resultados obtidos analiticamente poderão ser comparados com aqueles oriundos de simulação, permitindo dessa forma uma melhor fidelidade tanto da metodologia analítica descrita neste capítulo, quanto da modelagem computacional desenvolvida no FEMM 2D.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os assuntos delineados neste capítulo foram baseados em um conjunto vasto de pesquisas, fundamentando-se em detalhes as principais características das forças eletromagnéticas e estresses eletromecânicos. Inicialmente, foram feitas as considerações necessárias que contemplaram as principais variáveis responsáveis pela origem das forças. Tais parâmetros tratam-se da presença da corrente elétrica e fluxo de dispersão. Assim, visto que as forças são diretamente proporcionais com o quadrado da corrente, logo na presença de um curto-circuito, os esforços terão elevadas magnitudes. Na sequência, o capítulo apresenta uma metodologia analítica para cálculo das forças radiais e axiais. Observa-se que em relação às forças radiais as formulações são mais simples e diretas, e além do mais, os maiores esforços estão localizados no ponto médio dos enrolamentos. Por outro lado, para o desenvolvimento das formulações relacionadas às forças axiais, é necessário fazer uso de métodos aproximados para obter as soluções. Neste trabalho, foi utilizado o método ampère-espira

residual, o qual possibilita estimar as forças axiais nos enrolamentos para os mais variados tipos de arranjos. Verificou-se que os maiores esforços deste tipo se desenvolvem nas extremidades dos enrolamentos ou nas espiras adjacentes a derivações. Além do mais, os enrolamentos quando não apresentam nenhum tipo de derivação e são totalmente alinhados entre si, surgir-se-á uma força compressiva total na metade de ambos os enrolamentos. No entanto, durante a fase de projeto os enrolamentos podem apresentar um desalinhamento axial. Quando isso ocorrer, as forças axiais produzirão um efeito de aumentar o deslocamento.

A fim de facilitar o entendimento dos equacionamentos analíticos, aplicou-se a metodologia em dois transformadores, ambos trifásicos, um de 5 MVA de construção mais complexa, e outro de 15 kVA de projeto mais simples. Pôde-se notar que as soluções variaram de acordo com a complexidade construtiva de cada equipamento. O transformador de 5 MVA, por exemplo, possui arranjo de tapes e um dos enrolamentos é do tipo disco. Isto proporciona uma necessidade maior na quantidade de cálculos a serem realizados em relação ao transformador de 15 kVA. Outras duas questões devem ser colocadas para aplicação da metodologia: Por um lado, há uma necessidade de se conhecer em detalhes a geometria do transformador. Isto pode ser uma dificuldade, visto que nem sempre todas as características do equipamento são fornecidas pelos fabricantes. Pelo outro, há uma dificuldade de se obter com precisão os valores dos estresses mecânicos admissíveis em função do tamanho do transformador.

CAPÍTULO IV

REPRESENTAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO NO FEMM (*FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS*)

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os estudos ressaltados nos capítulos anteriores são apropriados para o emprego de uma metodologia analítica sobre a estimativa dos estresses mecânicos em transformadores.

Uma segunda alternativa para estes estudos é a representação do emprego da técnica no domínio do tempo. Dentre os principais programas que se utiliza desta técnica, pode-se citar: MATLAB, SABER, EMTP e PSICE. Deve-se ressaltar que, estes programas foram elaborados, tomando-se como base a representação dos componentes dos sistemas elétricos, através de parâmetros distribuídos. Estas técnicas são amplamente utilizadas e conhecidas, portanto, não necessitam de esclarecimentos adicionais.

Outra técnica bastante difundida e reconhecida nacionalmente e internacionalmente é o MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS. Esta ferramenta computacional analisa os componentes dos sistemas de energia, tais

como: motores, geradores, transformadores, cabos, etc., de tal forma que seus parâmetros elétricos são considerados como sendo distribuídos.

Adicionalmente, outro ponto de destaque desta técnica em relação às demais, é a possibilidade da determinação das distribuições de campos e fluxos eletromagnéticos nos mais diversos componentes dos sistemas elétricos. Dentre os vários programas que utilizam essa técnica, destaca-se o FEMM.

Dentro deste contexto, este capítulo tem por meta apresentar e analisar os estudos provenientes de uma simulação computacional, dos estresses eletromecânicos em um transformador trifásico de 15 kVA.

A fim de que a proposta da modelagem apresentada encontre sustentação física e mostre a sua eficácia, os resultados computacionais obtidos serão comparados com aqueles oriundos da metodologia analítica aplicada no capítulo anterior.

4.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Sabe-se que as equações de Maxwell descrevem completamente os fenômenos eletromagnéticos, mas a sua solução analítica é impraticável em equipamentos com geometrias complexas. Uma alternativa para contornar este problema é a utilização de métodos de cálculos numéricos, para a obtenção de uma solução aproximada.

O método dos elementos finitos é um entre os vários métodos conhecidos de cálculos numéricos para fenômenos eletromagnéticos.

Embora se reconheça que a maior parte dos estudos é tridimensional, a utilização bidimensional, justifica-se, pois, apesar do restrito, permite a análise, com suficiente precisão na maioria dos casos práticos encontrados na engenharia elétrica [36, 37].

Para a utilização do MEF, o objeto de estudo deve ter a sua geometria subdividida em várias partes, que são os elementos finitos. Essa subdivisão é chamada malha, sendo geralmente constituída, no caso bidimensional, de triângulos ou quadriláteros, cujos vértices são denominados de “nós das malhas”.

Com base na geometria e na malha do MEF, monta-se um sistema de equações cuja solução permite determinar as grandezas de interesse do fenômeno estudado. No caso do eletromagnetismo, essa solução é o vetor potencial magnético ou o potencial elétrico em cada nó da malha, a partir dos quais é possível determinar os campos e fluxos magnéticos ou elétricos no interior dos elementos finitos. Assim sendo, procede-se os cálculos ou a obtenção das formas de onda da corrente, tensão, etc., e ainda permite obter parâmetros, tais como: resistências, indutâncias, capacitâncias, perdas e etc [36, 37].

Conforme citado anteriormente, neste trabalho optou-se por utilizar o pacote computacional conhecido como FEMM.

O FEMM é um programa livre que proporciona um completo conjunto de ferramentas para resolver problemas no domínio 2D. Como qualquer outro programa que utiliza a técnica de elementos finitos, é baseado nos seguintes módulos:

- Pré-processamento: modelagem, definição das propriedades físicas, e geração das malhas;
- Processamento: resolução de problemas;
- Pós-processamento: apresentação dos resultados.

O programa permite a solução de problemas magnetostáticos lineares ou não-lineares; problemas magnéticos lineares ou não lineares; problemas eletrostáticos lineares e problemas de fluxo de calor.

A interatividade com o usuário é realizada através do femm.exe, onde existe uma múltipla interface com ferramentas relacionadas ao pré-processamento e pós-processamento, incorporando vários tipos de análises a serem processadas pelo FEMM. Pode-se citar, por exemplo, uma seção de CAD, a qual possibilita a criação da geometria do problema a ser resolvido, e onde se definem as propriedades físicas e as condições de fronteira. Vale ressaltar, que arquivos “.DXF” do AutoCAD podem ser importados ao programa.

Uma grande vantagem do programa é a linguagem *Lua scripting*, que incorporada ao pacote computacional apresenta um papel fundamental para facilitar a manipulação de análises a serem resolvidas no FEMM. Esta ferramenta possibilita ao usuário, por exemplo, em uma única simulação realizar diversas análises simultâneas, as quais demandariam bastante tempo se fossem simuladas separadamente.

Contudo, uma desvantagem do FEMM é que o modelo criado não pode ser conectado a um circuito elétrico externo. Assim, as grandezas elétricas (corrente, tensão, etc) a serem fornecidas em algum elemento devem ser impostas e não oriundas de um circuito elétrico. No entanto, neste trabalho, esta deficiência foi contornada utilizando o programa ATP, extraindo deste as correntes elétricas a serem impostas aos enrolamentos do transformador.

O ATP foi utilizado por se tratar de um programa amplamente recomendado pela comunidade de engenharia elétrica e os resultados obtidos são confiáveis. Além do mais, este programa emprega a técnica da resolução no domínio do tempo.

Dentro deste contexto, as simulações serão baseadas em dois programas computacionais: o ATP (*Alternative Transient Program*) e o FEMM. O primeiro será utilizado para obtenção das correntes em condições normais e em situação de curto-circuito trifásico “passante” no transformador de 15 kVA. O segundo será responsável pelo fornecimento das forças eletromecânicas que atuam nos

enrolamentos. Apresenta-se também a visualização da distribuição do fluxo magnético no interior do transformador, tanto em regime permanente, quanto sob condições de curto-circuito.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR UTILIZADO

O transformador modelado foi um transformador trifásico de três colunas (núcleo envolvido), com dois enrolamentos por fase, cujas características construtivas são ilustradas na Figura 4.1. As características geométricas, elétricas e magnéticas do transformador utilizado na modelagem são mostradas na Tabela 4.1 [2].



Figura 4.1 – Foto do Transformador trifásico 15 kVA utilizado na modelagem.

Tabela 4.1 - Características geométricas, elétricas e magnéticas do transformador de 15 kVA.

Potência do transformador	15 kVA	
Número de fases	3	
Tensão	Enrolamento externo	220 V
	Enrolamento interno	220 V
Tipo de ligação (enrolamentos com terminais acessíveis)	Enrolamento externo	estrela ou delta
	Enrolamento interno	estrela ou delta
Dimensões do fio de cobre	Enrolamento externo	3,5 x 4,5 mm
	Enrolamento interno	3,5 x 4,5 mm
Densidade de corrente	Enrolamento externo	2,58 A/mm ²
	Enrolamento interno	2,58 A/mm ²
Número de espiras	Enrolamento externo	66
	Enrolamento interno	66
Perdas em curto	Enrolamento externo	190 W
	Enrolamento interno	132 W
Peso do enrolamento	Enrolamento externo	13 kg
	Enrolamento interno	9 kg
Resistência do enrolamento	Enrolamento externo	125 mΩ
	Enrolamento interno	85 mΩ
Enrolamento interno	Diâmetro externo	106x10 ⁻³ m
	Diâmetro interno	87x10 ⁻³ m
Enrolamento interno	Diâmetro externo	151x10 ⁻³ m
	Diâmetro interno	132x10 ⁻³ m
Área aparente	coluna	49,996x10 ⁻⁴ m ²
	culatra	52,826x10 ⁻⁴ m ²
Área líquida	coluna	47,496x10 ⁻⁴ m ²
	culatra	50,185x10 ⁻⁴ m ²
Largura	coluna	80x10 ⁻³ m
	culatra	66x10 ⁻³ m
Densidade de fluxo magnético	coluna	1,55 Tesla
	culatra	1,44 Tesla
Comprimento médio do caminho magnético	coluna	0,26 m
	culatra	0,163 m
Impedância percentual	3,47 %	
Perdas totais no ferro	96 W	
Peso total do núcleo	54 kg	
Frequência de operação	60 Hz	

A título de ilustração, a Figura 4.2 [2] mostra a vista superior do transformador detalhando os enrolamentos interno e externo, o núcleo magnético e algumas dimensões físicas necessárias para implementação computacional da modelagem do transformado no FEMM. As vistas frontal e

lateral do núcleo de ferromagnético são apresentadas nas Figuras 4.3(a) e 4.3(b). Destaca-se na Figura 4.3 (a), pela linha tracejada em verde, o comprimento médio do caminho do fluxo magnético no núcleo [2].

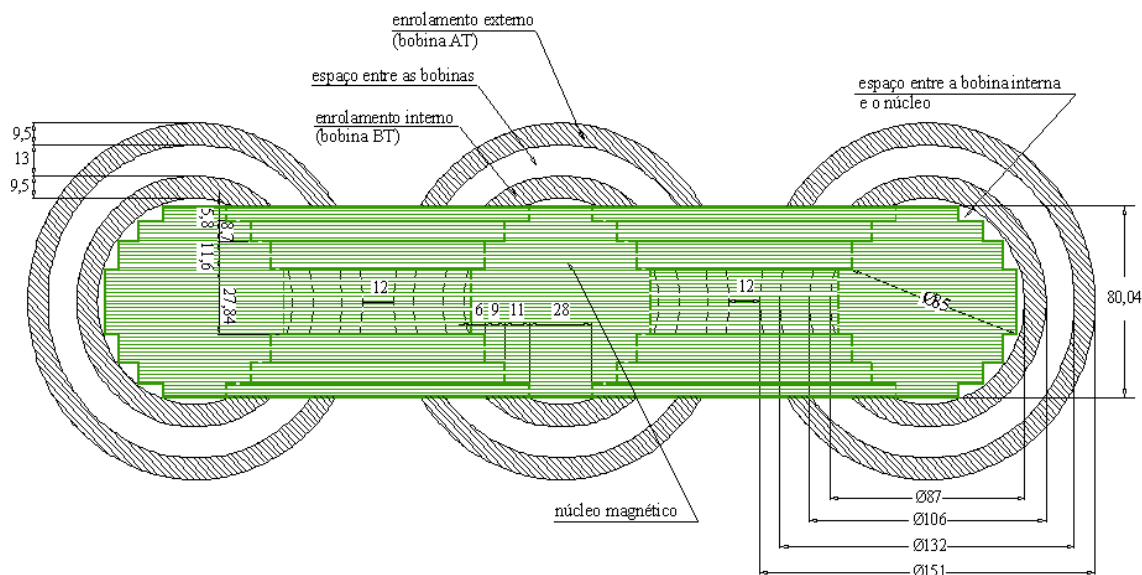


Figura 4.2 - Vista superior do transformador utilizado (dimensões em milímetros).

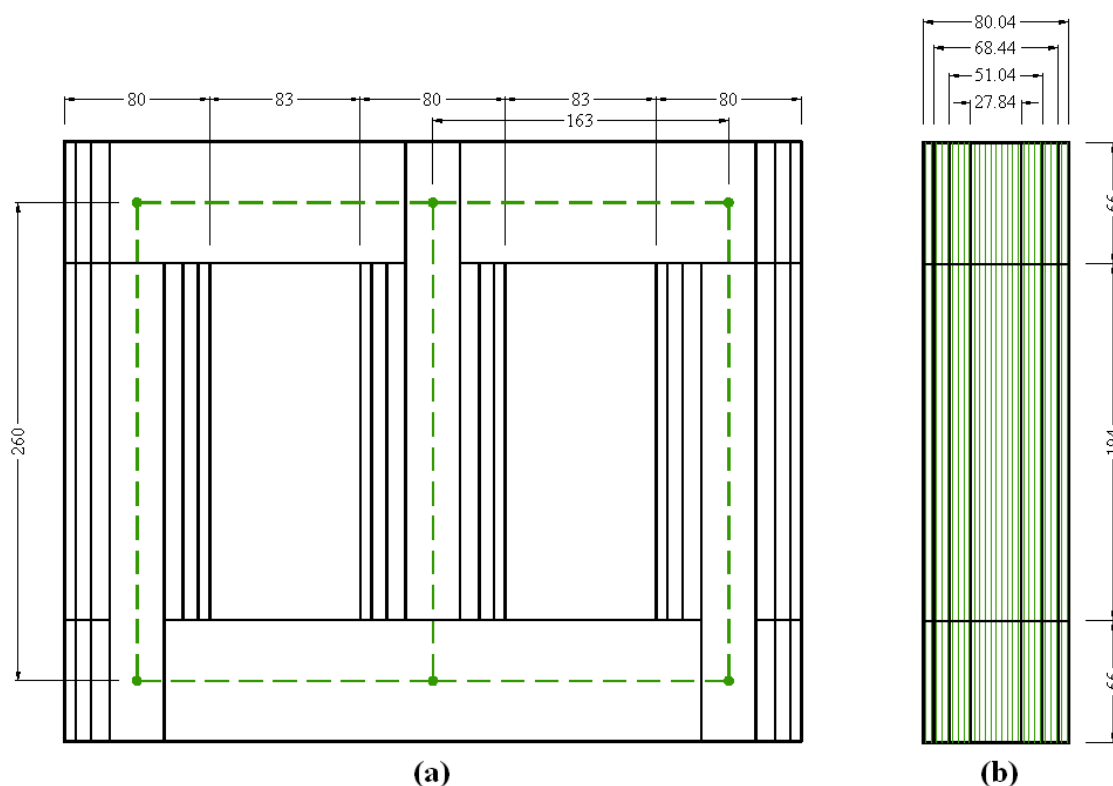


Figura 4.3 - Vistas do núcleo do transformador utilizado (dimensões em milímetros): (a) frontal, (b) lateral.

A Figura 4.4 [2] mostra uma vista frontal do transformador, incluindo alguns detalhes dos enrolamentos.

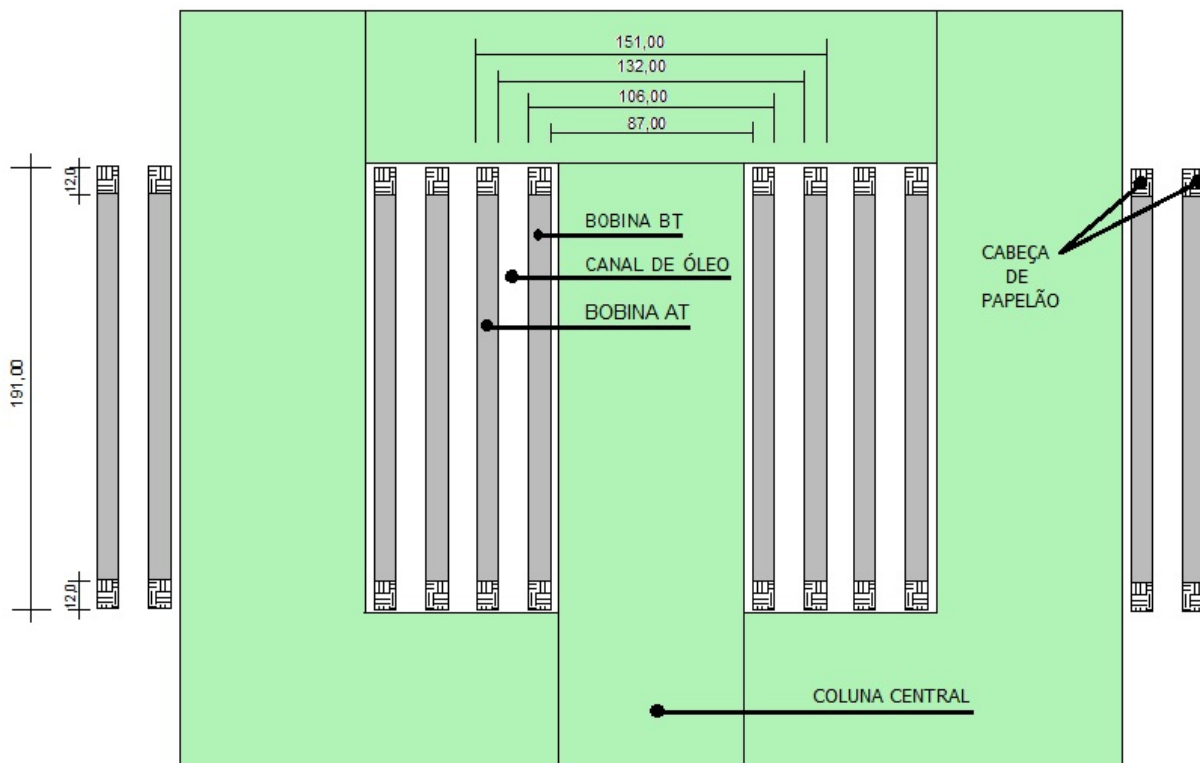


Figura 4.4 - Vista frontal do núcleo do transformador (dimensões em milímetros), considerando os enrolamentos.

Para a incorporação do efeito da saturação, torna-se essencial a representação da característica de magnetização do equipamento. A Figura 4.5 [2] mostra a curva B-H da chapa de aço silício utilizada no núcleo do transformador.

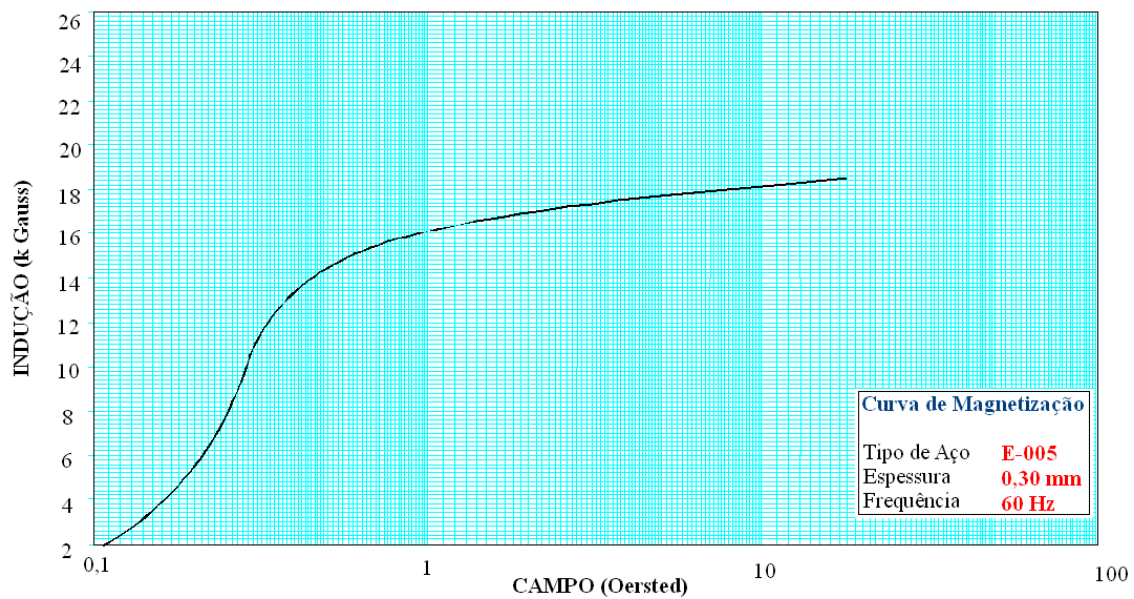


Figura 4.5 - Característica de magnetização da chapa de aço silício de grão orientado utilizada no transformador (fornecido pelo fabricante) -Campo [Oe] x Indução [kG].

A Tabela 4.2 especifica alguns pontos da referida curva, sendo que, as duas colunas sombreadas são as compostas por informações obtidas diretamente obtidos da curva do fabricante. Para a implementação digital no FEMM foi necessário realizar uma conversão de unidades nas grandezas magnéticas B e H, a partir das seguintes relações de transformação:

$$1 \text{ [Oe]} = 79,5545 \text{ [A/m]} \quad \text{E} \quad 1 \text{ [T]} = 10^4 \text{ [G]} = 10 \text{ [kG]}$$

Tabela 4.2 - Pontos específicos da curva B-H da Figura 4.5.

Indução magnética – B		Campo magnético – H	
[T]	[kG]	H [Oe]	H [A/m]
0,20	2,0	0,1060	8,4328
0,30	3,0	0,1370	10,8990
0,40	4,0	0,1630	12,9674
0,50	5,0	0,1875	14,9165
0,60	6,0	0,2100	16,7064
0,70	7,0	0,2325	18,4964
0,72	7,2	0,2350	18,6953
0,76	7,6	0,2460	19,5704
0,80	8,0	0,2550	20,2864
0,90	9,0	0,2725	21,6786
1,00	10,0	0,2875	22,8719
1,10	11,0	0,3050	24,2641
1,20	12,0	0,3320	26,4121
1,30	13,0	0,3800	30,2307
1,40	14,0	0,4550	36,1973
1,44	14,4	0,4940	39,2999
1,50	15,0	0,5900	46,9372
1,52	15,2	0,6300	50,1193
1,60	16,0	0,9600	76,3723
1,70	17,0	2,0000	159,1090
1,80	18,0	7,2000	572,7924
1,86	18,6	18,0000	1431,9810
1,98	19,8 *	100,0000 *	7955,4500

* – Ponto obtido pela extrapolação da curva B-H.

4.4 MODELAGEM DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 15 KVA NO PROGRAMA FEMM

Este item se propõe a apresentar os resultados elétricos, magnéticos e mecânicos obtidos da modelagem do transformador para três situações diferentes de operação. Inicialmente, será analisado o equipamento operando em condição nominal. Posteriormente, analisa-se a situação do transformador submetido um curto-circuito trifásico. Finalmente, os estudos estão voltados aos resultados obtidos na condição do transformador submetido a um curto-circuito trifásico. Porém, neste caso, impõe-se um pequeno desalinhamento geométrico entre o enrolamento interno e externo em uma das fases do transformador.

Para todas essas situações, os procedimentos para as modelagens se basearam nas seguintes etapas:

- Utilização do programa ATP para obtenção das correntes elétricas em condições normais e de curto-circuito trifásico. Estes cálculos preliminares, tornam-se necessários para viabilizar a implementação da modelagem do equipamento no FEMM;
- Criação da geometria do transformador no FEMM;
- Definição das propriedades físicas dos materiais relacionados à geometria;
- Geração de malhas;
- Solução da modelagem com ou sem o *Lua scripting*;
- Análise dos resultados obtidos, os quais tiveram um tratamento no programa MATLAB.

4.4.1 Caso 1: Modelagem do transformador operando em condição normal de operação

Tomando-se como base as informações anteriores, modelou-se a geometria do transformador, a qual está identificada pela Figura 4.6. Diferentemente da referência [2], o enrolamento foi modelado espira por espira, e camada por camada. Desta forma, os resultados podem ser obtidos individualmente em cada espira, e não somente no enrolamento como um todo [2]. Esta estratégia proporcionou uma precisão dos resultados, principalmente nas análises envolvendo as forças axiais e estresses axiais. Esta situação será apresentada na seqüência deste capítulo.

Vale ressaltar ainda que foi utilizado um modelo planar com uma profundidade de 1 [mm]. Isto significa, por exemplo, que o valor da força obtida em cada condutor do enrolamento estará na unidade de [N/mm].

Além disso, existem entreferros associados às colunas e culatras no núcleo do transformador. Por questões de simplificação, no modelo que está sendo implementado no FEMM, serão considerados três entreferros: o primeiro associado à coluna externa esquerda e culatras (lado esquerdo) superior e inferior ($\mathfrak{R}_e$) o segundo associado somente à coluna central ($\mathfrak{R}_c$) e o terceiro associado à coluna externa direita e às culatras (lado direito) superior e inferior ($\mathfrak{R}_d$) [38]. Tais valores são de difíceis obtenções por medições físicas. Desta forma, serão empregados os valores obtidos pela referência [38], a qual calcula as relutâncias para este transformador. Entretanto, o dado necessário para a inserção destes parâmetros no FEMM é sua espessura. De posse dos valores das relutâncias, e empregando a equação 4.1, podem-se determinar os valores das espessuras dos entreferros. Os valores das relutâncias obtidas pela referência [38] e das espessuras dos entreferros são apresentados na Tabela 4.3.

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \times A} \quad (4.1)$$

Onde:

$\mathfrak{R}$: Relutâncias $\mathfrak{R}_e$, $\mathfrak{R}_d$ ou $\mathfrak{R}_c$ [H^{-1}];

l : Espessura dos entreferros, l_e , l_d ou l_c [m];

A : Área da seção transversal da coluna, $A_{coluna} = 0.004749 m^2$;

μ_0 : Permeabilidade do ar, $\mu_0 = 4 \times \pi \times 10^{-7}$.

Tabela 4.3 – Valores das relutâncias e das espessuras do entreferro do transformador modelado.

Coluna	Esquerda	Central	Direita
Relutância [H^{-1}]	20294,19	7547,36	20294,19
Espessura Entreferro [m]	0,00012	0,000045	0,00012

Por fim, o tanque foi utilizado como sendo a condição de contorno do modelo.

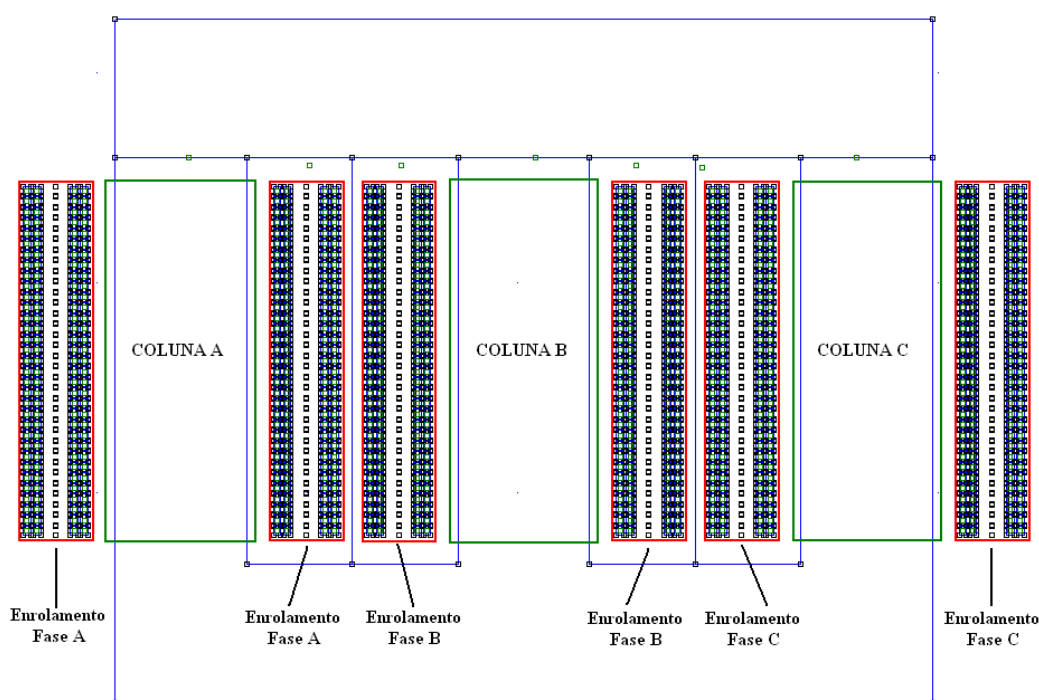


Figura 4.6 - Geometria do transformador implementado no FEMM.

Para esse modelo, quatro tipos de materiais foram incorporados. O material AR foi utilizado para representar o óleo, e está inserido nas seguintes regiões: tanque; entreferro; entre espiras e na janela do transformador. Vale lembrar que o propósito deste trabalho é totalmente relacionado à análise magnética, onde as propriedades do ar e do óleo são semelhantes. A principal propriedade inserida no modelo para este material é a sua permeabilidade relativa, cujo valor é igual a 1. Para a representação do núcleo ferromagnético do transformador, a curva B-H apresentada pela Tabela 4.2 foi inserida, a fim de

definir a não-linearidade do núcleo. Por fim, os materiais ENR_BT e ENR_AT foram utilizados para definir respectivamente os enrolamentos internos (Baixa Tensão - BT) e externos (Alta Tensão - AT). As propriedades definidas no FEMM para estes dois últimos materiais também foram AR. A diferença é que se tratando de materiais condutores, ambos foram relacionados a circuitos criados no FEMM. Assim, para o enrolamento interno (BT), foram criados os circuitos BT_A, BT_B e BT_C e para o enrolamento externo (AT), os circuitos AT_A, AT_B e AT_C. Os índices A, B e C, se referem às três fases do transformador. Na criação destes circuitos são requeridos os valores das correntes e os tipos de ligação das espiras (série ou paralelo).

Para ilustrar a definição dos diferentes elementos na geometria do modelo, a Figura 4.7 mostra o procedimento para caracterizar uma espira da camada externa relacionada ao enrolamento externo da fase A.

No campo *Block_type* é inserido o material ENR_AT, criado anteriormente. No campo *In circuit* cita-se o circuito sob análise, neste caso o circuito AT_A. Quando a região é associada à um circuito, automaticamente é requerido o número de espiras. Neste caso, foi selecionado -1, onde o número 1 se refere a uma espira e o sinal negativo atribui-se ao sentido da corrente.

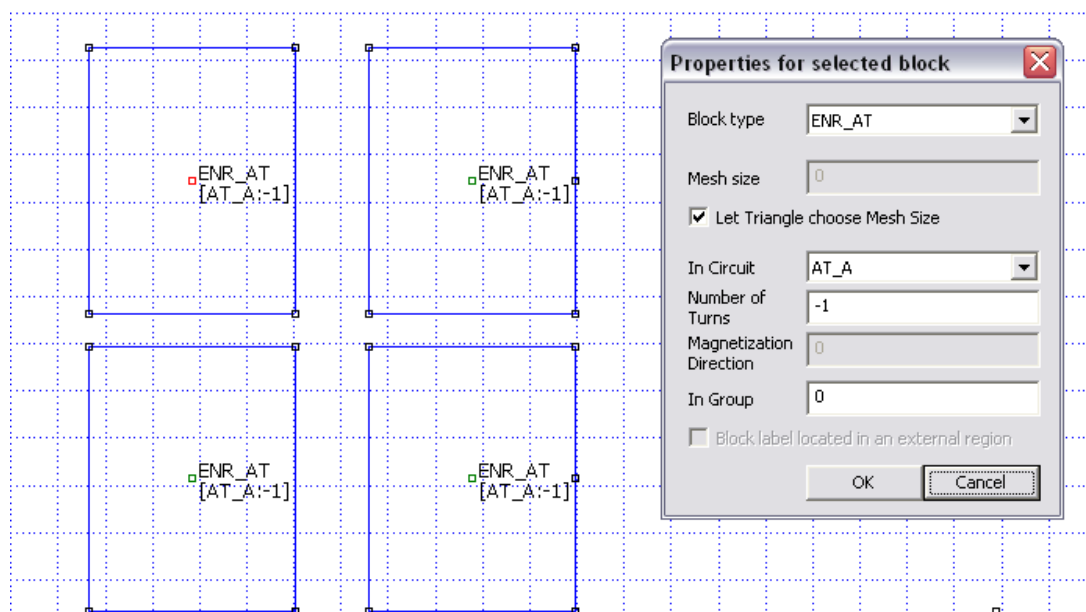


Figura 4.7 - Exemplo de caracterização dos diferentes elementos da geometria do transformador.

A implementação no FEMM dos valores das correntes tanto para condição normal de operação, quanto para o caso de curto-circuito, foram realizadas através de uma simulação no programa ATP. Para tanto, o modelo de transformador a ser utilizado pode ser representado por aquele fornecido pelo programa, ou seja, modelagem do transformador como banco de transformadores. Outra opção é utilizar a modelagem de transformador de três colunas, conforme referência [38]. Este último proporciona respostas mais próximas principalmente para a condição normal de operação e, portanto, foi o utilizado para esta simulação, cujo circuito é apresentado na Figura 4.8.

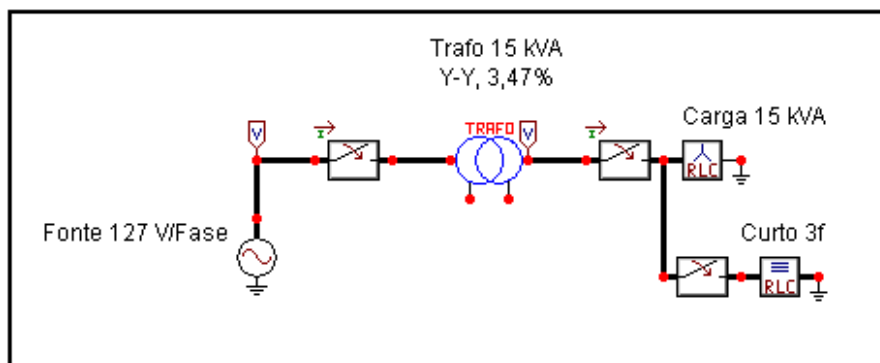


Figura 4.8 - Circuito modelado no ATP para obtenção das correntes em condição normal de operação e de curto-circuito.

A Figura 4.9 apresenta o gráfico das correntes nas três fases tanto no primário (enrolamento externo – AT), quanto no secundário (enrolamento interno – BT) do transformador. Deve-se lembrar que o valor da corrente eficaz calculada para esta condição de operação é de 39,39 [A], ou de 55,7 [A] de pico. Assim, nota-se que este valor está bem próximo ao obtido pela simulação no ATP.

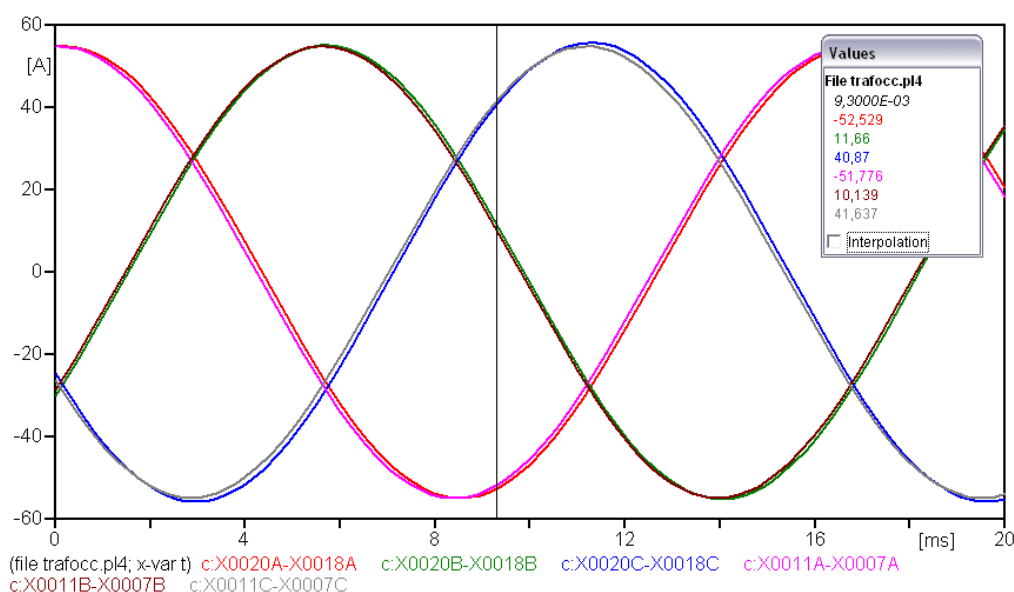


Figura 4.9 - Gráfico das correntes em condição normal de operação referentes ao primário e secundário obtidas pelo ATP.

A Figura 4.10 mostra a diferença entre as correntes do primário e secundário, que na realidade é a corrente de magnetização do transformador. Para a análise no FEMM, foi escolhido o instante de 9,3 [ms], pois teve-se o interesse em analisar a situação onde a corrente de magnetização é a maior na fase B, ou seja, na coluna central do transformador.

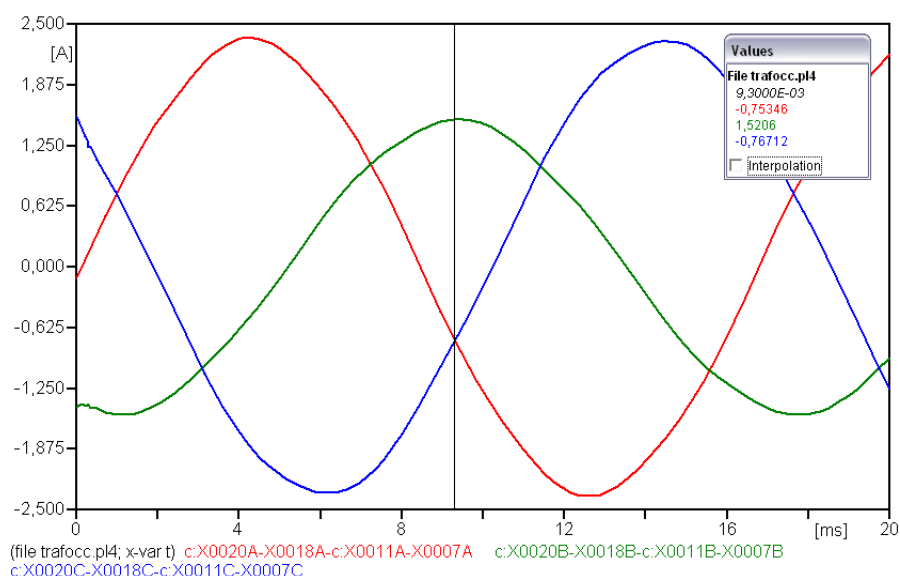


Figura 4.10 - Gráfico das correntes de magnetização para condição normal de operação.

Assim, após a definição completa de todos os elementos da geometria do transformador, bem como da incorporação das correntes em condição normal de operação no instante em que a fase B apresenta maior valor, foi gerada a malha (tipo triangular) no FEMM, a qual é ilustrada pela Figura 4.11.

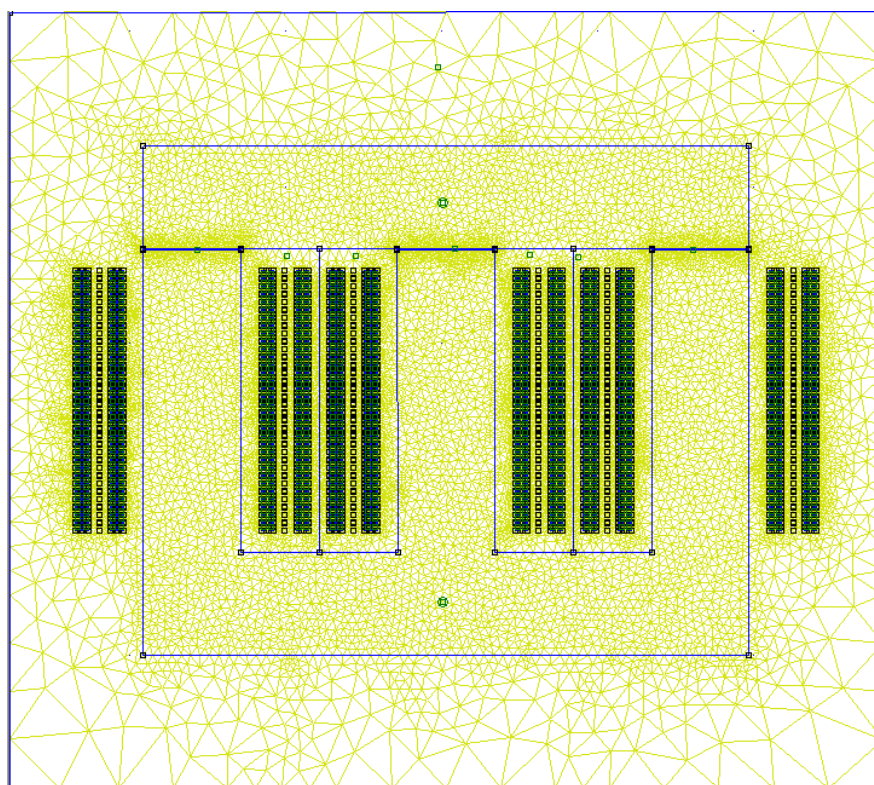


Figura 4.11 - Processo de geração de malha no modelo do transformador.

Após a criação das malhas, entra-se para a fase de processamento. Nesta condição de estudo, interessa-se em visualizar apenas o comportamento da distribuição da densidade de fluxo no núcleo do transformador. Assim, analisa-se um único instante de tempo, e conseqüentemente o processamento pode ser realizado de forma direta no FEMM, sem que seja necessária a incorporação do *Lua scripting*.

Dentro destes aspectos, a Figura 4.12 ilustra a distribuição da densidade de fluxo magnético no núcleo do transformador para a condição normal de operação, para o instante quando o fluxo magnético é máximo na coluna do meio, ou seja, a fase B.

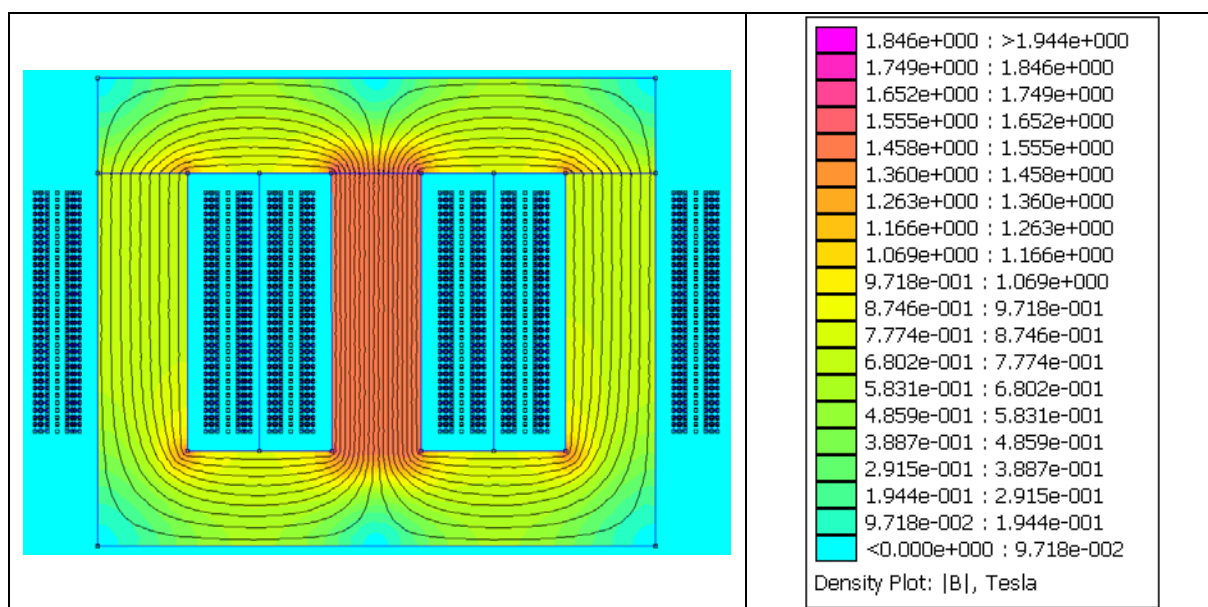


Figura 4.12 - Densidade de fluxo obtida pelo FEMM para condição normal de operação.

Nota-se pelo gráfico de cores, que a densidade de fluxo na coluna central está em torno de 1,55 [T], ou seja, igual ao valor fornecido pelo fabricante.

A Figura 4.13 mostra o comportamento da densidade de fluxo ao longo da largura do transformador. Isto foi realizado traçando uma linha desde o ponto médio da camada externa do enrolamento externo, fase A, até o ponto médio da camada externa do enrolamento externo, fase C. As regiões desta distribuição foram relacionadas de acordo com aquelas apresentadas pela Figura 4.6.

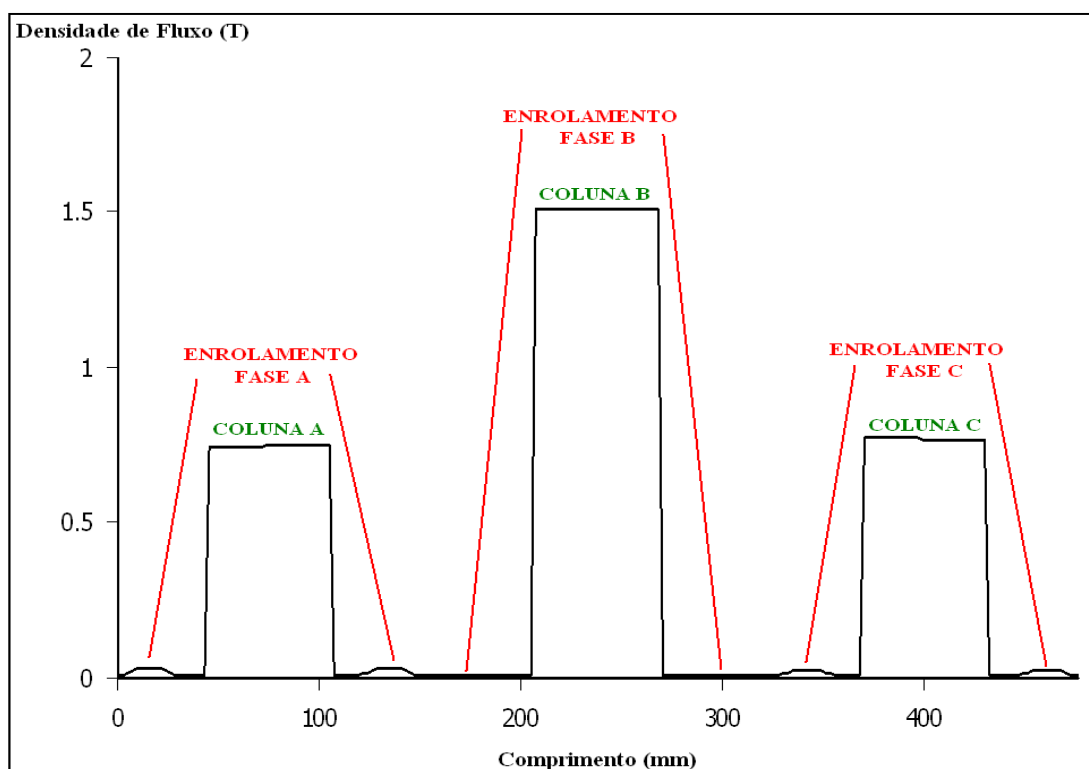


Figura 4.13 - Densidade de fluxo obtida pelo FEMM nas colunas do transformador e nas regiões entre enrolamentos de cada fase, para condição normal de operação.

Observa-se que a densidade de fluxo entre o enrolamento interno e externo da fase B é bastante pequena. Assim, o produto vetorial entre a densidade do fluxo de dispersão e da corrente em condição normal de operação, produzirão forças eletromecânicas bem reduzidas. Por isso, optou-se por analisar as forças apenas na situação de curto-circuito, a qual é apresentada no próximo tópico.

4.4.2 Caso 2: Modelagem do transformador submetido a curto-circuito trifásico

Este caso é semelhante ao anterior, porém as correntes impostas e incorporadas no FEMM foram as correntes de curto-circuito trifásico obtidas no

ATP. Os seus valores e as suas formas de onda são apresentados respectivamente na Figura 4.14 e Tabela 4.4. Nota-se que as correntes no primário e secundário estão praticamente sobrepostas.

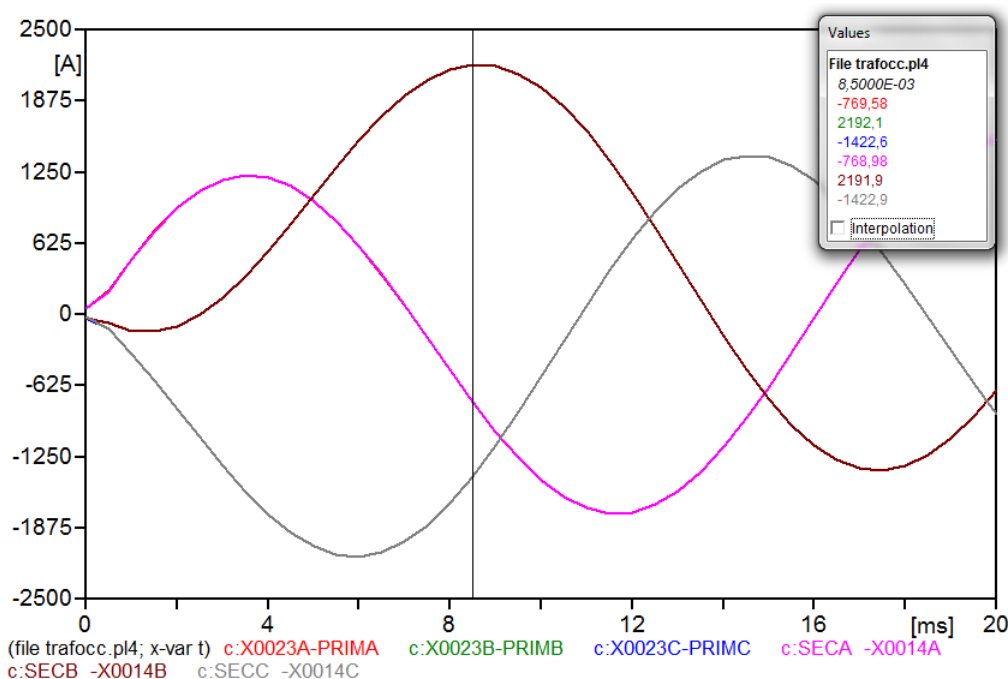


Figura 4.14 - Gráfico das correntes de curto-circuito referentes ao primário e secundário obtidas pelo ATP.

Tabela 4.4 - Correntes de curto-circuito referentes ao primário e secundário obtidas pelo ATP.

Corrente	Fase A [A]	Fase B [A]	Fase C [A]
Primário	-769,58	2192,1	-1422,6
Secundário	-768,98	2191,9	-1422,9

O maior valor de pico da corrente assimétrica de curto-circuito ocorreu na fase B, cujo valor é de 2192,1 [A]. Este valor foi alcançado em aproximadamente 8,5 [ms]. Este resultado já era esperado pelas razões já explicadas no capítulo anterior, seção 3.4.2. Desta forma, somente as forças eletromecânicas nesta fase serão analisadas.

Tomando-se como base o instante de tempo considerado anteriormente, observa-se que ao realizar a diferença entre as correntes de curto-circuito trifásico obtidas no primário no secundário, o maior valor se manifesta na fase A. Esta corrente de magnetização será responsável pela distribuição da indução magnética no núcleo do transformador.

Após inserir os valores da Tabela 4.4 no FEMM, a malha foi gerada, a qual é semelhante àquela representada pela Figura 4.11.

Diante do interesse em analisar o comportamento das forças eletromecânicas em vários instantes de tempo, o processamento da modelagem foi realizado com o auxílio do *Lua scripting*, otimizando bastante a simulação e permitindo uma melhor análise dos resultados.

A densidade de fluxo magnético para a situação de curto-circuito também foi analisada e sua distribuição é apresentada pela Figura 4.15.

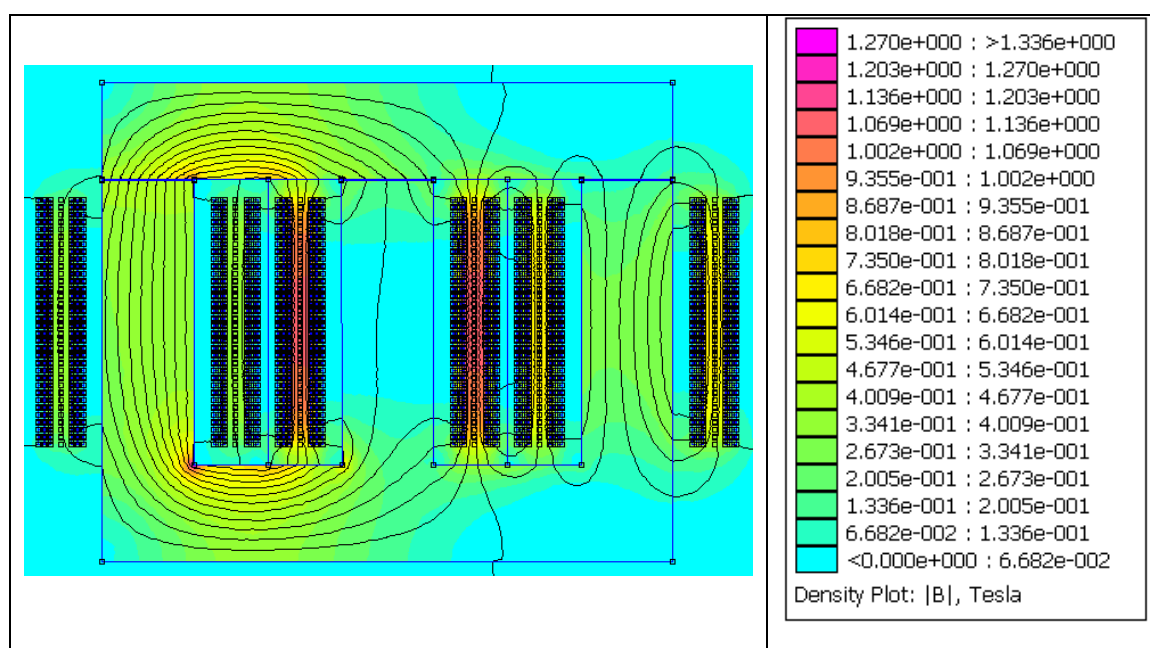


Figura 4.15 - Densidade de fluxo obtida pelo FEMM para situação de curto-circuito.

De acordo com a figura 4.15, observa-se através do gráfico de cores que a densidade de fluxo de dispersão concentra-se agora entre os enrolamentos da fase B, o qual é de aproximadamente 1,1 [T]. Neste sentido, este fluxo de dispersão associada à elevada corrente de curto-circuito no enrolamento

produzirão elevados esforços eletromecânicos. Nota-se também como era esperado, que a densidade do fluxo magnético no núcleo, reduz consideravelmente. Isto se justifica, pois o transformador na condição de curto-circuito, praticamente a totalidade do fluxo magnético fica distribuído no óleo.

Semelhante ao caso anterior foi obtida também uma curva representada pela Figura 4.16, que ilustra o comportamento da densidade de fluxo magnético ao longo do transformador. A diferença é que agora haverá uma maior concentração do fluxo magnético entre os enrolamentos interno e externo de cada fase.

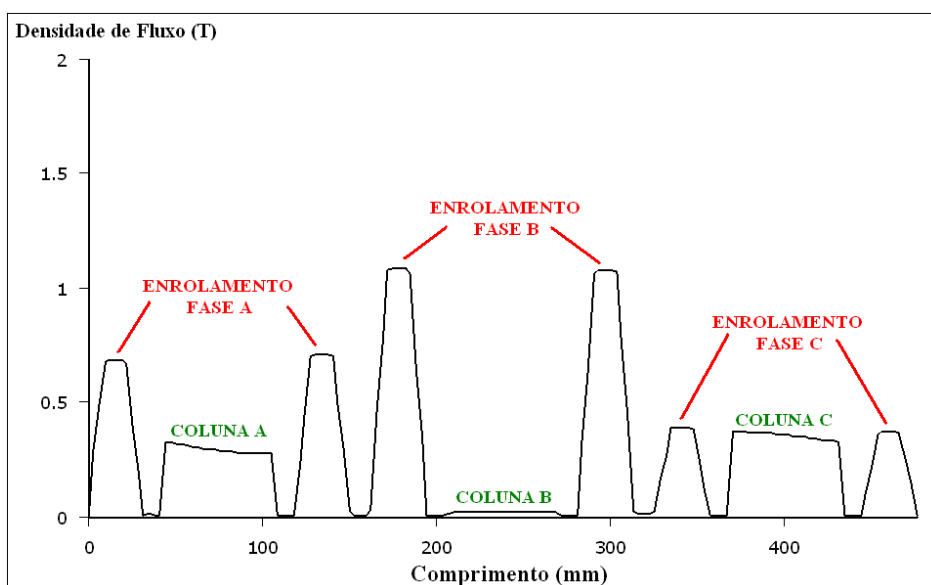


Figura 4.16 - Densidade de fluxo obtida pelo FEMM nas colunas do transformador e nas regiões entre enrolamentos de cada fase, para situação de curto-circuito.

Uma vez que os fluxos de dispersão e as correntes de curto-circuito foram obtidos, devem-se estimar as forças eletromecânicas. Inicialmente, faz-se necessário um sistema de referências de sinais, que é apresentada pela Figura 4.17. Na Figura 4.18, procede-se propriamente dito às análises das forças diretamente do FEMM, sem utilização do *Lua scripting*. Neste caso específico, foram extraídas as forças em x (radial) e em y (axial), para as espiras localizadas

em ambas as extremidades do enrolamento interno da fase B, tanto ao lado esquerdo quanto ao direito do núcleo.

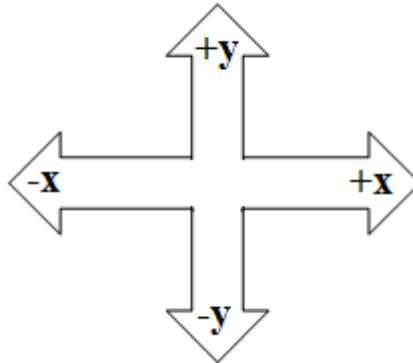


Figura 4.17 - Referência utilizada para os sentidos das forças em x e em y.

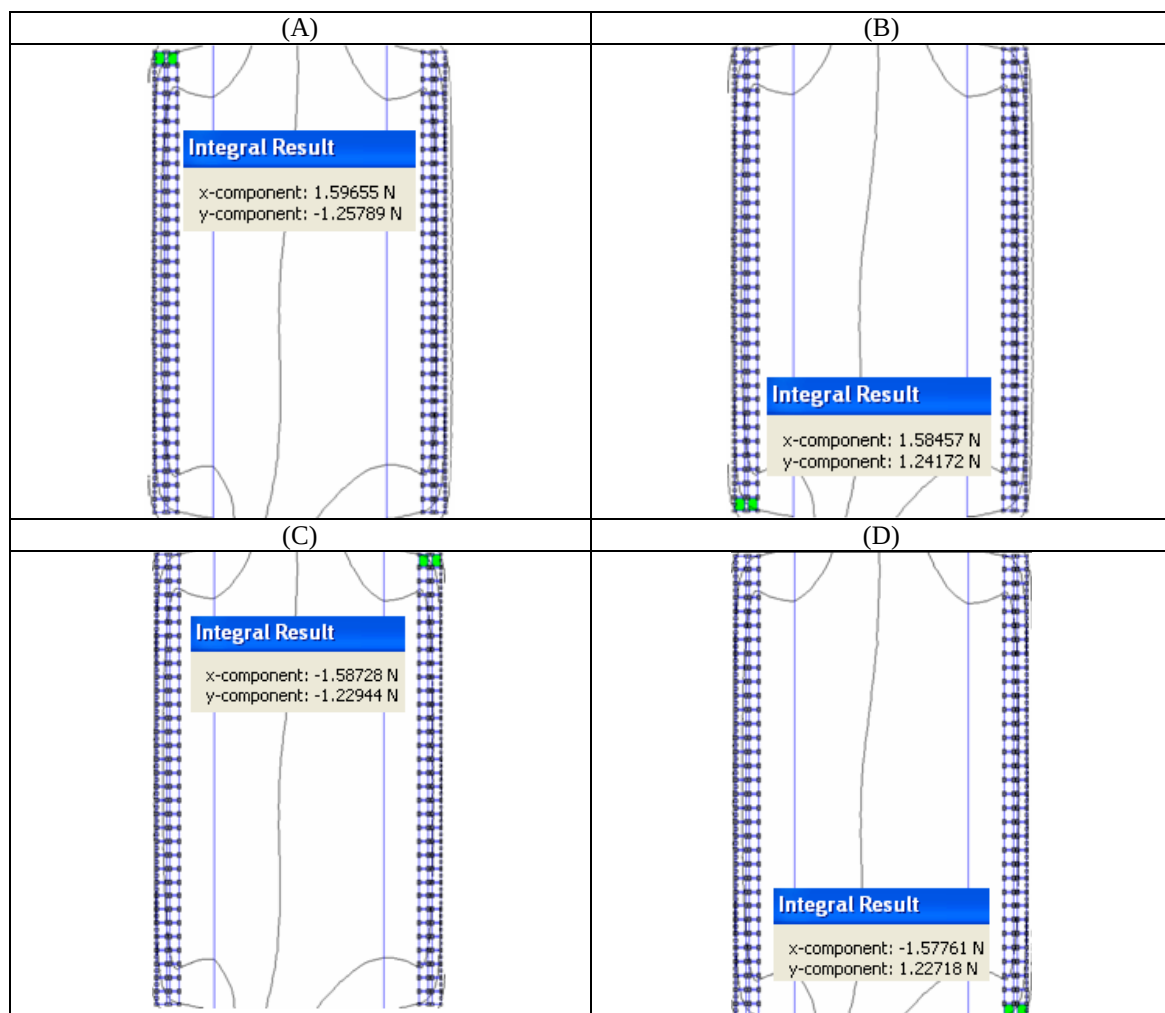


Figura 4.18 - Exemplo ilustrando a obtenção das forças pelo FEMM nas extremidades do enrolamento interno da fase B.

Ilustra-se que na Figura 4.18 (a), a qual está associada à extremidade superior do enrolamento interno ao lado esquerdo do núcleo, os valores de x e y são respectivamente positivo e negativo. Isto significa, como esperado, que existe uma compressão radial e uma compressão axial. Estes efeitos serão percebidos também nas Figuras 4.18 (b), (c) e (d). Além disso, conforme já explicado, os valores devem ser interpretados na unidade [N/mm] e não somente [N]. Caso queira estimar o valor total da força na espira em [N] deve-se realizar uma média entre os dois lados (esquerdo e direito) do enrolamento em questão, e multiplicar a força obtida pelo comprimento médio da espira.

Imagine, portanto, se extraísse os valores das forças espira por espira, para cada instante de tempo, isto demandaria bastante tempo para realizar todas as simulações. Assim, incorporando um algoritmo no *Lua scripting*, as forças para cada instante de tempo, em cada espira, em cada camada, e em cada fase podem ser obtidas em uma única simulação. Os dados processados são armazenados em arquivos “.txt”. Assim, tratando estas informações com a utilização de outro programa que possibilite geração de gráficos, pode ser obtida uma melhor visualização dos resultados gerados pelo FEMM. No caso deste trabalho, tal programa utilizado foi o MATLAB.

A seguir são apresentados os resultados referentes às forças radiais e axiais, confrontando-os, quando possível, com aqueles obtidos analiticamente.

a) Forças radiais

A Figura 4.19 apresenta a força radial distribuída por espira no enrolamento interno ao lado esquerdo e direito do núcleo. Vale ressaltar que em todos os casos que serão apresentados na sequência deste trabalho, a espira está representando a somatória das espiras nas duas camadas. Por isso, o eixo em y terá seus valores associados de 1 a 33, e não de 1 a 66. A distribuição da força radial para o enrolamento externo é mostrada na Figura 4.20.

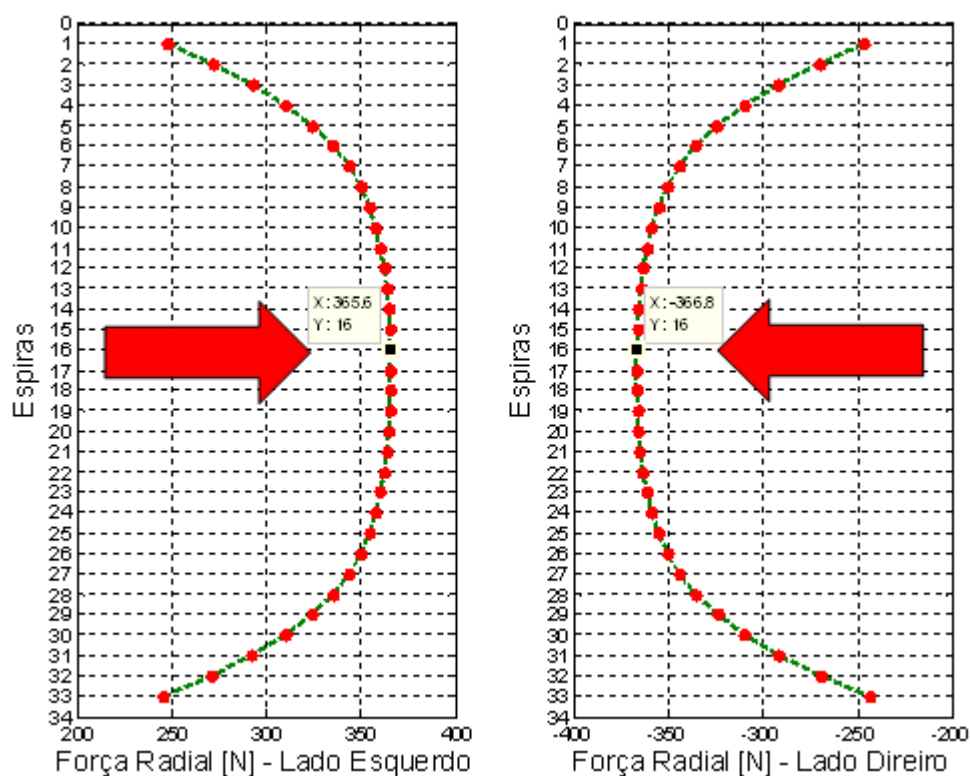


Figura 4.19 - Força radial de compressão distribuída – Enrolamento BT.

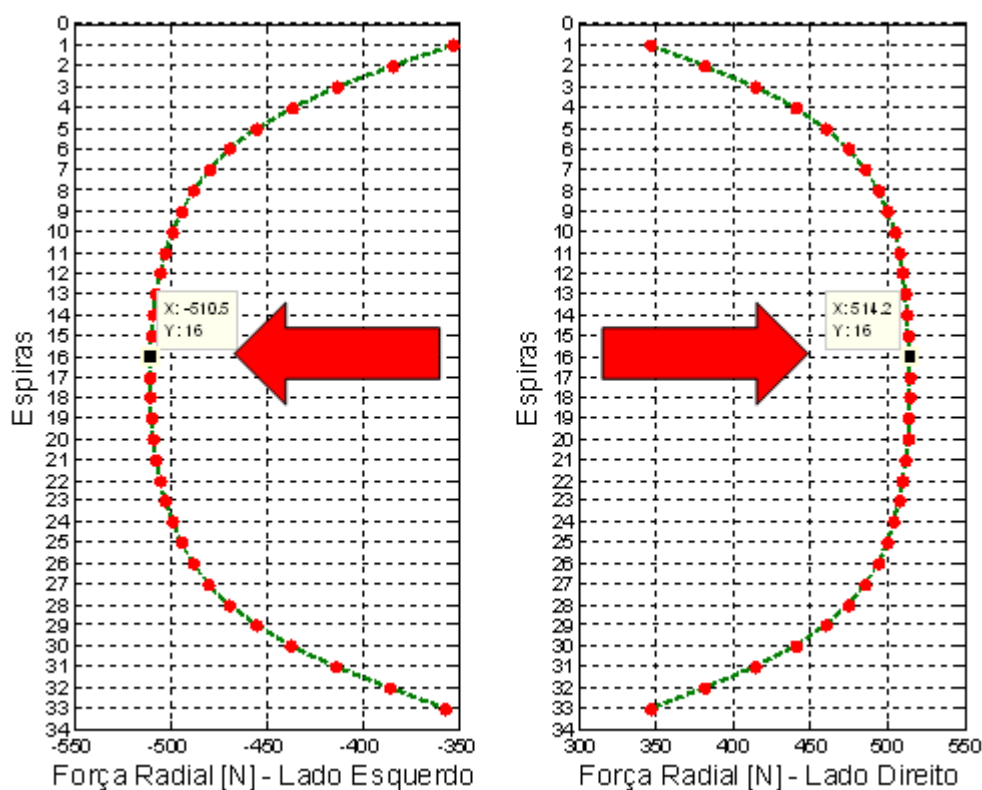


Figura 4.20 - Força radial de tração distribuída – Enrolamento AT.

Para a obtenção da força radial distribuída em [N/mm], deve-se somar a força à esquerda do núcleo em uma determinada espira com a respectiva localizada ao lado direito do núcleo, e dividir o resultado obtido pelo comprimento médio da espira. Além disso, lembra-se que a força apresentada nos gráficos está relacionada às duas camadas. Dessa forma, assumindo um comprimento médio de $(\pi \cdot 96,5\text{mm})$ das espiras no enrolamento interno e de $(\pi \cdot 141,5\text{mm})$ daquelas no enrolamento externo, pode-se estimar os valores das maiores forças radiais distribuídas de compressão e tração. Estes valores, conforme apresentado, estão localizadas nos pontos médios do enrolamento interno e externo. Assim, os resultados são fornecidos pela Tabela 4.5, os quais são comparados com os obtidos nos cálculos analíticos desenvolvidos no capítulo anterior.

Tabela 4.5 - Comparação entre simulação e metodologia analítica da força radial distribuída no enrolamento interno e externo.

Tipo de Análise	Força Radial Distribuída ($F_{rad-dist}$) [N / mm]	Força Radial Distribuída ($F_{rad-dist}$) [N / mm]
	Enrolamento Interno - BT	Enrolamento Externo - AT
Metodologia Analítica	1,19	1,19
Simulação no FEMM	1,21	1,15

Ilustra-se que os resultados são bem próximos. A estimativa dessas forças distribuídas apresenta uma grande importância, já que a partir das mesmas, estimam-se os valores dos estresses eletromecânicos.

Para a obtenção da força radial total de compressão e de tração deve-se realizar a somatória das forças radiais ao longo de cada enrolamento. Este procedimento foi aplicado para todos os instantes de tempo e os resultados estão apresentados na Figura 4.21, onde a maior força ocorre em 8,5 [ms], instante da maior corrente de curto-circuito. Deve-se comentar também, que a forma de

onda ilustrada na Figura 4.21 é semelhante às já apresentadas e analisadas teoricamente no capítulo 2.

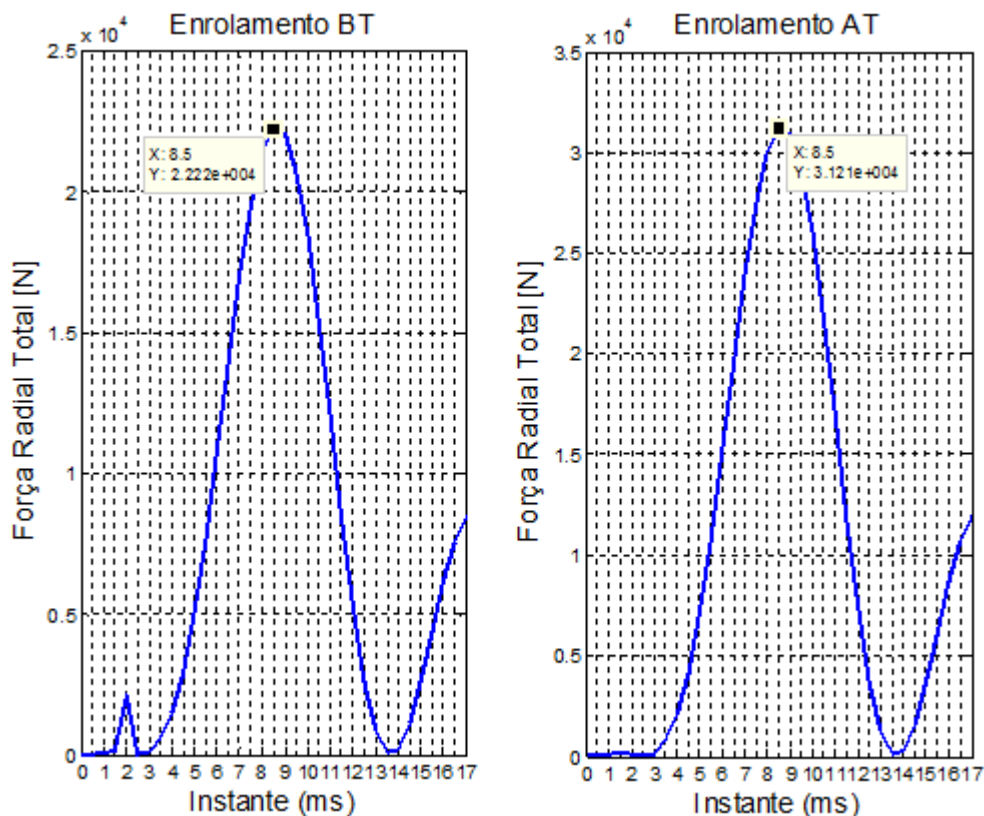


Figura 4.21 - Força radial total nos enrolamentos de BT e AT.

A Tabela 4.6 faz uma comparação da força radial total entre a simulação e os valores obtidos pela metodologia analítica. Nota-se novamente uma boa aproximação dos resultados entre os dois métodos.

Tabela 4.6 - Comparação entre simulação e metodologia analítica da força radial total no enrolamento interno e externo.

Tipo de Análise	Força Radial Total (F_r) [N]	Força Radial Total (F_r) [N]
	Enrolamento Interno - BT	Enrolamento Externo - AT
Metodologia Analítica	$23,87 \times 10^3$	$35,0 \times 10^3$
Simulação no FEMM	$22,22 \times 10^3$	$31,21 \times 10^3$

b) Forças axiais

A Figura 4.22 apresenta a força axial distribuída por espira do enrolamento interno e externo. Como esperado tem-se o efeito de compressão em ambos os enrolamentos. As maiores forças estão localizadas nas extremidades. Observa-se ainda pela simetria e pelos valores da Figura 4.22, que se somarmos as forças axiais ao longo de cada enrolamento, como foi feito para as forças radiais, teríamos um valor aproximadamente igual a zero.

Os valores dos esforços axiais nas extremidades podem ser comparados com aqueles obtidos pela metodologia analítica. Esta análise é apresentada na Tabela 4.7.

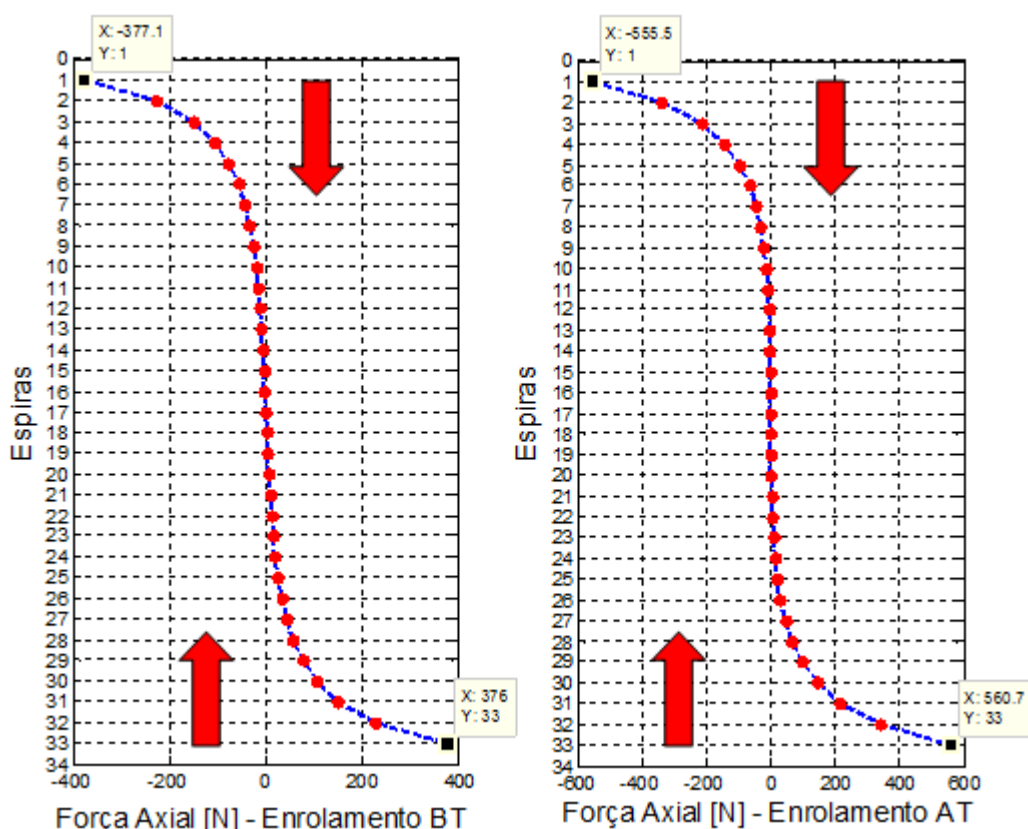


Figura 4.22 - Força axial distribuída total em ambos os enrolamentos.

Tabela 4.7 - Comparação entre simulação e metodologia analítica da força radial axial nas extremidades do enrolamento interno e externo.

Tipo de Análise	Força Axial Extremidade (F_a) [N] Enrolamento Interno - BT	Força Axial Extremidade (F_a) [N] Enrolamento Externo - AT
	Enrolamento Interno - BT	Enrolamento Externo - AT
Metodologia Analítica	$0,58 \times 10^3$	$0,58 \times 10^3$
Simulação no FEMM	$0,38 \times 10^3$	$0,56 \times 10^3$

Embora, a somatória das forças axiais se aproxima para um valor igual a zero, haverá uma força compressiva na metade de ambos os enrolamentos. Este efeito é apresentado pela Figura 4.23.

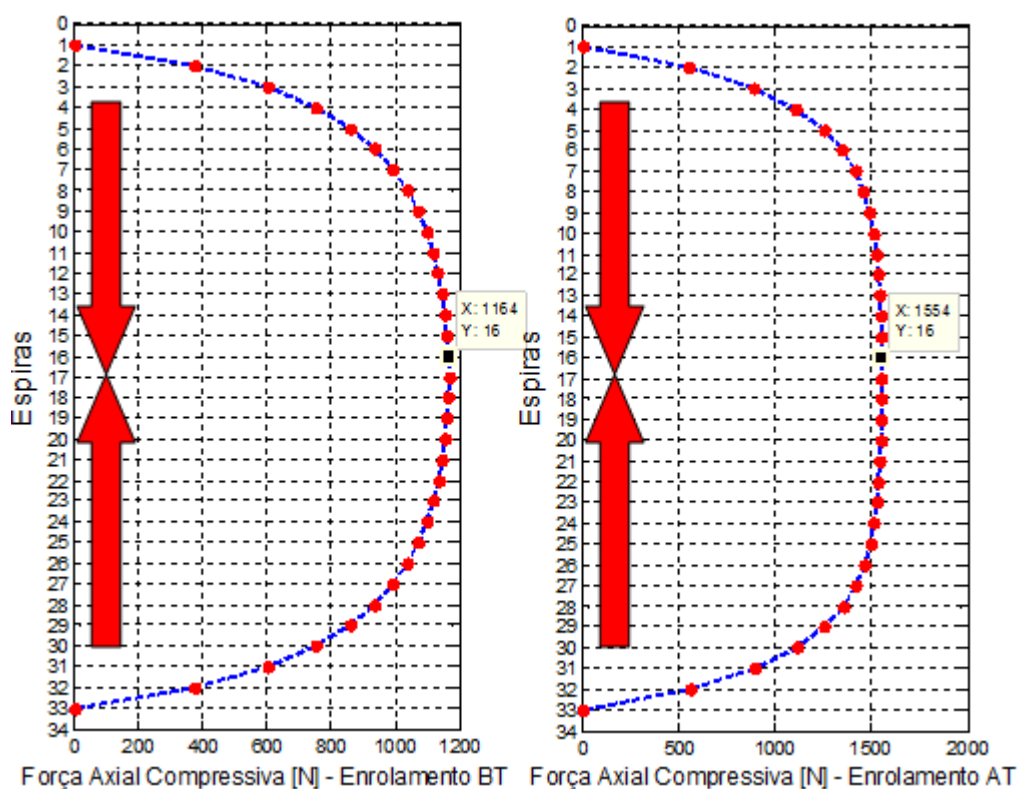


Figura 4.23 - Força axial compressiva total na metade de ambos os enrolamentos.

Os valores da força compressiva total são apresentados na Tabela 4.8 e, portanto são comparados com os obtidos pela metodologia analítica.

Tabela 4.8: Comparação entre simulação e metodologia analítica da força axial compressiva total para o enrolamento interno e externo.

Tipo de Análise	Força Compressiva Total (F_{cTotal}) [N]	Força Compressiva (F_{c-i}) [N] Enrolamento Interno - BT	Força Compressiva (F_{c-e}) [N] Enrolamento Externo – AT
Metodologia Analítica	$5,62 \times 10^3$	$3,74 \times 10^3$	$1,87 \times 10^3$
Simulação no FEMM	$5,436 \times 10^3$	$2,328 \times 10^3$	$3,108 \times 10^3$

As discrepâncias entre os resultados apresentados na Tabela 4.7 e Tabela 4.8 podem ser esclarecidos, a partir de algumas justificativas, quais sejam:

- Em relação ao método analítico, a proximidade do tanque e a presença das colunas vizinhas têm influência no cálculo das forças axiais nas extremidades dos enrolamentos. Outro aspecto decisivo é que a distribuição de fluxo nas extremidades torna-se não uniforme. Assim, não é possível um resultado preciso para essas forças. Contudo, uma aproximação razoável pode ser obtida utilizando a formulação analítica descrita pela Equação (3.12), apresentada no capítulo 3 [18];
- Nota-se que o valor total da força axial simulada, $5,436 \times 10^3$ [N], é bem próximo ao calculado, $5,62 \times 10^3$ [N]. No entanto, a divergência entre os resultados se torna elevada quando se separa a força em ambos os enrolamentos. De acordo com a referência [18] esta distribuição depende do espaço entre o enrolamento interno e o núcleo, comparado com a largura do ducto. Não obstante a esta consideração, esta mesma referência considera que para a maioria dos transformadores, aproximadamente dois terços da força total é atribuída ao enrolamento

interno e o restante ao enrolamento externo. Assim, esta proporcionalidade, foi aplicada aos cálculos analíticos. Esta estimativa resultou em elevadas diferenças entre os resultados. Isto se justifica, pois na simulação computacional notou-se uma proporção diferente na distribuição da força total. Esta consideração é ilustrada na Figura 4.24, onde se observa uma distribuição simétrica do campo de dispersão em ambos os enrolamentos;

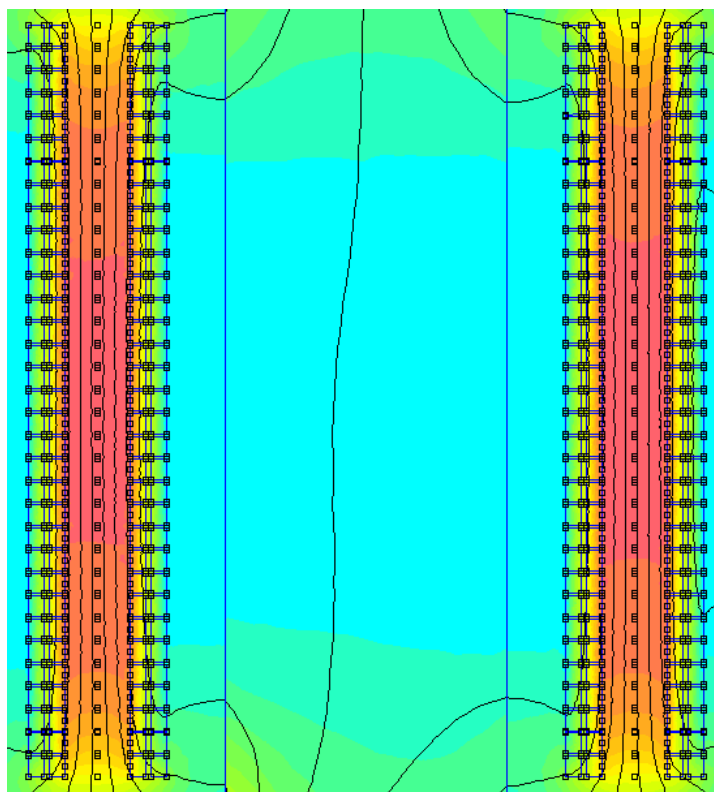


Figura 4.24 – Distribuição do fluxo magnético nos enrolamentos na situação de curto-circuito.

- Dentro deste enfoque, embora haja uma limitação nos cálculos analíticos, existe também uma limitação do programa utilizado. Diante do fato de ser uma simulação em 2D, os valores extraídos das forças estão todos na unidade [N/mm]. Desta forma, para estimar o valor total em cada espira, o valor obtido foi multiplicado pelo comprimento médio

de cada enrolamento. Neste sentido, considerou-se que a distribuição do fluxo de dispersão fosse semelhante ao longo de toda a circunferência.

Vale ressaltar que estas diferenças entre os resultados já eram de certa forma esperados, já que há uma maior complexidade para calcular as forças axiais em relação às forças radiais. Assim, as aproximações utilizadas para estimar os esforços analiticamente podem não ter resultados tão exatos, principalmente devido a não uniformidade do campo de dispersão radial, o qual é impraticável de ser considerado de forma precisa nos cálculos.

Finalmente, na seqüência deste trabalho, apresenta-se o caso 3, o qual retrata um pequeno desalinhamento entre o enrolamento interno e externo da fase B. Perceber-se-á, diferente do caso estudado nesta seção, que a força total acumulada em cada enrolamento não será mais nula.

4.4.3 Caso 3: Modelagem do transformador operando sob curto-circuito com um desalinhamento entre enrolamentos interno e externo

Para as simulações consideradas neste caso foi provocada na fase B, um desalinhamento entre o enrolamento interno e externo de 5,061[mm] equivalente a espessura axial do condutor mais a espessura da isolação entre espiras. Esta consideração pode ser identificada pela Figura 4.25. Vale ressaltar, que este é um valor apenas para exemplificar a elevação das forças devido ao desalinhamento entre enrolamentos.

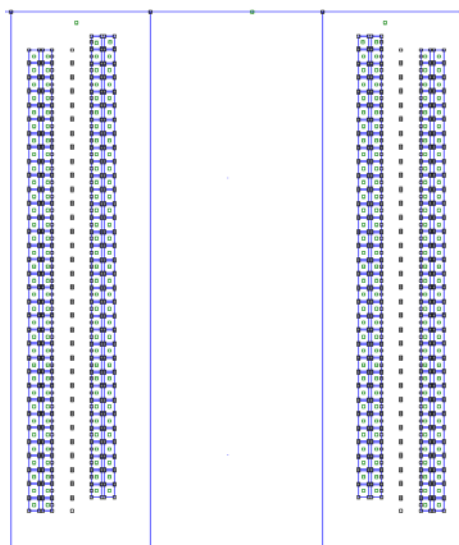


Figura 4.25 - Desalinhamento entre enrolamento interno e externo da fase B.

A magnitude da densidade de fluxo magnético de dispersão apresentada na Figura 4.26 é bem semelhante ao caso anterior. Porém, há uma mudança da distribuição deste fluxo nos enrolamentos. Nota-se que na parte inferior dos enrolamentos da fase B, há uma concentração maior de linhas na direção radial. Esta alteração na distribuição causada pelo desalinhamento provocará grandes mudanças na força axial total desenvolvida nos enrolamentos. Por outro lado, em relação aos esforços radiais poucas variações são percebidas.

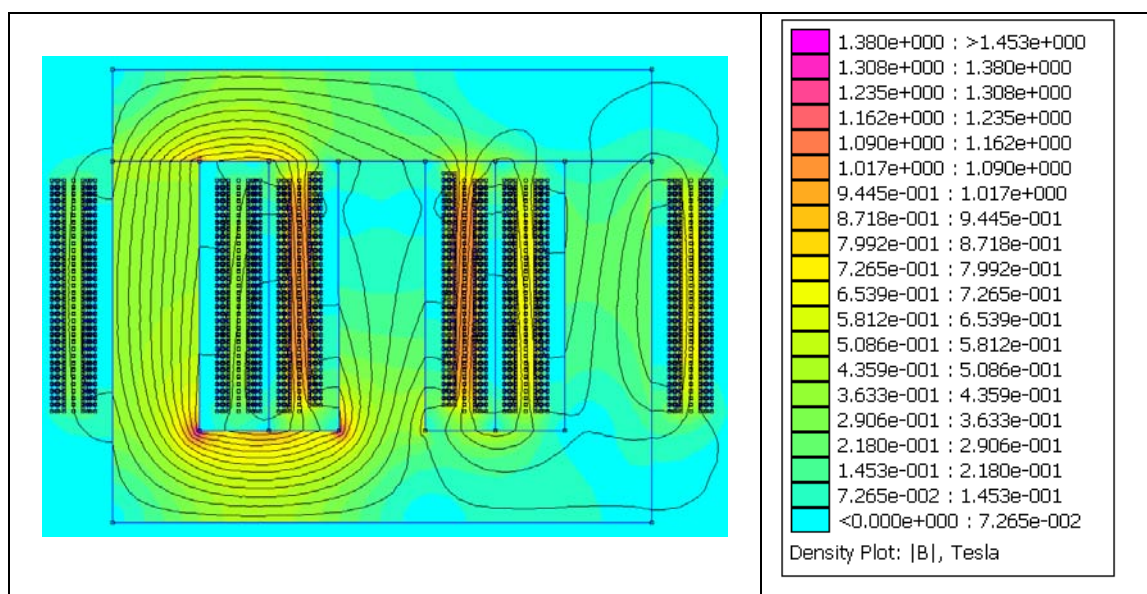


Figura 4.26 - Densidade de fluxo obtida pelo FEMM para situação de curto-circuito, com desalinhamento entre enrolamentos da fase B.

a) Forças radiais

Conforme ilustrado pela Figura 4.27 e 4.28 as forças radiais não sofreram grandes variações em seus valores com a presença do desalinhamento. A mudança que podemos notar é que houve uma assimetria na distribuição das forças radiais de tração. Observe que em relação ao caso anterior ocorreu uma pequena redução das forças na extremidade inferior do enrolamento. Contudo, esta diminuição foi compensada por um pequeno aumento dos esforços na extremidade superior. Assim, a força radial total praticamente permaneceu inalterada. Além disso, pode ser notado que foi analisado apenas o instante de 8,5 [ms], já que este instante é suficiente para avaliar as alterações em relação ao caso 4.3.2.

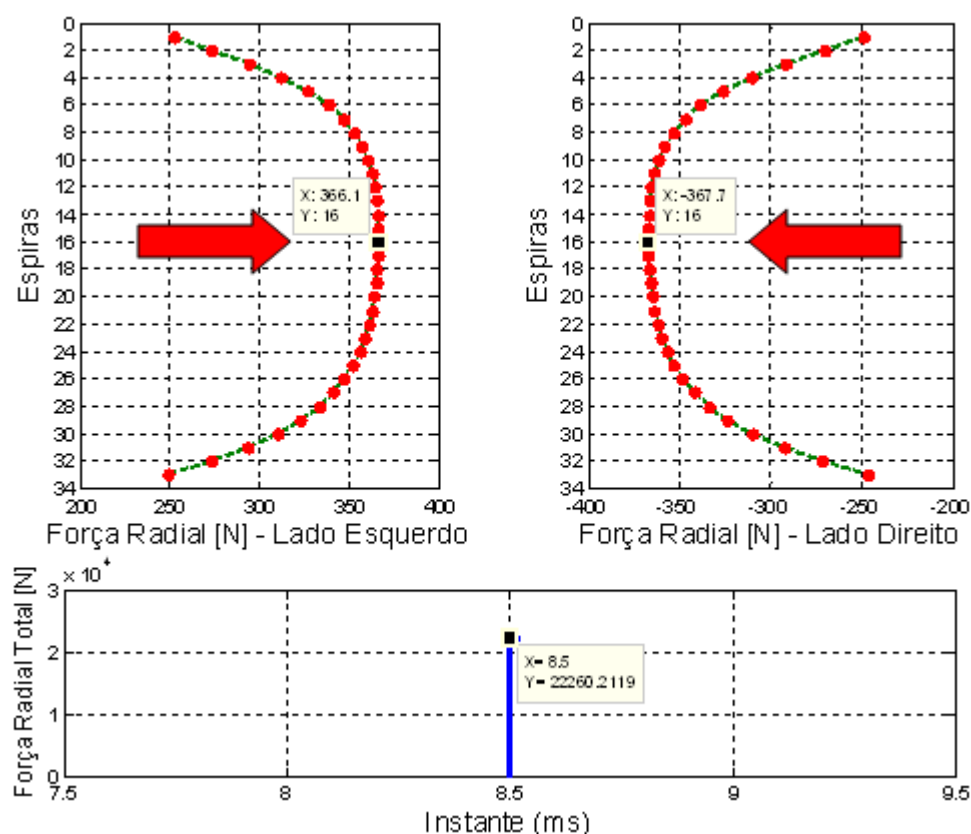


Figura 4.27 - Força Radial de Compressão – Enrolamento BT. Condição com presença de desalinhamento entre enrolamentos.

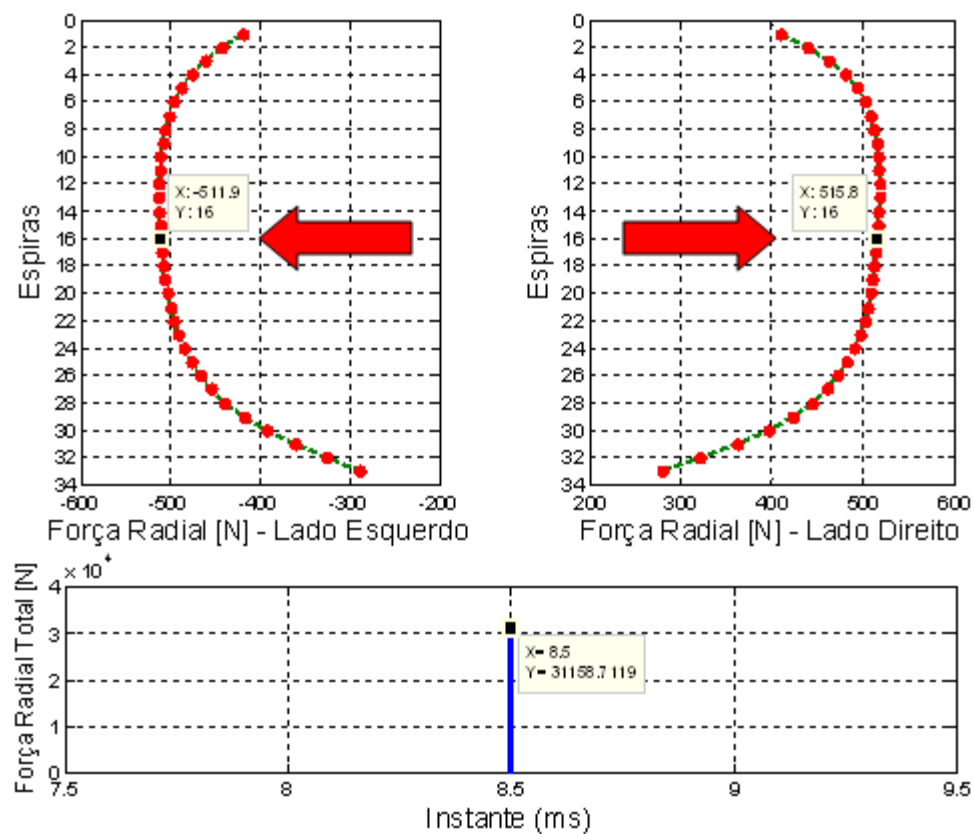


Figura 4.28 - Força Radial de Tração – Enrolamento AT. Condição com presença de desalinhamento entre enrolamentos.

b) Forças axiais

A Figura 4.29 ilustra a característica principal do efeito esperado quando existe algum desalinhamento, mesmo que pequeno, entre os enrolamentos do transformador.

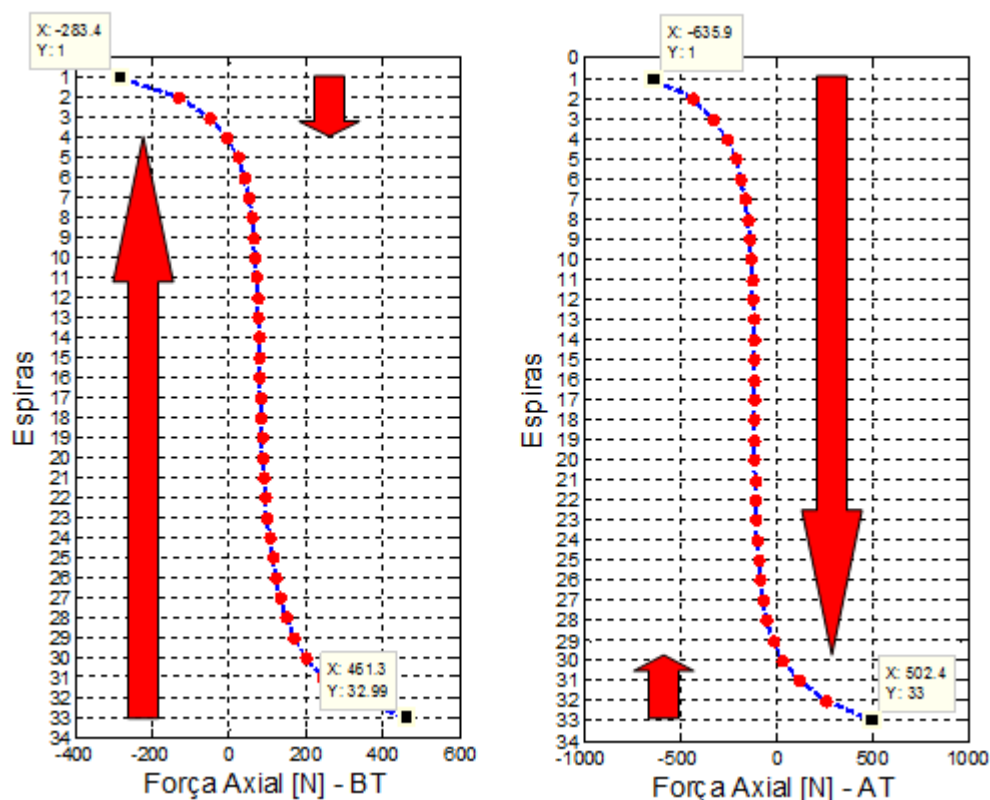


Figura 4.29 - Força axial distribuída total em ambos os enrolamentos. Condição com presença de desalinhamento entre enrolamentos.

Verifica-se que as maiores forças continuam nas extremidades. Contudo, nota-se que não há mais uma força compressiva na metade dos enrolamentos. Para o enrolamento interno, as forças positivas são mais presentes e ocorrem desde a extremidade inferior até a quarta espira. Já para o enrolamento externo, são as forças negativas que ocorrem com mais frequência, e se desenvolvem desde a extremidade superior até a trigésima espira. Assim, nesta condição operacional, ocorrerá uma força resultante, e, por conseguinte, o desalinhamento tenderá a aumentar quando forem presenciadas elevadas correntes nos enrolamentos.

A Figura 4.30 evidencia este fenômeno, onde se somando as forças ao longo de ambos os enrolamentos, chegou-se a um valor positivo acumulado de aproximadamente 3214 [N] na primeira espira do enrolamento interno e a um valor acumulado negativo de 4053 [N] na última espira do enrolamento externo.

Vale ressaltar mais uma vez que estes esforços eram praticamente nulos no caso anterior. Por isso, uma grande atenção é necessária durante o projeto do equipamento, na tentativa de manter os enrolamentos alinhados entre si.

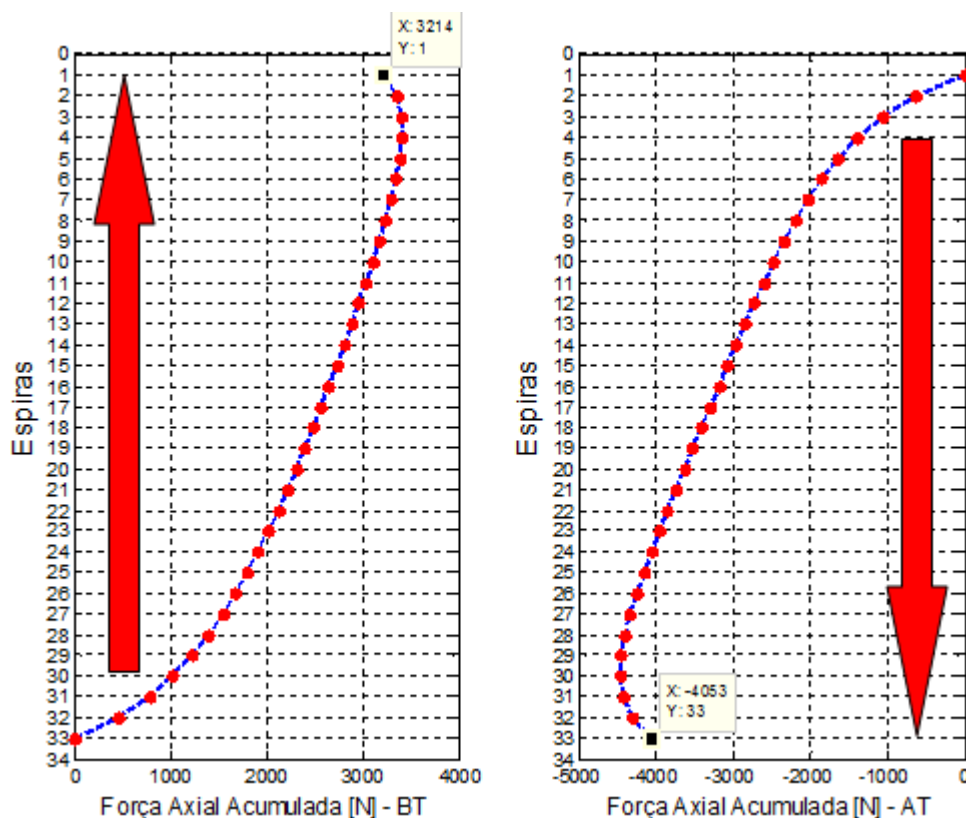


Figura 4.30 - Força axial acumulada total em ambos os enrolamentos. Condição com presença de desalinhamento entre enrolamentos.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo foi dedicado a apresentação das simulações computacionais no domínio do tempo, utilizando o programa FEMM e o programa ATP. Este pacote computacional baseia-se na técnica de elementos finitos. Algumas considerações para o entendimento básico desse programa foram apontadas.

Na sequência, foram dispostas as características física, geométrica, magnética e elétrica de um transformador trifásico de 15 kVA, 220/220 V, a serem implementadas no FEMM. Trata-se de um equipamento especial para

utilização em laboratório com características construtivas típicas de um transformador de distribuição. Trata-se de um transformador trifásico típico de distribuição com núcleo de ferromagnético de três colunas, e os seus enrolamentos interno e externo são construídos em duas camadas.

As simulações computacionais foram realizadas para três casos distintos, de forma, a avaliar a potencialidade do programa e analisar os resultados dos esforços eletromecânicos.

No primeiro caso o transformador foi modelado operando em condição normal de operação com carga indutiva. Vale ressaltar que o programa ATP foi utilizado para fornecer as correntes nominais do primário e secundário, já que o FEMM não possui alguma ferramenta que propicie a criação de um circuito elétrico externo que seja associado ao modelo do transformador. Dessa forma, as correntes devem ser impostas diretamente aos enrolamentos. Neste caso de estudo, a principal variável analisada foi a densidade de fluxo magnético. Observou-se que a maioria do fluxo se concentrou no núcleo, com valor próximo ao fornecido pelo fabricante. A presença de fluxo de dispersão nos enrolamentos foi irrelevante. Assim, o baixo valor desse fluxo associado à corrente nominal resulta em forças reduzidas. Por isso, a análise dos esforços eletromecânicos foi desconsiderada neste caso.

O segundo caso foi modelado de forma semelhante à primeira situação. Contudo, novamente fazendo uso do ATP, as correntes impostas nos circuitos foram as de curto-circuito trifásico. O maior valor da corrente de curto-circuito foi verificado na fase B, portanto os esforços foram analisados somente nesta fase. Vale ressaltar que a geometria dos enrolamentos foi construída espira por espira e não representada como sendo somente um único condutor. Esta estratégia de modelagem foi empregada, pois havia interesse em analisar os esforços de forma distribuída em cada espira. Diante deste fato, a fase de processamento neste caso utilizou-se da ferramenta *Lua scripting* do FEMM, a

qual possibilita otimizar a solução do problema. Os resultados extraídos foram tratados pelo programa MATLAB, permitindo que fossem gerados gráficos e conseqüentemente fornecendo uma melhor compreensão dos valores obtidos pelo FEMM. Os resultados foram comparados com aqueles decorrentes da metodologia analítica aplicada no capítulo 3. Verificou-se uma boa proximidade entre a simulação e os cálculos analíticos para os esforços radiais. As maiores divergências nos resultados foram para forças axiais na extremidade do enrolamento interno e das forças axiais compressivas em ambos os enrolamentos.

Vale ressaltar que não foram apresentadas as estimativas dos estresses eletromecânicos. Isto se justifica, pois os cálculos já foram realizados no capítulo 3.

Por fim, um terceiro caso foi simulado, onde novamente as correntes de curto-circuito foram impostas, apresentando os mesmos valores do segundo caso. A diferença desse estudo em relação ao anterior é que foi provocado um pequeno desalinhamento, de aproximadamente 5 [mm], entre os enrolamentos. Diante desse fato, verificou, conforme já esperado, que as forças axiais totais produzidas nos enrolamentos foram opostas entre si e, portanto, tendem a aumentar o deslocamento. Este caso evidencia a atenção em que os fabricantes devem considerar durante a fase de projeto do transformador, com o propósito dentro do possível, em manter os enrolamentos alinhados entre si.

Diante dos resultados obtidos, observa-se que o trabalho desenvolvido nesta dissertação tem colaborado para a criação de uma base inicial para investigação dos esforços eletromecânicos, tanto em relação ao modelo computacional utilizando-se a técnica de elementos finitos, quanto à metodologia analítica proposta no capítulo anterior.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES GERAIS

Quando se falam de falhas em transformadores imaginam-se aquelas associadas principalmente aos efeitos térmicos, dielétricos e químicos. Contudo algumas pesquisas vêm mostrando que há um número elevado de falhas correlacionados aos fenômenos eletromecânicos, e ainda existem as falhas que por limitação de conhecimento de pesquisadores não se sabe suas origens.

Assim, este trabalho foi desenvolvido no sentido de entender melhor os fenômenos físicos que propiciam as falhas mecânicas e tem como um dos seus pilares o Projeto Chesf de P&D “Estresse Eletromecânico em Transformadores Causados por Altas Correntes de Energização (*Inrush*) e de Curtos-circuitos “Passantes”” - (Estresse-Din-Trafo), gerenciado pela Chesf, e desenvolvido com o apoio da Universidade Federal de Uberlândia e Universidade Federal de Campina Grande.

Inicialmente, o capítulo 1 apresentou os principais objetivos deste trabalho, retratando através de alguns gráficos a grande importância em desenvolver novas pesquisas relacionadas a falhas mecânicas em transformadores. Este capítulo trouxe ainda um estado da arte diferenciado, onde foram resumidas as principais referências e foram separadas em normas e recomendações; teses e dissertações; livros e artigos técnicos. Entende-se que

essas citações fornecem uma base bem sólida para uma boa compreensão dos fenômenos eletromecânicos em transformadores.

Dentre as recomendações identificadas, destaca-se aquela apresentada em [1]. Esta referência aborda alguns métodos para calcular as forças eletromagnéticas radiais e axiais e o estresse mecânico em função da geometria do enrolamento do transformador.

Embora se reconheça a existência de diversos livros específicos que se dedicam ao estudo de transformadores com relação aos seus aspectos gerais, tais como: projeto, construção, especificação, ensaios, etc., optou-se pela inserção das obras consideradas de maior relevância no meio acadêmico e científico e, sobretudo buscou-se dar maior ênfase às obras relacionadas mais diretamente ao tema do trabalho. Dentre essas obras pode-se destacar a referência [18], a qual se dedica especificamente ao estudo do comportamento dos transformadores sujeitos aos curtos-circuitos. Não obstante, a referência apresenta um método analítico utilizado para calcular as forças eletromagnéticas e os estresses produzidos nos enrolamentos dos transformadores com enrolamentos concêntricos. Esse método analítico é citado em diversas outras referências, tais como [19, 30, 31, 32].

Dentre as teses e dissertações citadas, aquela apresentada em [2] merece um grau de importância maior em relação às outras. Pois, os avanços desenvolvidos neste trabalho quanto às formulações analíticas e quanto à modelagem em elementos finitos, foram baseadas nos estudos elaborados nesta referência.

Por fim, o estado da arte fornece uma gama de artigos técnicos relacionados às falhas gerais em transformadores, e às características das forças e estresses eletromecânicos.

Devido à importância de entender melhor o processo de falhas em transformadores de potência, foram apresentadas pesquisas e relatos

relacionados à maioria dos problemas que ocorrem nos transformadores. Basicamente, as falhas são de origem dielétrica, térmica, mecânica e química. Neste sentido, o capítulo 2 apresentou diversos tipos de falhas relacionadas aos principais componentes do transformador. Algumas pesquisas, onde foram analisadas as falhas em transformadores, evidenciam a grande importância na realização de boas manutenções dos transformadores a fim de evitar maiores desastres. Outro assunto tratado neste capítulo foi a vida útil do transformador. Há quem realiza a estimativa de vida útil do equipamento através das formulações de Arrhenius, as quais consideram somente os efeitos térmicos. Outras linhas de pesquisas fazem ainda associações com a vida útil do papel isolante utilizado. Estes estudos conseguem fornecer uma referência para o tempo de duração do transformador, contudo na utilização dessas formulações, deve-se atentar que nem todas as solicitações são consideradas. Assim o transformador pode chegar ao final de sua operação antes do previsto, o que poderá implicar, além dos aspectos de segurança, um impacto econômico às instalações elétricas, devido à desativação não programada do equipamento. Por isso, torna-se fundamental o desenvolvimento ou aperfeiçoamento de técnicas de monitoramento, as quais de alguma forma consigam avaliar o estado de “saúde” do transformador.

Após descrever as falhas gerais e destacar a importância de avaliar os diversos efeitos possíveis nos transformadores, este capítulo fez uma caracterização das falhas eletromecânicas. Assim, inicialmente foram abordadas algumas propriedades da corrente de curto-circuito, que associadas às componentes de fluxo de dispersão, é um dos principais fenômenos causadores dos esforços eletromecânicos.

As principais forças que atuam nos enrolamentos são as radiais e axiais. As forças radiais originadas pela componente de campo agindo axialmente produzem estresse de compressão no enrolamento interno e estresse de tração no

externo. Além disso, os principais tipos de falhas associadas a este tipo de esforço desenvolvem-se no enrolamento interno, podendo este curvar-se de forma livre (*free buckling*) ou de forma forçada (*forced buckling*). Este último ocorre quando a curvatura acontece entre espaçadores. As forças axiais originadas pela componente de campo agindo radialmente tende a comprimir ambos os enrolamentos, podendo causar inclinação nos condutores (*tilting*) e flexão desses quando estão entre espaçadores (*bending*).

No capítulo 3 os esforços continuaram sendo caracterizados, porém de forma analítica. Verificou-se que as forças radiais podem ser calculadas com uso de metodologias analíticas simples, enquanto que para as forças axiais foi descrito o método do ampère-espira residual, que é utilizado para calcular de forma aproximada as forças axiais. Complementarmente, foram também apresentadas as expressões que estimam os estresses eletromecânicos em transformadores.

A metodologia descrita foi exemplificada através de dois transformadores, ambos trifásicos, um com potência de 5 MVA e outro de 15kVA. O primeiro trata-se de um modelo mais complexo, com tapes, e um dos enrolamentos sendo do tipo disco. Já o segundo trata-se de um modelo mais simples, com relação de espiras de um para um e ambos os enrolamentos do tipo camada. Assim, a dificuldade dos cálculos variou conforme a complexidade da geometria dos transformadores. Estes exemplos serviram para mostrar a metodologia analítica desenvolvida. Desta forma, ilustrou quão elevadas são as forças que ocorrem nos enrolamentos. Além disso, verificou-se que é fundamental que os limites de suportabilidade dos estresses eletromecânicos dos condutores sejam fornecidos pelos fabricantes de forma a comparar com os obtidos analiticamente.

Diante da disponibilidade de todos os dados mecânicos, geométricos, magnéticos e elétricos do transformador trifásico de 15 kVA, o mesmo foi

utilizado na modelagem computacional apresentada no capítulo 4. A modelagem baseou-se no método dos elementos finitos, a qual possibilitou extrair os esforços eletromecânicos produzidos nos enrolamentos quando submetidos a um curto-circuito trifásico, comparando-os com aqueles fornecidos pela metodologia analítica. O programa utilizado para este fim foi o FEMM, que sendo um programa livre proporciona um completo conjunto de ferramentas para resolver problemas em duas dimensões. Contudo, sua desvantagem é que o modelo criado não pode ser conectado a um circuito elétrico externo. Assim, os valores das correntes elétricas foram gerados pelo programa ATP e impostas ao FEM.

Além disso, o MATLAB também foi utilizado de forma a tratar os resultados obtidos no FEMM. Neste sentido, foram desenvolvidos gráficos que possibilitassem uma melhor compreensão dos esforços.

Deve-se lembrar que durante a modelagem em elementos finitos, o enrolamento foi considerado espira por espira e não somente representado como um único condutor. Este artifício propiciou que as forças fossem analisadas individualmente em cada espira, e, portanto foi possível avaliar as características peculiares das forças radiais e axiais ao longo de todo o enrolamento.

As simulações no FEMM foram realizadas para três casos distintos. Inicialmente foi analisado o transformador em condição nominal, onde se pôde visualizar a densidade de campo magnético produzida no núcleo do transformador. A magnitude da densidade magnética obtida pelo programa está de acordo com a fornecida pelo fabricante. Além disso, nota-se que em situação normal de operação, o fluxo de dispersão nos enrolamentos é bem reduzido. Desta forma, associado com a baixa corrente no enrolamento, os esforços são pequenos. Por isso, estes não foram analisados na condição nominal de operação.

O segundo caso estudado foi com o transformador submetido a um curto-circuito trifásico. A distribuição da densidade de fluxo magnético para esta condição foi contrária à situação nominal. Verificou-se um baixo valor da densidade no núcleo e um elevado valor do fluxo de dispersão, principalmente no enrolamento da fase B, visto que na simulação realizada no ATP a maior corrente de curto-circuito ocorreu nesta fase. Portanto, os esforços foram analisados apenas na coluna do meio.

Esta situação operacional serviu ainda para constatar tudo aquilo que havia sido reportado nos capítulos anteriores. Ou seja, foi ilustrado que as maiores forças radiais se encontram no ponto médio de ambos os enrolamentos, e que elas serão de compressão no enrolamento externo e de tração no interno. Além do mais, notou-se que as maiores forças axiais se encontram nas extremidades dos enrolamentos, e provocam efeito de compressão.

Comparando-se os resultados obtidos nas simulações com aqueles oriundos dos cálculos analíticos, pode-se observar que os resultados foram satisfatórios para as forças radiais. Em relação aos valores obtidos associados às forças axiais, estas discrepâncias foram maiores, devido à não uniformidade do fluxo de dispersão nas extremidades dos enrolamentos.

Por fim, foi simulado um terceiro caso, com o transformador também sob um curto-circuito trifásico, porém, foi provocado um desalinhamento entre o enrolamento interno e externo. Não se verificou grande variação quanto às forças radiais. Por outro lado, em relação aos esforços axiais ocorreu o esperado, ou seja, uma tendência de aumento do desalinhamento. Isto pode ser justificado, pois as forças axiais acumuladas em cada enrolamento serão diferentes de zero e opostas entre si.

Assim, embora haja limitações, ambos os métodos podem servir como base em projeto de transformadores, a fim de que estes equipamentos sejam

capazes de suportar os esforços eletromecânicos decorrentes das correntes de curto-circuito.

No entanto, mesmo com os transformadores sendo bem projetados, tem-se percebido a ocorrência de um grande número de falhas. Em termos de projeto, por exemplo, não se sabe quantos curtos-circuitos o equipamento é capaz de suportar sem que o seu enrolamento seja danificado. Além disso, os esforços produzidos pela corrente de curto-circuito podem não ser suficientes para causar as falhas eletromecânicas, porém, podem colaborar para a ocorrência de outros tipos de falhas.

Atualmente, diante das dificuldades impostas pela regulamentação do setor elétrico brasileiro, torna-se praticamente antieconômico a retirada de operação de transformadores para se testar/investigar possíveis deformações nos enrolamentos, antes que elas causem danos de grandes proporções no equipamento. Assim, torna-se imprescindível desenvolver metodologias, ensaios e critérios para acompanhar a vida útil dos transformadores em operação, principalmente as unidades mais antigas e assim possibilitar um diagnóstico preciso em relação ao seu envelhecimento.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como fechamento desta dissertação, e tendo em vista a relevância e o vasto campo de investigações que permeiam o tema ora abordado, apresentam-se algumas sugestões para um maior aprofundamento, ou seja:

- Efetuar um estudo que possibilite avaliar o número de curtos-circuitos suportáveis por um transformador. Esta análise está associada à avaliação do estresse admissível do condutor utilizado no enrolamento do equipamento. O valor deste estresse limite pode tornar-se menor a

cada curto-circuito “passante” nos enrolamentos, reduzindo, portanto a vida útil do transformador;

- Investigar técnicas especiais para o monitoramento e avaliação das condições mecânicas do enrolamento de um transformador;
- Avaliar a validade da metodologia analítica para transformadores de maior potência;
- Estender a metodologia analítica para transformadores de três ou mais enrolamentos, bem como analisar a influência e/ou conseqüências deste estudo;
- Efetuar um estudo de como o envelhecimento pode afetar a suportabilidade mecânica dos materiais utilizados nos enrolamentos do transformador;
- Otimizar a metodologia analítica apresentada nesta dissertação, a fim de verificar a possibilidade de utilizá-la de forma incorporada em métodos de monitoração da operação de transformadores;
- Investigar em transformadores de potência diferentes, os parâmetros necessários para calcular os estresses eletromecânicos devido a uma corrente de curto-circuito, conforme apresentado no Anexo 2. Desta forma, será verificada a necessidade de acrescentar novas variáveis para o cálculo dos esforços eletromecânicos nestes equipamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - CIGRE, Working Group 12.19, **The Short Circuit Performance of Power Transformers**. Brochure 209, CIGRE, 2002.
- [2] - AZEVEDO, A. C., **Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado por Curtos-Circuitos “Passantes” e Correntes de Energização**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Fevereiro de 2007.
- [3] - MEDINA P., M. C., **Falhas em Transformadores de Potência: Uma Contribuição para Análises, Definições, Causas e Soluções**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2003.
- [4] - CIGRE, Groupe du Travail 12.05, **Enquête Internationale sur les Défaillances en Service des Transformateurs de Grande Puissance**. ELECTRA, No. 88, 1983.
- [5] - WANG, M., VANDERMAAR, A. J., SRIVASTAVA, K. D., **Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service**. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.18, No.6, November/December, 2002.
- [6] - DROBYSHEVSKI, A., LEVITSKAYA, E., LURIE, A., PANIBRATETS, A., **Combined Assessment of Transformer Winding Mechanical Condition – Important Step to Enhancement of Transformer Reliability**. A2-109, CIGRE, 2006.
- [7] - BARTLEY P. E., W. H., **Analysis of Transformer Failures**. International Association of Engineering Insurers, 36th Annual Conference, Stockholm, 2003.
- [8] - PREVOST, T. A., **Transformer Fleet Health and Risk Assessment**. IEEE PES Transformers Committee Tutorial, Dallas Texas, March 2007.

- [9] - FRANZEN, A., KARLSSON, S., **Failure Modes and Effects Analysis of Transformers**. Royal Institute of Technology, KTH, School of Electrical Engineering, Stockholm, January 2007.
- [10] - DOBLE, **The Life of a Transformer**. Seminar and Industry Expo., Florida, February 19-25, 2006.
- [11] - BECHARA, R., BRANDÃO Jr., **Análise de Falhas em Transformadores de Potência e seus Mecanismos de Ocorrência**. XIII ERIAC – Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré, Puerto Iguazú, Argentina, Maio, 2009.
- [12] - LAPWORTH, J. A., **Transformer Reliability Surveys**. A2-114, CIGRE, 2006.
- [13] - BOSS, P., HORST, T., LORIN, P., PFAMMATTER, K., FAZLAGIC, A., PERKINS, M., **Life assessment of Power Transformers to Prepare a Rehabilitation Based on a Technical-Economical Analysis**. Session 12-106, CIGRE, 2002.
- [14] - CIGRE, Working Group A2.18, **Life Management Techniques for Power Transformer**. Brochure 227, CIGRE, 2003.
- [15] - FOLDI, J., BERUBE, D., RIFFON, P., BERTAGNOLLI, G., MAGGI, R., **Recent Achievements in Performing Short-Circuit Withstand Tests on Large Power Transformers in Canada**. Session 12-201, CIGRE, 2000.
- [16] - AZEVEDO, A. C., DELAIBA, A. C., OLIVEIRA, J. C., CARVALHO, B. C., BRONZEADO, H. S., **Transformer Mechanical Stress Caused by External Short-circuit: a Time Domain Approach**. 7th International Conference on Power Systems Transients, France, June/2007.
- [17] - ABB, **Transformer Handbook**. Copyright IEC, Geneva, ABB, 2004.
- [18] - WATERS, M., **The Short-Circuit Strength of Power Transformers**. Macdonald & Co., London, 1966.

- [19] - E. BILLIG, E., **Mechanical Stresses in Transformers Windings**. Electrical Engineers - Part II: Power Engineering, Journal of the Institution, Vol.93, pages 227-243, June 1946.
- [20] - DELAIBA, A. C., **Análise dos Efeitos Térmicos e Dinâmicos Provocados pela Corrente de Curto-Circuito**. Apostila de Subestações, Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- [21] - Working group members of the Power System Analysis Subcommittee of the Power Systems Engineering Committee of the IEEE Industry Applications Society, **IEEE Recommended Practice for Calculating Short Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems**. IEEE Violet Book Std. 551, 2006.
- [22] - P-IEC 60076-5 {Ed.3.0}., **Power transformers - Part 5: Ability to Withstand Short Circuit**. International Electrotechnical Commission.
- [23] - NBR 5356-5, **Transformadores de Potência – Parte 5: Capacidade de Resistir a Curtos-Circuitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, NBR 5356, 1993.
- [24] - Transformers Committee of the IEEE Power Engineering Society, **IEEE Standard for Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers**. IEEE Std C57.12.00, 2006.
- [25] - Transformers Committee of the IEEE Power Engineering Society, **IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers**. IEEE Std C57.12.90, 2006.
- [26] - AGUIAR, E. R., **Análise de Resposta em Frequência Aplicada em Transformadores de Potência**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2007.

- [27] - MCNUTT, W. J., JOHNSON, W. M., NELSON, R. A., AYERS, R. E., **Power Transformer Short-circuit Strength – Requirements, Design and Demonstration.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-89, nº8, p.p. 1955-1969, December 1970.
- [28] - BJERKAN, E., **High Frequency Modeling of Power Transformers.** Doctor Thesis, Norwegian University of Science and Tecnology, 2005.
- [29] - KULKARNI, S. V., KHAPARDE, S. A., **Transformer Engineering: Design and Practice.** Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [30] - WATERS, M., **The Measurement and Calculation of Axial Electromagnetic Forces in Concentric Transformer Windings.** Proceedings IEE, 101, Pt. II, pp. 35-46, February 1954.
- [31] - ASLAM MINHAS, M. S., **Dynamic Behaviour of Transformer Winding under Short-Circuits.** PhD Thesis, Faculty of Engineering, University of the Witwatersrand, November 2007.
- [32] - HEATHCOTE, M., **J & P Transformer Book.** Butterworth-Heinemann Ltd. Great Britain, twelfth edition, 1998.
- [33] - PATEL, M. R., **Instability of the Continuously Transposed Cable Under Axial Short Circuit Forces in Transformers.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.17, No.1, 2002.
- [34] - CORCORAN, R. J., PALMER, S., **Mechanical Properties of Copper in Relation to Power-Transformer Design.** IEEE Power Engineering Journal, Vol.1, pp. 154-157, 1987.
- [35] - NORRIS, E. T., **Mechanical Strength of Power Transformers in Service.** Proceedings of the IEE - Part A: Power Engineering, Vol.104, pp. 289 – 300, 1957.

- [36] - CARDOSO, J. R., **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. Publicação Independente, Primeira Edição, São Paulo, 1995.
- [37] - BASTOS, J. P. A., SADOWSKI, N., **Electromagnetic by Modeling by Finite Element Methods**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, Marcel Dekker, 2003.
- [38] - SARAIVA, E., **Modelagem de Transformadores de Três Colunas com Base na Distribuição de Fluxos Magnéticos no Núcleo, Considerando o Efeito do Ciclo de Histerese**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, 2004.

ANEXOS

ANEXO 1 - VOCABULÁRIO

A seguir, são apresentados conceitos de alguns termos usados ao longo deste trabalho, a fim de evitar confusões e ambigüidades ao leitor. As definições dos termos foram baseadas na referência [14].

- ***Falha:***

Qualquer situação, a qual requer que o equipamento seja retirado de operação para investigação, aplicação de medidas corretivas ou substituição.

- ***Falta:***

Qualquer deterioração além do envelhecimento ou desgaste natural do equipamento.

Observação:

1. Uma falta resulta de alguma deterioração não reversível;
2. Uma falta pode impactar na confiabilidade do equipamento em curto prazo.

Por exemplo, um ponto quente (*hotspot*) causando um excessivo envelhecimento da isolação seria considerado uma falta. Porém o mesmo conceito não pode ser aplicado com o envelhecimento da isolação em consequência da operação normal do equipamento.

Vale ressaltar ainda que uma falta pode ocorrer sem ocorrência de uma falha e vice-e-versa.

- **Defeito:**

Qualquer não conformidade à condição normal do equipamento, o qual requer a aplicação de uma investigação ou medida corretiva.

Observe que a definição de “*Imperfeição ou perda parcial de desempenho, a qual pode ser corrigida sem retirar o transformador de serviço*” é uma derivação do conceito citado acima e é equivalente a um defeito sem falha.

Na tentativa de ilustrar as diferenças entre as definições propostas de falha, falta e defeito, o seguinte exemplo é fornecido:

Se um resultado anormal de uma análise de gás dissolvido (*Dissolved Gas Analysis – DGA*) fosse obtido de um transformador, então este resultado poderia ser classificado como um defeito, já que uma futura investigação do equipamento seria garantida. Se o resultado do DGA fosse subseqüentemente determinado como causa de uma deterioração anormal dentro do transformador, então o defeito seria também uma falta. Por fim, se o transformador tivesse que ser retirado de serviço para investigar o resultado do DGA, então ter-se-ia também uma falha.

- ***Confiabilidade:***

A probabilidade que o equipamento irá permanecer em serviço sem a ocorrência de uma falha.

- ***Fim da Vida Útil:***

Situação na qual o transformador não deveria mais permanecer em serviço por causa da ocorrência de uma falha ou possibilidade de falha, onde não há viabilidade econômica para reparo.

Observação:

1. Em geral, existem três fatores que determinam o final da vida útil do transformador, são eles: fator econômico, fator estratégico e fator técnico.

- ***Modo de Falha:***

Descrição de uma falha, a qual ilustra o que de fato aconteceu quando ocorreu uma falha.

- ***Mecanismo de Falha:***

Descrição do processo físico, o qual leva a uma falha.

- ***Causa de Falha:***

As circunstâncias durante projeto, fabricação ou aplicação que levam a uma falha.

- ***Condição:***

Uma expressão do estado de “saúde” de um equipamento que leva em consideração seu tempo de operação, bem como qualquer falta inerente.

- ***Curto-Circuito “Passante”:***

Evento anormal no sistema, externo ao equipamento, o qual causa elevadas correntes de falta percorrendo os enrolamentos do transformador.

Observação:

1. O significado de falta neste caso não está relacionado ao conceito já citado neste vocabulário, e sim a um termo comumente usado para descrever um evento de curto-circuito.

ANEXO 2 – PARÂMETROS PARA ESTIMAR OS ESFORÇOS ELETROMECAÂNICOS

A seguir, são apresentados alguns parâmetros que podem auxiliar projetistas e pesquisadores em dados de projetos a serem solicitados aos fabricantes para avaliar as solicitações eletromecânicas nos enrolamentos dos transformadores devido à corrente de curto-circuito. Este Anexo é uma das grandes contribuições decorrente desta dissertação.

1. $S_{3\phi}$ = Potência trifásica do transformador (MVA);
2. $Z\%$ = Impedância percentual do transformador;
3. f = Frequência fundamental da rede (Hz);
4. V_{L-i} = Tensão eficaz nominal de linha do enrolamento interno (kV);
Configuração: Delta ou Estrela.
5. V_{L-e} = Tensão nominal de linha do enrolamento externo (kV);
Configuração: Delta ou Estrela.
6. n_i = Número de espiras do enrolamento interno para condição normal de funcionamento;
7. n_e = Número de espiras do enrolamento externo para condição normal de funcionamento;
8. Tipo do enrolamento interno: Tipo Camada ou Disco
9. Tipo do enrolamento externo: Tipo Camada ou Disco
10. Caso o enrolamento seja do tipo disco: k_m = Quantidade média de condutores em cada disco;
11. Caso enrolamento seja do tipo camada: C = Número de camadas no enrolamento;

12. d_0 = Largura da camada adjacente ao canal principal entre os enrolamentos do transformador (m);
13. d_i = Largura do enrolamento interno (m);
14. d_e = Largura do enrolamento externo (m);
15. h = Altura do enrolamento interno ou externo (m);
16. D_{m-i} = Diâmetro médio do enrolamento interno (m);
17. D_{m-e} = Diâmetro médio do enrolamento externo (m);
18. a_{c-i} = área do condutor do enrolamento interno (m²);
19. a_{c-e} = área do condutor do enrolamento externo (m²);
20. b_i = Dimensão axial do condutor do enrolamento interno (m);
21. b_e = Dimensão axial do condutor do enrolamento externo (m);
22. e_i = Dimensão radial do condutor do enrolamento interno (m);
23. e_e = Dimensão radial do condutor do enrolamento externo (m);
24. E_c = Modulo de Elasticidade do condutor utilizado (N/m²);
25. w_i = Dimensão axial do condutor com isolamento, mais isolamento entre espiras referente ao enrolamento interno (m);
26. w_e = Dimensão axial do condutor com isolamento, mais isolamento entre espiras referente ao enrolamento externo (m);
27. k_i = Quantidade de condutores da extremidade do enrolamento interno;
28. k_e = Quantidade de condutores da extremidade do enrolamento externo;
29. Esp_{axial} = Quantidade de suportes axiais;
30. $e_{espaxial}$ = Dimensão radial do suporte axial (m);
31. L_{ax} = Distância entre os suportes axiais (m);
32. Esp_{radial} = Quantidade de suportes radiais;
33. $e_{espradial}$ = Dimensão radial do suporte radial (m);
34. L_{rad} = Distância entre espaçadores radiais (m);

35. h_1 = Dimensão axial do espaçador radial (m);
36. A_1 = Área do espaçador radial (m²);
37. E_1 = Módulo da elasticidade do espaçador radial (N/m²);
38. h_2 = Dimensão axial associada à isolação na extremidade do enrolamento (m);
39. A_2 = Área associada à isolação na extremidade do enrolamento (m²);
40. E_2 = Módulo da elasticidade associada à isolação na extremidade do enrolamento (N/m²);
41. c = Módulo equivalente de elasticidade do papel isolante (N/m²);
42. $\sigma_{a \text{ dim-cond}}$ = Estresse admissível do condutor utilizado (N/mm²);
43. $\sigma_{a \text{ dim-isol}}$ = Estresse admissível das isolações utilizadas (N/mm²).

A fim de auxiliar o leitor para a diferenciação dos termos espaçadores radiais e espaçadores axiais, segue abaixo a Figura 7.1, a qual identifica esses parâmetros:

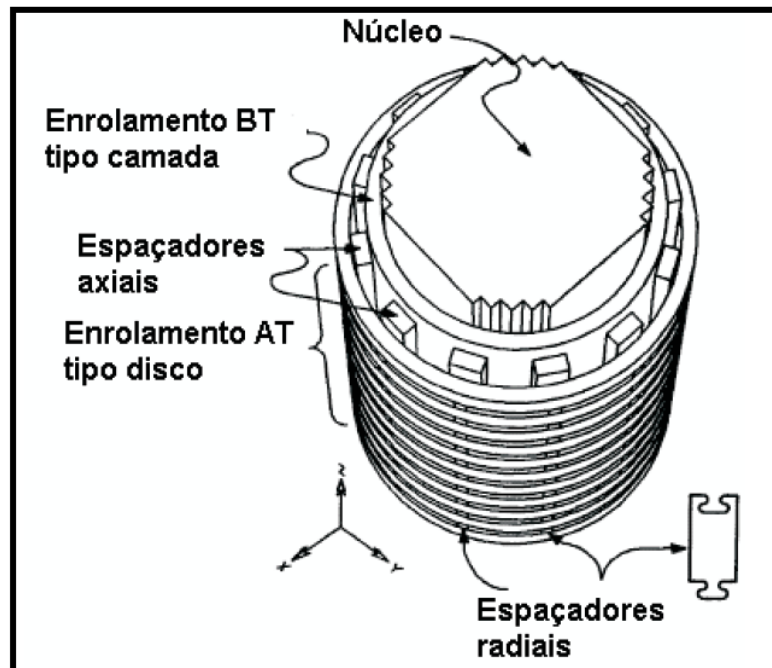


Figura 7.1 – Identificação dos espaçadores radiais e axiais no enrolamento do transformador.

Variáveis adicionais caso exista derivação:

44. $n_{deriv-i}$ = Número de espiras do enrolamento interno para condição de derivação total (Enrolamento Incompleto – Todos os tapes fora do circuito);
37. $n_{deriv-e}$ = Número de espiras do enrolamento externo para condição de derivação total (Enrolamento Incompleto – Todos os tapes fora do circuito);
38. $k_{deriv-i}$ = Quantidade de condutores próximos à derivação do enrolamento interno;
39. $k_{deriv-e}$ = Quantidade de condutores próximos à derivação do enrolamento externo;
40. a'_i = Comprimento da derivação do enrolamento interno (m);
41. a'_e = Comprimento da derivação do enrolamento externo (m);
42. Valor da relação $\frac{AlturaJanela}{DiâmetroNúcleo}$;
43. Tipo de derivação, conforme Tabela 7.1;

Tabela 7.1 - Arranjos mais usuais de derivação.

Tipo	Derivações	Onde: $a = \frac{a'}{h}$
A		
B		
C		
D		
E		