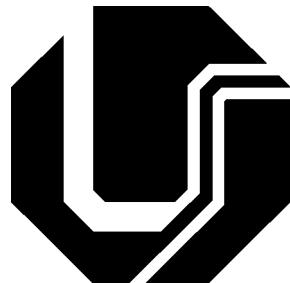


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**ESTRESSE ELETROMECÂNICO EM
TRANSFORMADORES SOB O ENFOQUE DE
CURTOS-CIRCUITOS ASSIMÉTRICOS: UMA
ABORDAGEM ANALÍTICA E COMPUTACIONAL**

PEDRO HENRIQUE AQUINO BARRA

**Uberlândia
2017**

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

**ESTRESSE ELETROMECÂNICO EM TRANSFORMADORES
SOB O ENFOQUE DE CURTOS-CIRCUITOS
ASSIMÉTRICOS: UMA ABORDAGEM ANALÍTICA E
COMPUTACIONAL**

PEDRO HENRIQUE AQUINO BARRA

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

Antônio Carlos Delaiba, Dr. (Orientador) – UFU

Arnaldo José Pereira Rosentino Junior, Dr. – UFTM

Ivan Nunes Santos, Dr. – UFU

Uberlândia, Julho de 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

B268e
2017

Barra, Pedro Henrique Aquino, 1993-

Estresse eletromecânico em transformadores sob o enfoque de curtos-circuitos assimétricos : uma abordagem analítica e computacional / Pedro Henrique Aquino Barra. - 2017.

xxv, 148 f. : il.

Orientador: Antônio Carlos Delaiba.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Transformadores elétricos - Teses. 3. Curtos-circuitos - Teses. 4. Método dos elementos finitos - Teses. I. Delaiba, Antônio Carlos. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Estresse Eletromecânico em Transformadores Sob o Enfoque de Curtos-Circuitos Assimétricos: Uma Abordagem Analítica e Computacional

PEDRO HENRIQUE AQUINO BARRA

Dissertação apresentada por Pedro Henrique Aquino Barra à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. Dr. Antônio Carlos Delaiba
Orientador

Prof. Dr. Alexandre Cardoso
Coordenador da Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Sébastião e Geraldina, aos meus irmãos Janayna e Marcos e a minha esposa Caroline, pelo apoio na realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, por sua maravilhosa graça, favor imerecido.

Ao Prof. Antônio Carlos Delaiba, pela amizade, incentivo, confiança e pela orientação durante todo o período de mestrado, sobremaneira, no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Arnaldo José Pereira Rosentino Junior pela presteza em sanar minhas dúvidas referentes à temática deste trabalho e pela parceria nos artigos publicados.

À minha esposa, Caroline Rosa Ribeiro Barra, pelo amor, companheirismo, carinho, compreensão e incentivo.

Aos meus pais, Sebastião Lázaro Barra e Geraldina Lima de Aquino Barra e irmãos, Janayna de Aquino Barra e Marcos Victor de Aquino Barra, pelo incentivo e força em todos os momentos.

Aos Profs. Isaque Nogueira, Ivan Nunes José Carlos, José Rubens e José Wilson, pelos ensinamentos e auxílio durante esses anos de mestrado.

Aos amigos de pós-graduação, Arthur Costa, Fabrício Montes, Giordanni da Silva, Guilherme Xavier, Gustavo Gonçalves, Henrique José, Leandro Pains, Lucas Tiago e Rodrigo Nóbis pelo convívio e troca de conhecimento durante esses anos.

À Cinara Fagundes e Patrícia pela presteza na secretaria da pós-graduação.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e à Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade.

À CAPES pelo auxílio financeiro.

RESUMO

A transmissão e a distribuição de energia elétrica que intermedia os pontos de geração e carga são totalmente dependentes dos transformadores, elementos vitais em sistemas elétricos de potência. Por meio da conversão eletromagnética, esses dispositivos adequam os níveis de tensão e corrente de acordo com cada necessidade. Essas e outras características contribuem para que os transformadores sejam um dos componentes mais caros no sistema elétrico. Perdas inesperadas desses elementos implicam em custos elevados relacionados à substituição, reparo, paradas de setores produtivos, energia não suprida, queda de indicadores de qualidade do serviço e outras consequências contraproducentes. Dentre as origens de falhas em transformadores se destacam as falhas mecânicas, em que eventos quaisquer que originem correntes transitórias com magnitudes elevadas nos enrolamentos dos transformadores, contribuem, cumulativamente para o decaimento da suportabilidade mecânica do transformador em suportar novos eventos. Sob esse viés, ações como o monitoramento das condições mecânicas dos enrolamentos são imprescindíveis, principalmente nas unidades com muito tempo em operação, no sentido de evitar e/ou contornar falhas. Para isso, faz-se necessário o emprego de técnicas, metodologias e estratégias para compreender e avaliar os esforços eletromecânicos em transformadores. Nesse contexto, este trabalho salienta os tipos de falhas passíveis de ocorrências em transformadores em decorrência de forças radiais e axiais. Apresenta-se uma metodologia analítica para estimar esforços eletromecânicos advindos de energizações, faltas simétricas e assimétricas – a última ainda é inexplorada na literatura. Com vistas à comparação dos esforços advindos dos eventos supracitados, um transformador é modelado no *Finite Element Method Magnetics* (FEMM), baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). A partir das simulações computacionais, o comportamento magnético do transformador frente a vários eventos também é investigado. De forma complementar, as severidades dos eventos são comparadas entre si por meio do conceito de distância Euclidiana. Por fim, discorre-se sobre uma estratégia para avaliação da margem de segurança de operação de transformadores, sob a ótica de suportabilidade mecânica, mediante alguns estudos de caso.

Palavras-chave: Transformadores, Curtos-Circuitos, Esforços Eletromecânicos, Falhas Mecânicas, Suportabilidade Mecânica, Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

The transmission and the distribution of electric energy require power transformers, which are considered essential units in electrical power systems. Through a process known electromagnetic conversion, the transformers adjust the voltage and current levels according to each identified need. For this reasons, a transformer is one of the most expensive elements in an electric power system. Failures in these devices can cause onerous financial damages related to replacement of them, problems with the power supply, production downtime and decline in the quality indicators as well as another consequences. Failures caused by mechanical stress due to transient currents in the transformers windings are important aspects to be considered because they can reduce the transformers lifetime or even cause irreversible damages of them. Therefore, it is crucial to analyze and control the mechanical conditions of the windings, especially those which have been used for a long period of time, to avoid the number of unexpected failures. In this study, an analytical method involving some techniques, methodologies and strategies is presented to understand the electromechanical efforts in transformers and to evaluate the failures due to radial and axial forces. In this way, this work aims at investigating the electromechanical efforts from energizations, symmetrical faults and unsymmetrical faults – the last one is still unexplored in the literature. Concerning the data above referred, a transformer is modeled in Finite Element Method Magnetics (FEMM), based on the Finite Element Method (FEM). From the computational simulations, the magnetic behavior of the transformer faced these events is also investigated. Besides, the severities of the events are compared to each other through the Euclidean distance concept. Finally, it is presented a strategy for evaluating the safety margin of transformers operation from a mechanical withstand perspective, through some case studies.

Keywords: Transformers, Short Circuits, Electromechanical Efforts, Mechanical Faults, Mechanical Withstand, Finite Element Method.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	v
AGRADECIMENTOS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
SUMÁRIO	ix
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS	xx

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 MOTIVAÇÃO	3
1.3 ESTADO DA ARTE	7
1.4 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	11
1.5 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO	11
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	12

CAPÍTULO II

ORIGENS DAS FALHAS MECÂNICAS EM TRANSFORMADORES E METODOLOGIA ANALÍTICA PARA CÁLCULO DOS ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS.....	14
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS	15
2.3 CURTOS-CIRCUITOS	17
2.3.1 Curtos-Circuitos Trifásicos	18
2.3.2 Curtos-Circuitos Assimétricos	22
2.3.3 Considerações Referentes ao Nível de Curto-Círcuito do Sistema.....	23
2.4 CORRENTES DE <i>INRUSH</i>	24
2.5 FALHAS ELETROMECÂNICAS EM TRANSFORMADORES.....	25
2.5.1 Forças Radiais: Equacionamentos e Implicações.....	26

2.5.2 Forças Axiais: Equacionamentos e Implicações	33
2.5.3 Aplicação da Metodologia Analítica em Transformador Trifásico de 15 kVA	42
2.5.3.1 Cálculo das forças e estresses radiais	46
2.5.3.2 Cálculo das forças axiais	47
2.5.3.3 Discussão e análise dos resultados	48
2.5.4 Aplicação da Metodologia Analítica Considerando-se o Nível de Curto-Círcuito..	51
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53

CAPÍTULO III

AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS EM TRANSFORMADORES UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	55
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	55
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR SOB ESTUDO	57
3.3 MODELAGEM DO TRANSFORMADOR SOB ESTUDO NO FEMM	62
3.3.1 Transformador Trifásico de 15 kVA sob Condições Nominais	66
3.3.2 Transformador Trifásico de 15 kVA sob Curto-Círcuito Trifásico	69
3.3.2.1 Forças Radiais para Curtos-Circuitos Trifásicos	71
3.3.2.2 Forças Axiais para Curtos-Circuitos Trifásicos	75
3.3.3 Transformador Trifásico de 15 kVA sob Curto-Círcuito Bifásico	78
3.3.3.1 Forças Radiais para Curtos-Circuitos Bifásicos	80
3.3.3.2 Forças Axiais para Curtos-Circuitos Bifásicos	83
3.3.4 Transformador Trifásico de 15 kVA sob Curto-Círcuito Bifásico Envolvendo o Terra	86
3.3.4.1 Forças Radiais para Curtos-Circuitos Bifásicos Envolvendo o Terra	87
3.3.4.2 Forças Axiais para Curtos-Circuitos Bifásicos Envolvendo o Terra	90
3.3.5 Transformador Trifásico de 15 kVA sob Curto-Círcuito Monofásico	93
3.3.5.1 Forças Radiais para Curtos-Circuitos Monofásicos	94
3.3.5.2 Forças Axiais para Curtos-Circuitos Monofásicos	97
3.3.6 Transformador Trifásico de 15 kVA sob Energização	100
3.3.6.1 Forças Radiais para Energizações	101
3.3.6.2 Forças Axiais para Energizações	103
3.3.7 Comparativo dos Esforços Eletromecânicos por meio do Conceito de Distância Euclidiana	105

3.3.8 Transformador Trifásico de 15 kVA com Desalinhamento entre Enrolamentos Externo e Interno	107
3.3.9 Aterramento por Resistência do Neutro de Transformadores e Implicações nos Esforços Eletromecânicos	113
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	119

CAPÍTULO IV

ESTRATÉGIA PARA VERIFICAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE TRANSFORMADORES SOB A ÓTICA DA SUPORTABILIDADE MECÂNICA.....	121
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	121
4.2 DEFINIÇÃO DA MARGEM DE SEGURANÇA NA OPERAÇÃO DE TRANSFORMADORES	123
4.2.1 Etapas para Determinação da Margem de Segurança.....	126
4.2.2 Coeficiente de Margem de Segurança em Transformador de 15 kVA: Obtenção Analítica e Computacional.....	127
4.2.3 Estudos de Caso em Transformador Trifásico de 5 MVA.....	128
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	134

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES.....	136
------------------------	------------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143
---	------------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Taxa de falha em transformadores no Brasil (1993 a 1996).....	4
Figura 1.2 - Origem das falhas de transformadores de (a) subestações convencionais e (b) usinas.	5
Figura 1.3 - Percentual de falhas em transformadores e autotransformadores versus componentes	6
Figura 1.4 - Porcentagens médias de ocorrência dos curtos-circuitos.....	7
Figura 2.1 - Campo de dispersão e decomposição das forças eletromagnéticas e do fluxo magnético em suas componentes axiais e radiais.	16
Figura 2.2 - Tipos de faltas ocorrentes em sistemas elétricos de potência. a) curto-círcuito bifásico; b) curto-círcuito bifásico à terra; c) curto-círcuito monofásico à terra; d) curto-círcuito trifásico.....	18
Figura 2.3 - Fator de assimetria em função das relações R/X e X/R.....	20
Figura 2.4 - Forma de onda da corrente de curto-círcuito trifásico totalmente assimétrica como múltipla do pico da corrente simétrica.....	21
Figura 2.5 - Forma de onda da força eletromagnética imposta aos enrolamentos como múltipla do valor máximo da força simétrica.....	22
Figura 2.6 - Forma de onda típica de corrente de <i>inrush</i> de transformadores.....	25
Figura 2.7 - Ação das forças eletromagnéticas radiais nos enrolamentos externo e interno do transformador.	26
Figura 2.8 - Ação das forças eletromagnéticas radiais no enrolamento externo em condições de energização.	27
Figura 2.9 - Deformações devido às forças compressivas no enrolamento interno: (a) Ilustração dos espaçadores axiais e outros componentes do transformador; (b) <i>forced buckling</i> ; (b) <i>free buckling</i>	28
Figura 2.10 - Deformação do tipo <i>forced buckling</i> no enrolamento.	29
Figura 2.11 - Deformação do tipo <i>free buckling</i> no enrolamento.	29
Figura 2.12 - Ensaio estresse <i>versus</i> deformação para vários níveis de dureza do cobre.	31
Figura 2.13 - Cabo transposto - CTC.....	33
Figura 2.14 - Fio magnético - MW.....	33
Figura 2.15 - Deformação axial em um dos enrolamentos do transformador.	34
Figura 2.16 - Ação das forças eletromagnéticas axiais nos enrolamentos externo e interno em condições de energização e curto-círcuito.....	34

Figura 2.17 - Colapso axial devido a uma força axial excessiva causada por um curto-circuito.....	35
Figura 2.18 - Ilustração dos espaçadores radiais e da inclinação dos condutores entre espaçadores (<i>bending</i>)	36
Figura 2.19 - Problema de flexão dos condutores entre espaçadores radiais (<i>bending</i>).....	36
Figura 2.20 - Tombamento dos condutores devido às forças axiais (<i>tilting</i>)	37
Figura 2.21 - Ocorrência do efeito <i>tilting</i> em transformador de grande porte.	37
Figura 2.22 - Curvas de compressão axial para enrolamentos considerados ideais.	38
Figura 2.23 - Formas de onda das correntes: (a) nominais; (b) de curto-círcuito trifásico; (c) de curto-círcuito bifásico; (d) de curto-círcuito bifásico-envolvendo o terra; (e) de curto-círcuito monofásico.	42
Figura 2.24 - Correntes de energização do transformador de 15 kVA.....	44
Figura 2.25 - Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico em análise.....	52
Figura 3.1 - Fotografia do transformador sob estudo sem o tanque.....	57
Figura 3.2 - Vista superior de corte do transformador sob estudo.	59
Figura 3.3 - Vistas do núcleo do transformador sob estudo: (a) frontal; (b) lateral	60
Figura 3.4 - Vista frontal do transformador sob estudo, considerando os enrolamentos.	61
Figura 3.5 - Características de magnetização do aço silício utilizado no transformador sob estudo.	61
Figura 3.6 - Transformador sob estudo implementado no FEMM.....	64
Figura 3.7 - Definição dos materiais na implementação do transformador no FEMM: (a) AR; (b) ACESITA.....	65
Figura 3.8 - Malha gerada no FEMM do modelo do transformador.	66
Figura 3.9 - Distribuição de fluxo magnético para a condição normal de operação.	67
Figura 3.10 - Densidade de fluxo nas colunas e nas regiões entre enrolamentos de cada fase para a condição nominal de operação.	68
Figura 3.11 - Extração da soma de forças distribuídas no FEMM.....	69
Figura 3.12 - Distribuição de fluxo magnético para a condição de curto-círcuito trifásico....	70
Figura 3.13 - Densidade de fluxo nas colunas e nas regiões entre enrolamentos de cada fase para a condição de curto-círcuito trifásico.	71
Figura 3.14 - Força radial de tração distribuída no EE.....	72
Figura 3.15 - Força radial de compressão distribuída no EI.....	72

Figura 3.16 - Forças radiais de tração e compressão em função do tempo no enrolamento: (a) externo da fase A; (b) externo da fase B; (c) externo da fase C; (d) interno da fase A; (e) interno da fase B; (f) interno da fase C.....	75
Figura 3.17 - Força axial distribuída total em ambos enrolamentos, para condições de curto-círcuito trifásico.....	76
Figura 3.18 - Força axial compressiva total na altura média dos enrolamentos.....	77
Figura 3.19 - Distribuição de fluxo magnético para a condição de curto-círcuito bifásico.	79
Figura 3.20 - Densidade de fluxo nas colunas e nas regiões entre enrolamentos de cada fase para a condição de curto-círcuito bifásico.....	80
Figura 3.21 - Força radial de tração distribuída no EE para curtos bifásicos.....	81
Figura 3.22 - Força radial de compressão distribuída no EI para curtos bifásicos.....	81
Figura 3.23 - Forças radiais de tração e compressão em função do tempo advindas de curtos bifásicos no enrolamento: (a) externo da fase A; (b) externo da fase B; (c) externo da fase C; (d) interno da fase A; (e) interno da fase B; (f) interno da fase C.	83
Figura 3.24 - Força axial distribuída total em ambos enrolamentos, para condições de curto-círcuito bifásico.	84
Figura 3.25 - Força axial compressiva total na altura média dos enrolamentos para curtos bifásicos.....	85
Figura 3.26 - Distribuição de fluxo magnético para a condição de curto-círcuito bifásico envolvendo o terra.	86
Figura 3.27 - Densidade de fluxo nas colunas e nas regiões entre enrolamentos de cada fase para a condição de curto-círcuito bifásico-terra.	87
Figura 3.28 - Força radial de tração distribuída no EE para curtos bifásicos-terra.	88
Figura 3.29 - Força radial de tração distribuída no EI para curtos bifásicos-terra.	88
Figura 3.30 - Forças radiais de tração e compressão em função do tempo advindas de curtos bifásicos envolvendo o terra no enrolamento: (a) externo da fase A; (b) externo da fase B; (c) externo da fase C; (d) interno da fase A; (e) interno da fase B; (f) interno da fase C.	90
Figura 3.31 - Força axial distribuída total em ambos enrolamentos, para condições de curto-círcuito bifásico envolvendo o terra.	91
Figura 3.32 - Força axial compressiva total na altura média dos enrolamentos para curtos bifásicos envolvendo o terra.	92
Figura 3.33 - Distribuição de fluxo magnético para a condição de curto-círcuito monofásico.	93

Figura 3.34 - Densidade de fluxo nas colunas e nas regiões entre enrolamentos de cada fase para a condição de curto-círcuito monofásico	94
Figura 3.35 - Força radial de tração distribuída no EE para curtos monofásicos.....	95
Figura 3.36 - Força radial de tração distribuída no EI para curtos monofásicos.....	95
Figura 3.37 - Forças radiais de tração e compressão em função do tempo advindas de curtos monofásicos no enrolamento: (a) externo da fase A; (b) externo da fase B; (c) externo da fase C; (d) interno da fase A; (e) interno da fase B; (f) interno da fase C.	97
Figura 3.38 - Força axial distribuída total em ambos enrolamentos, para curtos-circuitos monofásicos.....	98
Figura 3.39 - Força axial compressiva total na altura média dos enrolamentos para curtos monofásicos.....	99
Figura 3.40 - Distribuição de fluxo magnético para a condição de energização.....	100
Figura 3.41 - Fluxo nas colunas e nas regiões entre enrolamentos de cada fase para a energização.	101
Figura 3.42 - Força radial de tração distribuída no EE para energizações.....	102
Figura 3.43 - Força axial (a) distribuída total (b) compressiva total, no EI sob energizações.....	104
Figura 3.44 - Desalinhamento imposto entre enrolamento externo e interno da fase B.	108
Figura 3.45 - Distribuição de fluxo magnético para a condição de curto-círcito trifásico, com enrolamentos desalinhados.	109
Figura 3.46 - Força radial de tração distribuída no EE - Desalinhamento vs Ideal.....	110
Figura 3.47 - Força radial de tração distribuída no EI - Desalinhamento vs Ideal.....	110
Figura 3.48 - Força axial distribuída total em ambos enrolamentos - Desalinhamento vs Ideal.	111
Figura 3.49 - Força axial acumulada total em ambos enrolamentos - Desalinhamento vs Ideal.	112
Figura 3.50 - Força axial acumulada total em ambos enrolamentos, sob faltas simétricas e assimétricas - Desalinhamento vs Ideal.	113
Figura 3.51 - Correntes elétricas para curto-círcito monofásico na presença de resistência de aterramento no neutro do transformador.	115
Figura 3.52 - Distribuição de fluxo magnético do transformador aterrado por resistência, para a condição de curto-círcito monofásico.....	115
Figura 3.53 - Densidade de fluxo nas colunas e nas regiões entre enrolamentos de cada fase do transformador aterrado por resistência, para a condição de curto-círcito monofásico....	116

Figura 3.54 - Força radial de tração distribuída no EE para curtos monofásicos, com transformador aterrado por resistência	117
Figura 3.55 - Força radial de tração distribuída no EI para curtos monofásicos, com transformador aterrado por resistência	117
Figura 3.56 - Força axial distribuída total em ambos enrolamentos, para condições de curto-círcuito monofásico com transformador aterrado por resistência	118
Figura 4.1 - Variações do S_m em função de S_{cc}	125
Figura 4.2 - Margens de segurança em função do fator de impulso f_i	128
Figura 4.3 - Sistema elétrico para estudo de caso	130
Figura 4.4 - Margem de segurança em função de algumas mudanças no sistema elétrico ..	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores para fator de impulso e fator resultante em função da relação R/X	20
Tabela 2.2 - Expressões das correntes advindas dos curtos-circuitos assimétricos.....	22
Tabela 2.3 - Valores para k3	41
Tabela 2.4 - Valores para k4	41
Tabela 2.5 - Correntes elétricas trifásicas para as variadas situações estudadas.....	44
Tabela 2.6 - Características elétrica, magnética e geométrica do transformador de 15 kVA..	45
Tabela 2.7 - Forças radiais obtidas pela aplicação da metodologia analítica - Transformador sob condições diversas.	46
Tabela 2.8 - Estresses causados pelas forças radiais, obtidos pela aplicação da metodologia analítica - Transformador sob condições diversas.....	47
Tabela 2.9 - Forças axiais obtidas pela aplicação da metodologia analítica - Transformador sob condições diversas.	47
Tabela 2.10 - Comparativo de estresses radiais no enrolamento externo por distância Euclidiana.....	49
Tabela 2.11 - Comparativo de estresses radiais no enrolamento interno por distância Euclidiana.....	49
Tabela 2.12 - Comparativo de forças compressivas totais por distância Euclidiana.....	50
Tabela 2.13 - Resultados obtidos ao considerar o nível de curto-círcito no ponto de entrega.....	53
Tabela 3.1 - Características do transformador sob estudo.....	58
Tabela 3.2 - Pontos específicos da curva B-H da Figura 3.5.....	62
Tabela 3.3 - Valores das relutâncias e das espessuras de entreferros do transformador sob estudo.....	63
Tabela 3.4 - Forças radiais totais nos enrolamentos externo e interno em condições nominais.....	68
Tabela 3.5 - Forças radiais distribuídas nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito trifásico.	73
Tabela 3.6 - Forças radiais totais nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito trifásico.	73
Tabela 3.7 - Estresses radiais médios nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito trifásico.	74

Tabela 3.8 - Força axial nas extremidades dos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito trifásico.....	76
Tabela 3.9 - Força axial compressiva total nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito trifásico.....	77
Tabela 3.10 - Forças radiais distribuídas nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito bifásico.....	82
Tabela 3.11 - Forças radiais totais nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito bifásico.....	82
Tabela 3.12 - Estresses radiais médios nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito bifásico.....	82
Tabela 3.13 - Força axial nas extremidades dos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito bifásico	84
Tabela 3.14 - Força axial compressiva total nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito bifásico	85
Tabela 3.15 - Forças radiais distribuídas nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito bifásico envolvendo o terra	89
Tabela 3.16 - Forças radiais totais nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito bifásico envolvendo o terra.....	89
Tabela 3.17 - Estresses radiais médios nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito bifásico envolvendo o terra.....	89
Tabela 3.18 - Força axial nas extremidades dos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito bifásico envolvendo o terra.....	91
Tabela 3.19 - Força axial compressiva total nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito bifásico envolvendo o terra.....	92
Tabela 3.20 - Forças radiais distribuídas nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito monofásico	96
Tabela 3.21 - Forças radiais totais nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito monofásico	96
Tabela 3.22 - Estresses radiais médios nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito monofásico	96
Tabela 3.23 - Força axial nas extremidades dos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito monofásico	98
Tabela 3.24 - Força axial compressiva total nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito monofásico	99

Tabela 3.25 - Forças radiais distribuídas no enrolamento interno para condições energização.....	102
Tabela 3.26 - Forças radiais totais nos enrolamentos externo e interno para condições de energização.....	103
Tabela 3.27 - Estresses radiais médios nos enrolamentos externo e interno para condições de energização.....	103
Tabela 3.28 - Força axial nas extremidades dos enrolamentos externo e interno para condições de energização.....	104
Tabela 3.29 - Força axial compressiva total no enrolamento interno para condições de energização.....	105
Tabela 3.30 - Comparativo de estresses radiais no enrolamento externo por meio da distância Euclidiana, baseado no MEF.....	105
Tabela 3.31 - Comparativo de estresses radiais no enrolamento interno por meio da distância Euclidiana.....	106
Tabela 3.32 - Comparativo de forças compressivas totais por distância Euclidiana.....	106
Tabela 4.1 - Limites críticos de forças e esforços eletromecânicos.....	123
Tabela 4.2 - Dados técnicos do transformador trifásico de 5 MVA.....	129
Tabela 4.3 - Correntes assimétricas de curto-circuito trifásico para os estudos de caso.....	131
Tabela 4.4 - Resultados das parcelas que limitam o coeficiente Sm do transformador de 5 MVA nos estudos de caso.....	132

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

\vec{F}	- Densidade volumétrica de força magnética [N/m^3];
\vec{J}	- Densidade superficial de corrente [A/m^2];
\vec{B}	- Densidade de fluxo magnético de dispersão [T];
B_a, B_r	- Componente axial e radial da densidade de fluxo magnético de dispersão [T];
EBT, EAT	- Enrolamento de baixa e alta tensão;
F_1	- Força eletromagnética no enrolamento de baixa tensão [N];
F_{1r}, F_{1a}	- Componente radial e axial da força eletromagnética no enrolamento de baixa tensão [N];
F_2	- Força eletromagnética no enrolamento de alta tensão [N];
F_{2r}, F_{2a}	- Componentes radial e axial da força eletromagnética no enrolamento de alta tensão [N];
B_1	- Densidade de fluxo magnético de dispersão no enrolamento de baixa tensão [T];
B_{1r}, B_{1a}	- Componente radial e axial da densidade de fluxo magnético de dispersão no enrolamento de baixa tensão [T];
B_2	- Densidade de fluxo magnético de dispersão no enrolamento de alta tensão [T];
B_{2r}, B_{2a}	- Componente radial e axial do fluxo magnético de dispersão no enrolamento alta tensão [T];
F_r	- Força radial total [N];
F_a	- Força axial total [N];
$\vec{a}_z, \vec{a}_y, \vec{a}_x$	- Versores unitários nas direções do eixo z , y e x ;
$\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$	- Correntes complexas nas fases A, B e C [p.u.];
$I_{3\emptyset}$	- Corrente simétrica de curto-circuito trifásico [A];
$I_{3\phi s}$	- Corrente assimétrica de curto-circuito trifásico [A];

U_l	- Tensão de linha nominal [V];
Z	- Impedância acumulada de sequência positiva do circuito da entrada até o ponto em curto-circuito [Ω];
f_i	- Fator de assimetria ou impulso;
$I_{3\emptyset}$	- Corrente simétrica de curto-circuito trifásico [A];
$I_{3\phi s}$	- Corrente assimétrica de curto-circuito trifásico [A];
U_l	- Tensão de linha nominal aplicada [V]
Z_{Traf}	- Impedância do transformador em valor por unidade [p.u.];
$Z\%$	- Impedância percentual do transformador;
S_n	- Potência aparente nominal do transformador [VA];
$I_{2\emptyset}$	- Corrente simétrica de curto-circuito bifásico [p.u.];
$I_{2\emptyset T}$	- Corrente simétrica de curto-circuito bifásico envolvendo o terra [p.u.];
$I_{\emptyset T}$	- Corrente simétrica de curto-circuito monofásico [p.u.];
\dot{E}_{a1}	- Tensão de sequência positiva na fase A [p.u.];
$\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dot{Z}_0$	- Impedância de sequência positiva, negativa e zero até o ponto da falta [p.u.];
\dot{Z}_f	- Impedância de falta entre fases ou entre fase e terra [p.u.];
$\dot{I}_{2\phi s}$	- Corrente assimétrica de curto-circuito bifásico [p.u.];
$\dot{I}_{2\emptyset Ts}$	- Corrente assimétrica de curto-circuito bifásico envolvendo o terra [p.u.];
$\dot{I}_{\emptyset Ts}$	- Corrente assimétrica de curto-circuito monofásico [p.u.];
S_{cc}	- Nível de curto-circuito no ponto de entrada [MVA];
Z_e	- Impedância de entrada [Ω] ou [p.u.];
Z_{eq}	- Impedância equivalente, levando-se em consideração todos os elementos do sistema [p.u.];
Z_{outros}	- Impedância de elementos além de transformadores e do sistema [p.u.];
n	- Número de espiras do enrolamento a ser analisado;

I_α	- Valor da corrente de pico do evento α a ser analisado, isto é, valor das correntes assimétricas dos curtos-circuitos ou do pico da corrente de <i>inrush</i> [A];
D_m	- Diâmetro médio do enrolamento α a ser analisado [m];
h	- Altura do enrolamento [m];
F_{rmed}	- Força radial média [N];
$F_{rad-dist}$	- Força radial distribuída ao longo de cada espira do enrolamento [N/m];
$\sigma_{r-médio}$	- Estresse médio de tração no enrolamento [N/m ²];
a_c	- Seção transversal do condutor [m ²];
b	- Distância axial do condutor [m];
e	- Distância radial do condutor [m];
$\sigma_{0,2}, \sigma_{máx}$	- Estresse admissível [N/mm ²];
$\sigma_{crit-buckling}$	- Valor crítico de estresse por efeito <i>buckling</i> [N/m ²];
E_c	- Módulo de elasticidade do material [N/m ²];
Esp_{axial}	- Quantidade de suportes axiais;
$\sigma_{medio-buckling}$	- Valor de estresse médio para avaliação do efeito <i>buckling</i> [N/m ²];
L_{axial}	- Distância entre os suportes axiais [m];
CTC	- Condutores formados por um conjunto de fios continuamente transpostos (<i>Continuously Transposed Conductor</i>);
MW	- Condutores formados por um único fio retangular;
$F_{c Total}$	- Força axial compressiva total em ambos os enrolamentos [N];
$D_{médio}$	- Diâmetro médio dos enrolamentos interno e externo [m];
nI_α	- Força magnetomotriz dos enrolamentos[A.e];
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 nominal por fase do transformador em MVA [MVA];
f	- Frequência em ciclos por segundo [Hz];
F_{c-int}	- Força compressiva total aplicada no enrolamento interno [N];
F_{c-ext}	- Força compressiva total aplicada no enrolamento externo [N];
F_a	- Força axial nas extremidades dos enrolamentos [N];
q	- Fração do ampére-espira total em um enrolamento e depende do número de discos, ou do número de camadas do enrolamento;
d_1	- Largura equivalente do ducto do transformador [m];
N_d	- Quantidade de discos do enrolamento;
N_L	- Quantidade de camadas do enrolamento;
d_1	- Largura equivalente do ducto do transformador [m];
w	- Dimensão axial do condutor, considerando-se sua isolação e a isolação entre espiras [m];
$F_{ax-dist}$	- Força axial distribuída ao longo da espira [N];
$\sigma_{ax-bending}$	- Estresse axial relacionado ao efeito <i>bending</i> [N/m ²];
n_s	- Número de espiras por seção de um disco do enrolamento em enrolamentos do tipo disco, ou número de camadas em enrolamentos do tipo camada;
L_{radial}	- Distância entre os espaçadores radiais [m];
N_{radial}	- Quantidade de espaçadores radiais;
R_{radial}	- Dimensão radial dos espaçadores radiais [m];
$F_{ax-crit}$	- Força axial crítica relacionada ao efeito <i>tilting</i> [N];
χ	- Constante que leva em consideração o tipo de enrolamento;
γ	- Constante que leva em conta a forma do condutor;
k_1	- Coeficiente do termo de torção;
k_2	- Coeficiente do termo de transposição;
k_3	- Fator que leva em consideração o grau de dureza do cobre;

k_4	- Fator que leva em conta a inclinação dinâmica;
I_{inrush}	- Corrente de <i>inrush</i> em seu primeiro pico [A];
I_{np}	- Corrente de pico nominal do transformador [A];
$\sigma_{rmáx}$	- Estresse radial máximo observado entre os eventos [N/m^2];
$\sigma_{r\alpha}, \sigma_{r\beta}$	- Estresses radiais devido aos eventos α e β , respectivamente [N/m^2];
EI, EE	- Enrolamento interno e externo;
$\sigma_{r3\phi}$	- Estresse radial médio devido à corrente de curto-círcuito trifásico [N/m^2];
$\sigma_{r2\phi}$	- Estresse radial médio devido à corrente de curto-círcuito bifásico [N/m^2];
$\sigma_{r2\phi T}$	- Estresse radial médio devido à corrente de curto-círcuito bifásico envolvendo o terra [N/m^2];
$\sigma_{r\phi T}$	- Estresse radial médio devido à corrente de curto-círcuito monofásico [N/m^2];
$\sigma_{rinrush}$	- Estresse radial médio devido à corrente de <i>inrush</i> [N/m^2];
$F_{cTmáx}$	- Força compressiva total máxima observada entre os eventos [N];
$F_{cT\alpha}, F_{cT\beta}$	- Força compressiva total devido aos eventos α e β , respectivamente [N];
$F_{cT3\phi}$	- Força compressiva total devido à corrente de curto-círcuito trifásico [N];
$F_{cT2\phi}$	- Força compressiva total devido à corrente de curto-círcuito bifásico [N];
$F_{cT2\phi T}$	- Força compressiva total devido à corrente de curto-círcuito bifásico envolvendo o terra [N];
$F_{cT\phi T}$	- Força compressiva total devido à corrente de curto-círcuito monofásico [N];
$F_{cTinrush}$	- Força compressiva total devido à corrente de <i>inrush</i> [N];
$\mathfrak{R}_e, \mathfrak{R}_c, \mathfrak{R}_d$	- Relutância representativa do entreferro associado à coluna externa esquerda e culatras, à coluna central e à coluna externa direita e culatras [H^{-1}];
ℓ	- Espessura dos entreferros ℓ_e (esquerda), ℓ_c (central) e ℓ_d (direita) [m];
A	- Área da seção transversal da coluna [m^2];
μ_0	- Permeabilidade magnética do ar [H/m];

- | | |
|---------------------------------|---|
| S_m | - Coeficiente de margem de segurança de suportabilidade mecânica; |
| RAV | - Aterramento de neutro de geradores e transformadores por intermédio de uma resistência de alto valor; |
| RBV | Aterramento de neutro de geradores e transformadores por intermédio de uma resistência de baixo valor; |
| Γ, Γ_1 e Γ_2 | - Valores constantes $\in \mathbb{R}$. |

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A interconexão de sistemas elétricos em diferentes níveis de tensão é possível através dos transformadores de potência, elementos vitais entre pontos de geração e carga. Esses dispositivos de conversão eletromagnética de energia possuem custos elevados e, quando são danificados ou apresentam defeito, consequentemente há um alto valor financeiro para substituição ou reparo.

Os prejuízos financeiros vão além de custos com reparos ou substituições, uma vez que a saída inesperada desses equipamentos pode implicar em perdas de linhas de transmissão, o que ocasiona paradas de processos produtivos de unidades consumidoras. No que tange às concessionárias de energia, pode haver um declínio de indicadores de qualidade da energia elétrica, acarretando possíveis penalidades, entre outras consequências contraproducentes (AZEVEDO, 2007).

Transformadores de potência nem sempre estão disponíveis comercialmente a curto prazo, devido às características peculiares a serem atendidas em cada sistema. Ressalta-se ainda que, devido ao peso, dimensões elevadas e fragilidade de seus componentes, esses equipamentos exigem uma logística diferenciada de transporte, o que posterga sua reposição (KULKARNI; KHAPARDE, 2004; MACHRY, 2005).

Nesse contexto, é notória a problemática da perca inesperada de um transformador de potência, seja pelos custos envolvidos ou pela complexidade da logística envolvida em sua

reposição. Há, porquanto, uma preocupação constante com esses equipamentos, no que tange aos fenômenos elétricos causadores de possíveis falhas.

Sabe-se que os transformadores estão constantemente expostos a fatores ambientais, como ambientes corrosivos, umidade, acidez, contaminação, intempéries, além de estresses térmicos associados às sobrecargas e correntes de curto-círcito. Esses equipamentos também estão submetidos aos estresses dielétricos, os quais estão atrelados com sobretensões originadas nos sistemas elétricos de potência. Portanto, devem ser projetados e construídos para suportar as exigências impostas pelo sistema elétrico e pelo meio externo em que estão alocados.

De forma complementar às origens de falhas supracitadas, há aquelas de origem mecânica, denotadas usualmente como “falhas mecânicas”. De acordo com pesquisas elaboradas por Souza (2008) e Cigré (1983), as falhas mecânicas e dielétricas representam a maioria dos problemas que ocorrem em transformadores. Vale ressaltar que as falhas mecânicas são decorrentes de esforços eletromecânicos impostos pela corrente de *inrush* (GUIMARÃES et al., 2013) e por faltas simétricas (ROSENTINO, 2010; GUIMARÃES, 2013).

No tocante aos esforços eletromecânicos nas situações descritas, é observada a aplicação do conceito descrito por Lorentz (HAYT Jr.; BUCK, 2012), em que a interação da densidade superficial de correntes transitórias elevadas com a de fluxo magnético resulta em elevadas forças eletromagnéticas na parte ativa do transformador, provocando degradação da isolamento, fadiga mecânica nos condutores, danos estruturais na sustentação dos enrolamentos e, como consequência final, a redução de sua vida útil e a posterior falha.

As forças eletromagnéticas oriundas de correntes de operação nominal ou até mesmo de sobrecarga dificilmente causarão danos mecânicos ao transformador. Por outro lado, conforme já discutido, as correntes de energização e de curto-círcito, podem ser imensamente maiores que a corrente em condições normais de operação.

No que se refere às correntes de curto-círcito, é possível ressaltar que os curtos-circuitos trifásicos são os menos ocorrentes nos sistemas elétricos de potência. Por mais que os outros tipos de curto-círcito (faltas assimétricas) sejam menos intensos, a maior ocorrência destes (KINDERMANN, 1997) justifica as investigações presentes nesta pesquisa.

Evidencia-se que a proteção de transformadores, por meio de relés com funções de sobrecorrente e até mesmo diferenciais, é eficaz para a interrupção da operação em situações de anormalidade no sistema. Mesmo com o baixo tempo de resposta, os equipamentos são submetidos aos efeitos transitórios, o que não atenua os riscos de falhas decorrentes de esforços eletromecânicos.

Nessa conjuntura, é esperado que o transformador de potência seja capaz de suportar, durante a vida útil, um número significativo de ocorrências que impliquem correntes elevadas em seus enrolamentos, isto é, energizações, curtos-circuitos trifásicos, bifásicos, entre outros. Mas é certo que a suportabilidade mecânica decresça gradativamente a cada nova ocorrência, fazendo com que a capacidade de suportar novos esforços eletromecânicos seja reduzida.

Com vistas a acompanhar mecanicamente tais ocorrências e mitigar efeitos, vibrações e deformações, elas podem ser monitoradas a partir da medição das forças eletromagnéticas e de estresses eletromecânicos ou de forma direta por meio de fibras ópticas, por exemplo (BENETI, 2016). Porém, essas medições não são triviais, devido ao fato de que os sensores devem ser instalados em pontos estratégicos dos enrolamentos, isto é, na parte interna do transformador. Isso implica em retirar da operação o transformador, ou até mesmo encontrar fabricantes dispostos a ajustar os projetos de transformadores, no sentido de introduzir tais sensores nos enrolamentos. Tem-se em vista que, com o transformador montado, não há acesso aos enrolamentos internos do mesmo (BENETI, 2016).

Sob outra perspectiva, a avaliação da condição mecânica dos transformadores, pode ser realizada de forma periódica ao longo de sua vida útil a partir do emprego de técnicas de diagnóstico, como exemplo a análise de resposta em frequência (FRA) que se destaca por fornecer melhores resultados (CIGRE, 2008; FERRAZ, 2015). Todavia, a aplicação do FRA requer que o transformador esteja fora de operação, demandando também elevados custos financeiros (COSTA; COX, 2016).

Diante das dificuldades expostas para medir forças eletromagnéticas, estresses eletromecânicos e constatar deformações, as soluções analíticas e, sobretudo, simulações computacionais são alternativas capazes de estudar os efeitos da circulação de correntes elevadas nos enrolamentos dos transformadores (YANG, 2013).

Esta pesquisa, fundamentada em soluções analíticas e simulações computacionais baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF), objetiva avaliar os efeitos de forças eletromagnéticas e estresses eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores, quando em condições de energização e frente a faltas simétricas e assimétricas.

1.2 MOTIVAÇÃO

Por mais que os transformadores de potência estejam sob resguardo de proteções projetadas em harmonia com filosofias de proteção de sistemas elétricos, ainda existirão eventos como energizações e curtos-circuitos. Até que a proteção atue, no caso de curtos-

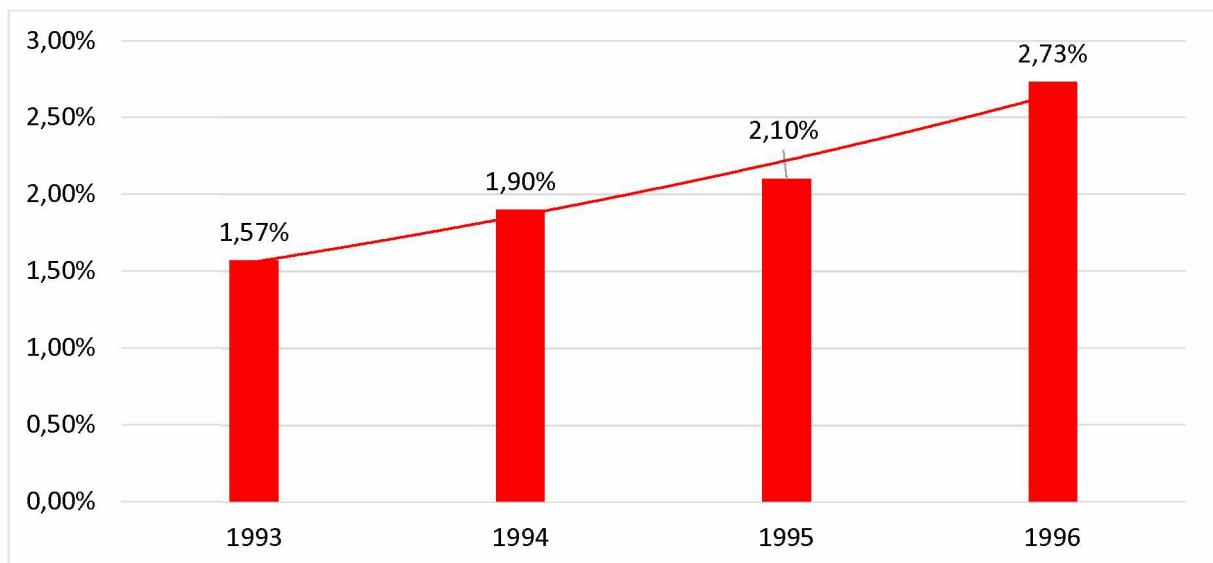
circuitos, ou até que a magnitude da corrente de *inrush* diminua, em se tratando de energizações, os transformadores estarão submetidos a elevadas correntes e, por conseguinte, a grandes forças eletromagnéticas.

Nesse sentido, o projeto e a construção do transformador devem garantir que ele suporte, durante toda a vida útil, uma quantidade aceitável dessas ocorrências. À medida que acontecem os eventos, verifica-se que a suportabilidade mecânica dos enrolamentos do transformador é diminuída (GUIMARÃES, 2013).

Ainda no que tange à suportabilidade, percebe-se que, pelo fato de o transformador já ser naturalmente um equipamento de custo elevado, por meio da Lei 8.666/1993, que institui normas para licitações e contratos da administração pública, os consumidores buscam os equipamentos com menor preço, enquanto os fabricantes são forçados, pela lei da oferta *versus* demanda, a se adequarem à competitividade com menores preços. Essas adaptações movimentam o mercado de transformadores, porém implicam em diminuições com os custos de fabricação, em que há a possibilidade de diminuição da qualidade e/ou da quantidade de materiais empregados – com isso, aumenta-se a probabilidade de falhas mecânicas.

Em se tratando de falhas em transformadores, ainda de forma genérica, pesquisas antigas, porém importantes, do GCOI Grupo Coordenador de Desempenho de Equipamentos e Instalações (GCOI, 1996), atual Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), apontavam em 1996 um aumento substancial, ao longo dos anos analisados, da taxa de falhas em transformadores no Brasil, conforme indica a Figura 1.1.

Figura 1.1 - Taxa de falha em transformadores no Brasil (1993 a 1996).

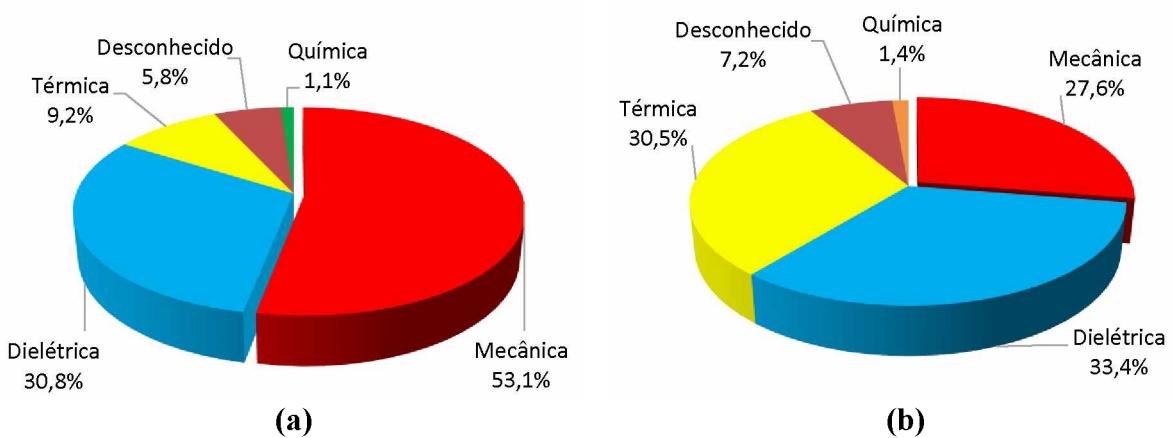


Fonte: Adaptado de GCOI (1996).

As falhas em transformadores, de maneira geral, podem ser classificadas conforme as origens térmicas e dielétricas, compondo o grupo das falhas elétricas; ou de origens químicas e mecânicas (CIGRE, 1983; SOUZA, 2008; BECHARA, 2010).

Em consonância com as classificações das origens de falhas, pesquisas realizadas pelo Cigré (1983) apontam, por meio da Figura 1.2, porcentagens de falhas ocorrentes em transformadores de subestações convencionais (população de 31.031 unidades-anos) e de usinas (2.335 unidades-anos), com uma significante representação de falhas com origens mecânicas e dielétricas. Grande parte das falhas com origens mecânicas estão relacionadas ao comutador de tape sob carga, pois são solicitados com maior frequência em relação aos outros componentes.

Figura 1.2 - Origem das falhas de transformadores de (a) subestações convencionais e (b) usinas.



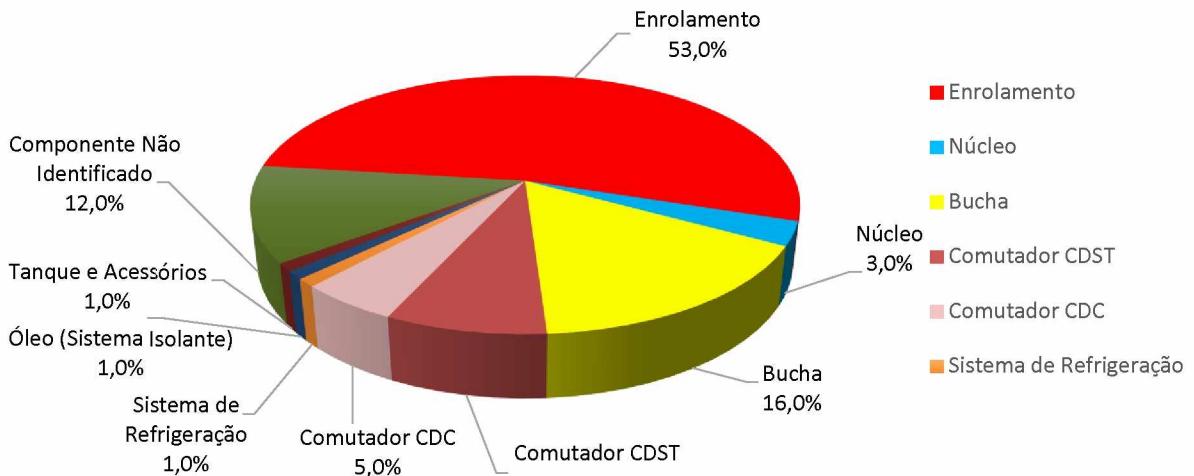
Fonte: Adaptado de Cigré (1983).

Deve-se enfatizar que os curtos-circuitos também estão atrelados com falhas de origens dielétricas, tendo em vista que os esforços eletromecânicos podem reduzir a suportabilidade dielétrica da isolação do condutor. Além disso, a diminuição ou o aumento do diâmetro dos enrolamentos pode implicar em dificuldade de circulação do óleo, aquecimentos localizados na isolação e aceleração do envelhecimento do papel isolante (ROSENTINO, 2010).

Ao constatar a grande ocorrência de falhas com origens mecânicas e que os esforços eletromecânicos podem causar falhas de origens dielétricas, através do isolante, a Figura 1.3 apresenta o percentual de falhas em transformadores e autotransformadores *versus* componentes. Percebe-se, de forma clara, que majoritariamente elas acontecem nos enrolamentos dos transformadores, sobretudo em virtude de forças eletromagnéticas e seus

consequentes estresses eletromecânicos originados por correntes transitórias de magnitude elevada.

Figura 1.3 - Percentual de falhas em transformadores e autotransformadores versus componentes.



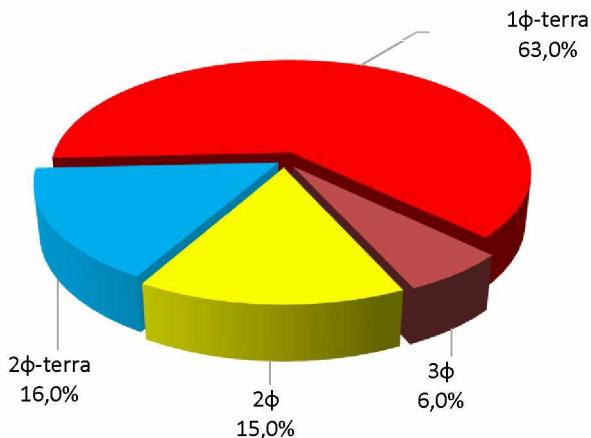
Fonte: Adaptado de Souza (2008).

Vale frisar que a ocorrência de um evento que culmine em elevadas correntes nos enrolamentos do transformador, salvo exceções, não é suficiente para levar os enrolamentos à falha. Desse modo, o estresse mecânico oriundo da elevada corrente normalmente é menor do que aquele admissível pelos enrolamentos ou a suportabilidade mecânica dos enrolamentos não é ultrapassada. Não obstante, tem-se o conceito de dano cumulativo (GUIMARÃES, 2013; GUIMARÃES et al., 2014; ARAUJO et al., 2016), em que cada ocorrência, por mais que seja diferente, implica na diminuição da referida suportabilidade.

Sobre os eventos que causam correntes transitórias de magnitude elevada, nota-se na literatura uma grande preocupação com a corrente de *inrush* e, sobretudo, com aquela advinda de curtos-circuitos do tipo trifásico. Tal fato é totalmente aceitável, visto que as correntes de curto-círcito trifásico, via de regra, possuem a maior magnitude e, por conseguinte, ocasionam os maiores estresses eletromecânicos nos transformadores.

No entanto, a Figura 1.4 destaca que o curto-círcuito trifásico é o menos frequente – ele merece total atenção, por sua magnitude e impacto, devendo ser considerado para projeto do transformador. Todavia, no que tange à operação do transformador, os outros tipos de curtos-circuitos também necessitam de investigações mais profundas, tendo em vista as maiores ocorrências. Adicionalmente, eles possuem uma magnitude considerável em relação aos valores nominais de corrente e em alguns casos, curtos-circuitos monofásicos – mais ocorrentes – podem ser mais severos que os trifásicos.

Figura 1.4 - Porcentagens médias de ocorrência dos curtos-circuitos.



Fonte: Adaptado de Kindermann (1997).

Nesse contexto de compreensão e, diante de algumas lacunas existentes na temática, o presente trabalho visa contribuir no sentido de complementar as pesquisas anteriores para expansão dos assuntos e análises. Dessa forma, espera-se que o assunto seja cada vez mais difundido e compreendido.

1.3 ESTADO DA ARTE

Entende-se que esta não é uma temática muito conhecida e difundida. No entanto, pesquisadores de todo o mundo têm estudado os esforços eletromecânicos e suas implicações em transformadores. Nesse contexto, apresenta-se na sequência a síntese de algumas publicações de maior relevância, encontradas na literatura nacional e internacional. Em formato de normas, recomendações, relatórios, livros, artigos em periódicos e eventos, elas consubstanciam de certo modo a presente pesquisa.

Em seu livro, Waters (1966) apresentou expressões analíticas para o cálculo de forças eletromagnéticas axiais e radiais oriundas das elevadas correntes de curto-circuito. Para os cálculos dos esforços eletromecânicos, os vários arranjos de tapes foram considerados pelo autor para levar em conta forças adicionais, devido à essas derivações. Os efeitos dinâmicos, as características mecânicas de materiais utilizados na construção de transformadores e até mesmo alguns métodos para a medição das forças eletromagnéticas, como o *strain gauge*, são tratados nessa referência que pode ser considerada a base de diversos estudos relacionados à temática abordada.

Patel (1980) afirma que uma instabilidade axial dos enrolamentos pode ser ocasionada pela corrente de curto-círcito passante nos enrolamentos dos transformadores. O autor apresenta uma formulação analítica para determinar os estresses críticos dos enrolamentos, assim como sua frequência ressonante. Enfatiza-se que o projeto de enrolamentos deve ser baseado no estresse crítico e que a probabilidade de falha devido à ressonância dos enrolamentos é mínima – essa frequência se apresenta muito mais elevada, ao ser comparada à de operação dos equipamentos.

Já Salon e outros (2000) avaliaram várias situações e desdobramentos nos valores das forças eletromagnéticas atuantes em transformadores sob condições de curtos-circuitos trifásicos. A partir de simulações computacionais realizadas em ambientes 2D e 3D, os autores constataram que os valores das forças eletromagnéticas em ambiente 2D são próximos àqueles obtidos em 3D.

Por sua vez, Steurer e Fröhlich (2002) analisaram as forças eletromagnéticas advindas de correntes de curto-círcito trifásico e energizações. Apesar de as correntes de energização serem menores que as de curto-círcito, as forças geradas pelas correntes de *inrush* podem possuir a mesma ordem de grandeza que aquelas obtidas pelas correntes de curto-círcito; e provocar danos semelhantes aos transformadores, visto que a duração temporal de uma energização é maior que o tempo de atuação da proteção contra curtos.

Azevedo (2007) realizou um estudo investigativo acerca das forças eletromagnéticas nos enrolamentos de transformadores, originadas pelas correntes de curto-círcito trifásico. Com uma modelagem no domínio do tempo, tinha-se acesso às grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas em regimes transitório e permanente. Compararam-se algumas dessas grandezas encontradas no modelo em domínio do tempo com resultados encontrados via método dos elementos finitos, por meio do software *Finite Element Method Magnetics* (FEMM), em que se obteve êxito. A referida autora propôs uma metodologia de avaliação que estabelece a relação dos fenômenos estudados com a vida útil do transformador, baseando-se na comparação direta do valor encontrado de estresse mecânico nos enrolamentos com o estresse mecânico admissível. Tal metodologia desconsidera que falhas mecânicas podem ocorrer para valores de estresses mecânicos menores que os admissíveis, isto é, despreza-se a possibilidade de existir dano cumulativo, assim como estresses eletromecânicos advindos de faltas assimétricas.

Kumbhar e Kulkarni (2007) enfatizam que a adição de mais unidades geradoras e o aumento constante da interconexão de sistemas elétricos contribuem, logicamente, para a elevação do nível de curto-círcito nos variados pontos do sistema, tornando-o mais grave e danoso. Os autores ressaltam que a suportabilidade mecânica inadequada de um transformador

pode ocasionar um colapso mecânico do enrolamento, levando-o à deformação. Ademais, eles realizaram cálculos e estudos das forças eletromagnéticas para transformadores portadores de enrolamentos divididos (tipo *split*).

Nesse entremeio, Faiz, Ebrahimi e Noori (2008) avaliaram os impactos mecânicos da corrente de *inrush*. Eles constataram que, em alguns casos, as forças eletromagnéticas e suas consequências, advindas da corrente de *inrush*, são mais agravantes que as forças eletromagnéticas oriundas de correntes de curto-círcito do tipo trifásico. Isso se deve ao fato de o tempo de energização da corrente de *inrush* ser maior que o de atuação da proteção contra curtos-circuitos.

Ainda em referência à corrente de energização, Adly (2001), Neves e outros (2011) e Guimarães e outros (2013) também pretendem estimar os esforços eletromecânicos causados por essas correntes e compará-los com aqueles advindos de correntes de curto-círcito trifásico.

Sob esse viés, Strac e outros (2008) citam a representação gráfica de um transformador em ambientes 2D e 3D, objetivando estudar as forças eletromagnéticas que ocorrem no interior desse equipamento. Os autores concluem que os resultados obtidos em ambiente 2D são bastante próximos da representação realizada em 3D, consubstanciando as afirmações de Salon e outros (2000). Eles destacam vantagens da representação em 2D, como maior rapidez e menores esforços computacionais nos cálculos de forças eletromagnéticas, mas discorrem que o ambiente 3D permite um detalhamento mais próximo às características do equipamento.

Em sua dissertação, Rosentino (2010) relata que muitas falhas ocorrentes em transformadores se devem à diminuição da suportabilidade da isolação dos enrolamentos. O autor descreve que essa redução é causada por fenômenos eletroquímicos do líquido refrigerante (óleo), vibrações e deformações produzidas pelas forças eletromagnéticas durante a operação normal, sobretudo em condições de curto-círcito trifásico. Com base no método dos elementos finitos, ele utiliza uma modelagem espira por espira dos enrolamentos do transformador, o que eleva a fidedignidade à geometria do transformador e, como consequência, se obtém maior precisão nos resultados encontrados. Além disso, o pesquisador constata uma mudança comportamental das forças eletromagnéticas nos enrolamentos do transformador, quando estão alinhados de forma assimétrica, assunto também abordado por Barra, Rosentino e Delaiba (2016a).

Hyun-Mo e outros (2011), realizaram simulações computacionais baseadas no método dos elementos finitos, confrontando os valores encontrados com a metodologia analítica. Esses pesquisadores também verificaram grande proximidade nos resultados obtidos, indicando a modelagem computacional como utilidade para a concepção de transformadores. Hyun-Mo e

outros (2012), novamente por meio do MEF e com simulações 3D, destacam resultados já consolidados, como forças eletromagnéticas, na direção radial, compressivas no enrolamento interno e de tração para o enrolamento externo, ao passo que as forças eletromagnéticas axiais são compressivas nos enrolamentos do transformador.

Saraiva (2011) estudou possíveis alterações que poderiam ocorrer nos parâmetros do transformador, quando os enrolamentos apresentavam algum tipo de deformação. Para a verificação desses efeitos, a autora optou por analisar mudanças em parâmetros elétricos, magnéticos e mecânicos, as quais poderiam indicar um decaimento na vida útil do equipamento. Em seus estudos, Saraiva empregou o *Alternative Transient Program* (ATP) para modelar o transformador e o FLUX 3D, com base no MEF. Após a aplicação de deformações nos enrolamentos, verificou-se um aumento nas forças eletromagnéticas atuantes e alterações nos parâmetros dos transformadores, observados a partir de modelagens e simulações investigativas com o *Frequency Response Analysis* (FRA).

Em sua tese, Guimarães (2013) propõe uma metodologia analítica para estimar limites da suportabilidade mecânica dos enrolamentos do transformador, bem como determinar curvas que permitam analisar a redução de vida útil. O autor baseia-se no critério de fadiga abordado em Budynas e Nisbett (2010) para estruturas de aço, em que são determinadas curvas S-N para os enrolamentos.

Com base no MEF e a partir de simulações computacionais em 3D, Wang e outros (2016) verificaram que as deformações nos enrolamentos dos transformadores podem influenciar na distribuição de fluxo magnético – a alteração da densidade de fluxo magnética pode implicar no aumento do campo magnético e forças eletromagnéticas. A partir de um modelo proposto, os estudiosos verificaram que os impactos das forças advindas das correntes de curto-círcito são cumulativos nos enrolamentos do transformador.

De forma complementar, Cigré (1983), GCOI (1996), Souza (2008) e Bechara (2010) se referem a definições, causas e soluções das falhas em transformadores. Convém salientar que tais trabalhos fornecem importantes subsídios estatísticos relacionados às origens de falhas e taxas de falhas de componentes.

No que diz respeito à teoria de transformadores, os livros de ABB (2004), Kulkarni e Kharpade (2004) e Heathcote (2007), que possuem renome internacional, descrevem princípios de projeto, construção, operação, manutenção, especificação e aquisição de transformadores. Logo, essas obras são fundamentais para compreender fenômenos físicos relacionados aos estresses eletromecânicos em transformadores, além de tratarem assuntos gerais pertinentes à temática de transformadores.

Adicionalmente, Kindermann (1997) e Delaiba (2006) fornecem informações, detalhes e cálculos analíticos primordiais, no que se refere à análise de equipamentos elétricos frente às condições normais de operação e, sobremaneira, às condições de curtos-circuitos.

1.4 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação tem por objetivo geral o estudo das forças eletromagnéticas e dos estresses eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores e seus desdobramentos, tomando como base metodologias analíticas e simulações computacionais. Além disso, alguns objetivos específicos podem ser destacados:

- Estimativa dos esforços eletromecânicos em transformadores sob faltas simétricas e assimétricas e energizações;
- Comparação entre os esforços eletromecânicos sob as condições analisadas, com base no conceito de distância Euclidiana;
- Vislumbrar os desdobramentos das alterações no sistema elétrico nos esforços eletromecânicos;
- Apresentação de uma estratégia capaz de, a partir de dados elétrico e mecânico, estimar e avaliar a margem de segurança da operação de transformadores, quando são submetidos aos esforços eletromecânicos oriundos das elevadas correntes transitórias;
- Comparação da margem de segurança estimada por meio da metodologia analítica, com aquela obtida a partir das simulações computacionais, com o intuito de atestar a eficácia do cálculo analítico de forma prática.

1.5 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

A partir da contextualização do tema e do estabelecimento de diretrizes que nortearam a concepção da presente pesquisa, salientam-se as seguintes contribuições apresentadas por esta dissertação, na temática de esforços eletromecânicos em transformadores:

- Estimativa dos esforços eletromecânicos advindos de faltas assimétricas;
- Aperfeiçoamento da metodologia analítica para cálculo das forças eletromagnéticas decorrentes de faltas assimétricas;

- Comparação das severidades associadas a cada tipo de falta, por meio do conceito de distância Euclidiana, amplamente aplicado em afundamentos de tensão;
- Proposição de uma estratégia capaz de avaliar a margem de segurança de determinado transformador alocado em um dado sistema elétrico, considerando as suas peculiaridades.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além do presente capítulo introdutório, esse trabalho é estruturado da seguinte forma:

**Capítulo II ORIGENS DAS FALHAS MECÂNICAS EM
TRANSFORMADORES E METODOLOGIA ANALÍTICA
PARA CÁLCULO DOS ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS**

Este capítulo visa apresentar, de forma resumida, a definição e conceituação das forças eletromagnéticas atuantes nos enrolamentos dos transformadores advindas de quaisquer correntes, além de abordar as correntes de energização e correntes devidas às faltas simétricas e assimétricas. Posteriormente, este capítulo cita uma metodologia analítica para estimativa de forças radiais, axiais e seus estresses, com destaque para os respectivos tipos de falhas passíveis de ocorrência para cada modalidade de força. Complementarmente é aplicada a metodologia analítica em um transformador trifásico de 15 kVA, assim como o conceito de distância Euclidiana, com a intenção de comparar os esforços dos eventos sob análise.

**Capítulo III AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS EM
TRANSFORMADORES UTILIZANDO O MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS**

Este capítulo, com o método dos elementos finitos por meio do FEM, traz uma avaliação dos esforços eletromecânicos em transformadores trifásicos resultantes de energizações, faltas simétricas e assimétricas – sob essas condições, em segundo momento, um desalinhamento entre enrolamentos da fase B é

avaliado. Ademais, apresenta-se a influência positiva da inserção de uma resistência de aterramento entre o neutro e o terra do transformador nas forças eletromagnéticas causadas por faltas assimétricas é apresentada.

Capítulo IV**ESTRATÉGIA PARA VERIFICAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE TRANSFORMADORES SOB A ÓTICA DA SUPORTABILIDADE MECÂNICA**

Este capítulo concerne a uma estratégia capaz de avaliar a margem de segurança de um dado transformador com suas peculiaridades, ao ser alocado num determinado sistema elétrico, com suas características no que diz respeito ao nível de curto-circuito. Nesse contexto, apresenta-se as etapas para a determinação analítica do coeficiente de margem de segurança, que é confrontado com sua obtenção com base no MEF. Posteriormente a isso, uma demonstração da aplicação é exposta, utilizando-se um transformador trifásico de 15 kVA. Por meio de estudos de caso, um transformador de 5 MVA é avaliado no que tange à sua margem de segurança na medida em que o sistema elétrico sofre alterações.

Capítulo V**CONCLUSÕES**

Este capítulo apresenta uma síntese das principais contribuições do presente trabalho e as respectivas conclusões finais. Além disso, destacam-se algumas sugestões para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Por fim, apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas para a concepção e o desenvolvimento desta dissertação.

CAPÍTULO II

ORIGENS DAS FALHAS MECÂNICAS EM TRANSFORMADORES E METODOLOGIA ANALÍTICA PARA CÁLCULO DOS ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

FRENTE a certas condições operacionais, a magnitude da corrente passante pelos enrolamentos do transformador pode ser superior muitas vezes a corrente nominal, fazendo com que existam forças eletromagnéticas intensas nos enrolamentos. Diante disso, as amarrações devem ser suficientes, no sentido de impor uma sustentação mecânica adequada aos componentes que constituem o equipamento. Outrossim, a concepção física e a propriedade dos materiais utilizados não devem sofrer deformações permanentes ou fratura, na presença de esforços eletromecânicos causados por quaisquer correntes elevadas (DEL VECCHIO et al., 2002).

Diante disso, este capítulo aborda os seguintes itens:

- Definição das forças eletromagnéticas atuantes nos enrolamentos dos transformadores, originadas por quaisquer correntes;
- Apresentação resumida das correntes de energização, curtos-circuitos e suas formulações;
- Apresentação de uma metodologia analítica para cálculo das componentes radiais e axiais das forças e dos estresses originados por elas;

- Exposição dos diferentes tipos de esforços possíveis de ocorrer nos enrolamentos do transformador e os respectivos tipos de falhas;
- Aplicação da metodologia analítica em um transformador trifásico de 15 kVA e comparação da severidade dos esforços por meio de distâncias Euclidianas.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS

Em consonância com a teoria eletrodinâmica, tem-se que a densidade volumétrica de força magnética na bobina de um transformador, por exemplo, é resultado do produto vetorial da densidade de corrente na bobina pela densidade de fluxo magnético de dispersão. Essa correlação está apresentada na Equação 2.1 e fundamentada na expressão básica das forças de Lorentz (WATERS, 1966; HAYT Jr.; BUCK, 2012).

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

Em que:

\vec{F} : Densidade volumétrica de força magnética [N/m^3];

\vec{J} : Densidade superficial de corrente [A/m^2];

\vec{B} : Densidade de fluxo magnético de dispersão [T].

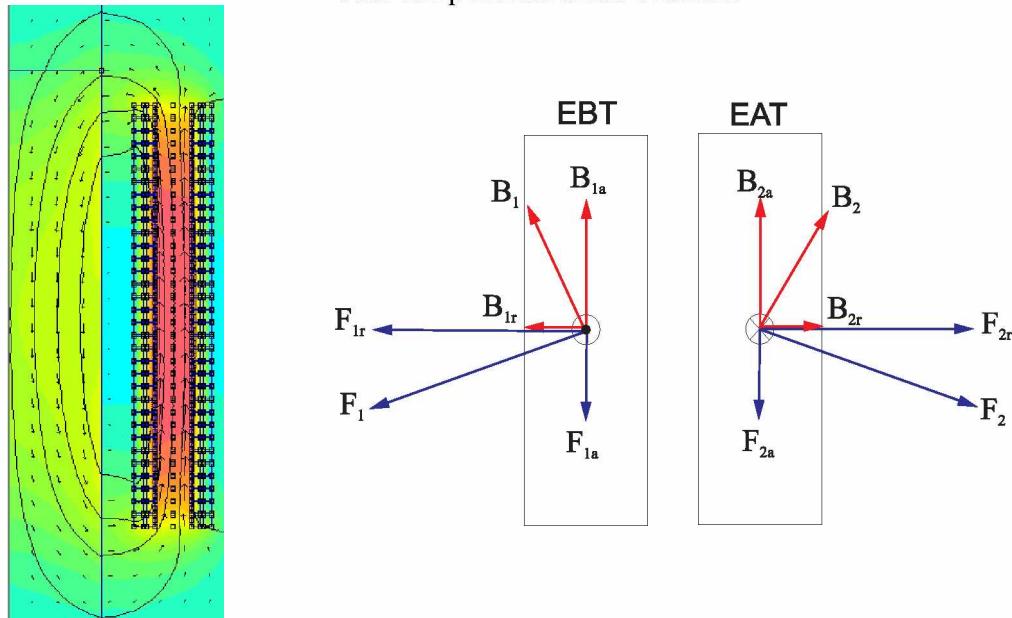
De maneira simplificada, percebe-se a partir da Equação 2.1 que as forças eletromagnéticas são originadas na interação entre as componentes das densidades de fluxo de dispersão e a corrente circulante nos enrolamentos. Fica claro que, em regime nominal de operação, os enrolamentos do transformador estarão expostos à pequenas forças eletromagnéticas, tendo em vista que o fluxo de dispersão é desprezível nessa condição operacional.

Em contrapartida, sob a ação de fenômenos elétricos transitórios, tais como energizações e curtos-circuitos, e diante de correntes elevadas, o fluxo de dispersão atinge valores expressivos. Isso faz com que as forças eletromagnéticas e os esforços eletromecânicos alcancem magnitudes acentuadas.

Nesses termos, a distribuição de fluxo magnético de dispersão ocorre quase que exclusivamente em sua componente axial (B_a), ou seja, linhas de fluxo paralelas aos enrolamentos. Observa-se que, na altura dos enrolamentos, pouco existe a componente radial

(B_r), que passa a estar apenas nas extremidades dos enrolamentos, onde o fluxo magnético se inclina, buscando o menor caminho de retorno (ABB, 2004). Esses fatos também podem ser constatados na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Campo de dispersão e decomposição das forças eletromagnéticas e do fluxo magnético em suas componentes axiais e radiais.



Fonte: Autor.

A inclinação das linhas de fluxo, ao se buscar o menor caminho de retorno, implica na decomposição do campo de dispersão em duas componentes, quais sejam: radial (B_r) e axial (B_a). Diante disso e a partir do desenvolvimento da Equação 2.1 em forma vetorial, perceber-se-á que a interação da densidade de fluxo magnético de dispersão axial com a corrente do enrolamento origina as forças radiais (F_r).

Ademais, constata-se que a interação da densidade de fluxo magnético de dispersão radial com a corrente do enrolamento ocasiona as forças axiais (F_a). A decomposição da força eletromagnética, formulada na Equação 2.1, dá origem, portanto, às forças axiais e radiais, conforme a Equação 2.2 e 2.3 (STRAC; KELEMEN; ZARKO, 2008).

$$\vec{F}_a = \vec{F} \times \vec{a}_z \quad (2.2)$$

$$\vec{F}_r = (\vec{F} \times \vec{a}_x) \cdot \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{x}{y}\right)\right) + (\vec{F} \times \vec{a}_y) \cdot \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{x}{y}\right)\right) \quad (2.3)$$

2.3 CURTOS-CIRCUITOS

Na concepção dos sistemas elétricos de potência, buscam-se sempre projetos eficientes de especificações adequadas, com materiais de qualidade comprovada, prevendo a execução da obra e sua instalação da melhor qualidade, ao considerar a relação custo-benefício. Todavia, o sistema ainda estará exposto às condições mais diversas e imprevisíveis, sendo que falhas podem aparecer em pontos aleatórios do sistema.

No que se refere aos curtos-circuitos, pode-se classificá-los como permanentes ou temporários. Nas palavras de Kindermann (2004), a ocorrência de curtos-circuitos temporários (fortuitos) é bem mais frequente, com 96% dos eventos, o que infelizmente não alivia o sistema elétrico, no que tange aos efeitos mecânicos, tendo em vista que os equipamentos enxergarão, da mesma forma, a corrente de curto-círcito assimétrica nos primeiros ciclos.

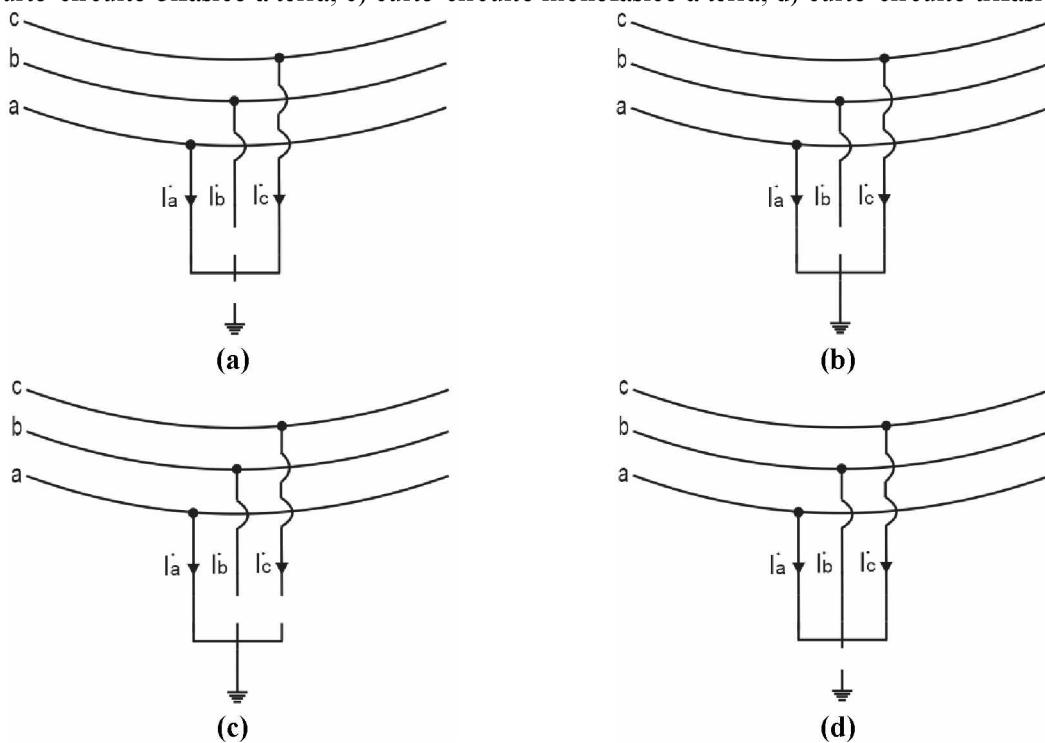
A maior presença de curtos fortuitos justifica a necessidade de religadores nos sistemas elétricos. Os curtos temporários e permanentes são oriundos de várias causas, tais como sobretensões na rede (o que propicia *flashover* ou *blackflashover*), contaminação do isolador pela poeira e poluição, umidade, chuva, salinidade, galhos de árvores, pássaros, ventos, acidentes de trânsito e demais causas.

Em sistemas trifásicos, os curtos-circuitos são classificados em quatro tipos, conforme a Figura 2.2. Em observância a essa figura, nota-se, até mesmo pela natureza física dos tipos de curtos-circuitos, que o curto-círcito trifásico é o menos ocorrente, apesar de ser, via de regra, o mais severo. As porcentagens médias de ocorrência de cada tipo de curto-círcito já foram citadas na Figura 1.4, justificando estudos referentes aos esforços eletromecânicos advindos de curtos-circuitos além dos trifásicos.

Contudo, em prática comum, projeta-se o transformador para que suporte em seus terminais, os curtos-circuitos trifásicos e as respectivas implicações térmicas e dinâmicas. Dessa forma, ele suportará as solicitações advindas dos outros tipos de curto-círcito (WATERS, 1966).

De fato, as correntes de curto-círcito devem ser conhecidas nos diversos pontos do sistema elétrico, conforme os variados tipos de defeito. O conhecimento da corrente de curto-círcito atende a vários objetivos importantes, tais como: conhecimento da magnitude da corrente de curto, especificação de equipamentos, especificação de transformadores de corrente, ajuste e coordenação de relés, estimativa de esforços eletromecânicos, entre outros.

Figura 2.2 - Tipos de faltas ocorrentes em sistemas elétricos de potência. a) curto-circuito bifásico; b) curto-circuito bifásico à terra; c) curto-circuito monofásico à terra; d) curto-circuito trifásico.



Fonte: Adaptado de Kindermann (2004).

Nesse sentido, a metodologia de cálculo das correntes de curto-circuito se mostra importante, sendo ressaltada de forma breve na sequência deste trabalho.

2.3.1 Curtos-Circuitos Trifásicos

Para análises térmicas relacionadas à corrente de curto-circuito trifásico, é preciso conhecer o valor eficaz dessa corrente, isto é, o valor simétrico ($I_{3\phi}$). Por outro lado, para análises dinâmicas se torna imprescindível saber do valor de pico dessa corrente, ou seja, o valor assimétrico ($I_{3\phi s}$).

Sabe-se que as correntes de curto-circuito trifásico são balanceadas; portanto, somente a sequência positiva é considerada. Nesse sentido, o valor eficaz (simétrico) pode ser obtido da seguinte forma:

$$I_{3\phi} = \frac{U_l}{\sqrt{3} \cdot Z} \quad (2.4)$$

Em que:

U_l : Tensão de linha nominal [V];

Z: Impedância acumulada de sequência positiva do circuito da entrada até o ponto em curto-circuito [Ω].

As solicitações dinâmicas, conforme mencionado anteriormente, são advindas da corrente de curto-circuito assimétrica, isto é, pelo maior valor instantâneo da corrente em questão. Para Grigolletto (2013), essa corrente máxima é obtida por intermédio de três diferentes equacionamentos, quais sejam: a “equação do meio ciclo”, tradicionalmente utilizada; as equações das normas IEC 60909 (2001) e IEEE Std-551 (2006), sendo a última reconhecida como correção da “equação do meio ciclo”.

Salienta-se que não é objetivo deste trabalho a comparação dos equacionamentos, utilizando como referência a IEC 60909 (2001). Detalhamentos referentes à comparação de metodologias das normas supracitadas são encontradas em Grigolletto (2013).

Nesse contexto, o maior valor de corrente é calculado a partir da expressão subsequente (IEC 60909, 2001):

$$I_{3\phi s} = f_i \cdot \sqrt{2} \cdot I_{3\phi} \quad (2.5)$$

Em que:

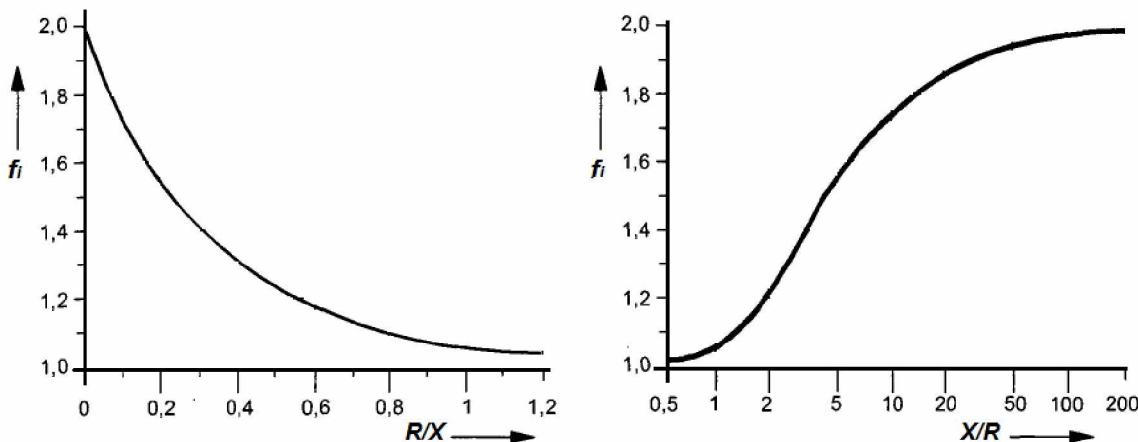
$f_i = f(R/X)$: Fator de assimetria ou impulso.

A Equação 2.5 mostra a forma de cálculo da corrente de curto-circuito assimétrica. Enfatiza-se que a aplicação do fator de impulso no valor de pico da corrente de curto-circuito simétrica também é válida para as correntes advindas dos outros tipos de curto-circuito (IEC 60909, 2001; EREMIA, SHAHIDEHPOUR, 2013). Ainda no que tange ao fator de assimetria, ele pode ser obtido a partir das características peculiares de cada circuito, como se segue:

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

Por meio da Equação 2.6, $f_i = f(R/X)$ e desta maneira, os valores de f_i para variações de R/X ou X/R podem ser também observados na Figura 2.3. De forma prática, também se pode utilizar a Tabela 2.1 que traz, para alguns valores discretos de relações R/X , os fatores de assimetria resultantes, e, ainda, fatores já multiplicados por $\sqrt{2}$, obtendo-se facilmente a relação entre as correntes de curto-circuito assimétrica e simétrica.

Figura 2.3 - Fator de assimetria em função das relações R/X e X/R.



Fonte: Adaptado de IEC 60909 (2001).

Tabela 2.1 - Valores para fator de impulso e fator resultante em função da relação R/X.

Relação R/X	1	0,67	0,5	0,33	0,25	0,2	0,167	0,125	0,1	≥ 0,07
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

Fonte: IEC 60076 (2000).

De maneira geral, ao determinar o nível de curto-circuito de uma instalação, verifica-se que o curto-circuito trifásico ocorre na saída do transformador; logo, a única impedância envolvida é a do próprio transformador. Nessa condição simplificada, a impedância a ser considerada é somente a do transformador, e o valor eficaz da corrente de curto-circuito trifásico pode ser encontrado pela Equação 2.7 (DELAIBA, 2006).

$$I_{3\phi} = \frac{U_l}{\sqrt{3} \cdot Z_{Traf\circ}} \quad (2.7)$$

Na qual:

$$Z_{Traf\circ} = \frac{Z\% \cdot U_l^2}{S_n \cdot 100} \quad (2.8)$$

Em que:

$Z\%$: Impedância percentual do transformador;

S_n : Potência aparente nominal do transformador [VA].

De forma a simplificar o cálculo da corrente de curto-circuito, substitui-se a Equação 2.8 na 2.7, resultando em:

$$I_{3\emptyset} = \frac{S_n \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot Z\% \cdot U_l} \quad (2.9)$$

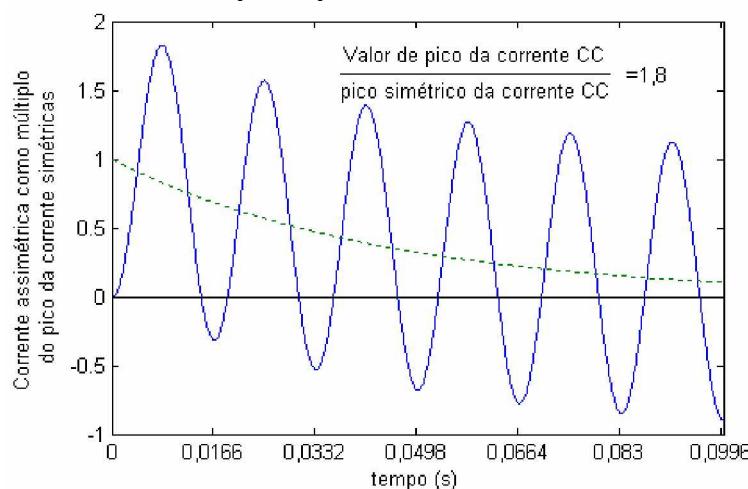
Por fim, como principal objetivo, a corrente assimétrica de curto-circuito é obtida por meio das Equações 2.5, 2.6 e 2.9, implicando em:

$$I_{3\phi s} = \frac{f_i \cdot \sqrt{2} \cdot S_n \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot Z\% \cdot U_l} = \frac{\left(1,02 + 0,98 \cdot e^{-\frac{R}{X}}\right) \cdot \sqrt{2} \cdot S_n \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot Z\% \cdot U_l} \quad (2.10)$$

É oportuno ressaltar que as forças produzidas são proporcionais ao quadrado da corrente apresentada Expressão 2.10 (Waters, 1966). Diante disso, o fator de assimetria se mostra ainda mais importante, uma vez que um fator de assimetria 1,8 implica em forças correspondentes ao primeiro pico de $1,8^2=3,24$ vezes maior que a corrente de curto-circuito simétrica.

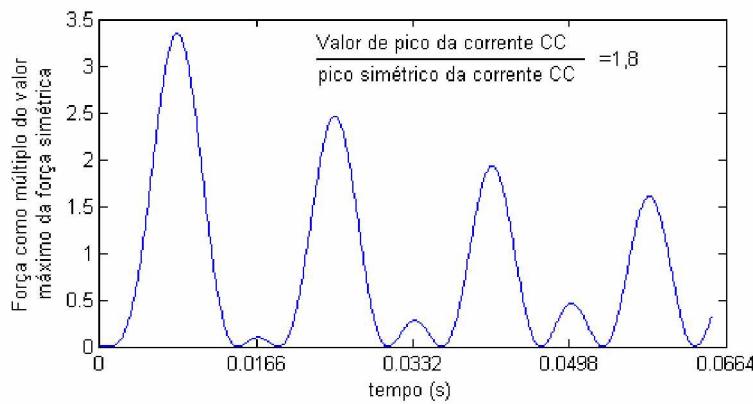
Com a pretensão de exemplificar tal fato, a Figura 2.4 mostra uma corrente de curto-circuito totalmente assimétrico, isto é, com fator de assimetria 1,8. Os efeitos são verificados na Figura 2.5, em que se pode observar o comportamento da força no domínio do tempo, em seus primeiros ciclos.

Figura 2.4 - Forma de onda da corrente de curto-circuito trifásico totalmente assimétrico como múltipla do pico da corrente simétrica.



Fonte: Waters (1966).

Figura 2.5 - Forma de onda da força eletromagnética imposta aos enrolamentos como múltipla do valor máximo da força simétrica.



Fonte: Waters (1966).

2.3.2 Curtos-Circuitos Assimétricos

Com 94% das ocorrências entre os curtos-circuitos (KINDERMANN, 1997), os curtos assimétricos representam a maioria absoluta dos eventos. Conforme a Figura 2.2, esses são: fase-fase ($I_{2\phi}$), fase-fase-terra ($I_{2\phi T}$) e fase-terra ($I_{\phi T}$).

As equações matemáticas que descrevem o comportamento das correntes elétricas dependem da utilização de componentes simétricas (FORTESCUE, 1918). Por tratar-se de uma formulação teórica extensa, todavia bastante difundida e conhecida, a Tabela 2.2 apresenta somente as expressões para as correntes em cada tipo de curto-círcuito. Não obstante, mais detalhamentos podem ser consultados em Fortescue (1918), Kindermann (1997) e Eremia e Shahidehpour (2013).

Tabela 2.2 - Expressões das correntes advindas dos curtos-circuitos assimétricos.

$\dot{I}_{2\phi}$	$\frac{-j\sqrt{3} \cdot \dot{E}_{a1}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$
$\dot{I}_{2\phi T}$	$\frac{3\dot{Z}_2 \cdot \dot{E}_{a1}}{\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_2 + (\dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f)(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2)}$
$\dot{I}_{\phi T}$	$\frac{3\dot{E}_{a1}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f}$

Fonte: Kindermann (1997).

Em que:

\dot{E}_{a1} : Tensão de sequência positiva [p.u.];

$\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dot{Z}_0$: Impedâncias de sequência positiva, negativa e zero [p.u.];

\dot{Z}_f : Impedância de falta entre fases ou entre fase e terra [p.u.].

Para a obtenção dos valores assimétricos dessas correntes ($I_{2\phi s}$, $I_{2\phi Ts}$ e $I_{\phi Ts}$), aplica-se, da mesma forma que no curto-círcuito trifásico, o fator de assimetria no valor de pico da corrente de curto-círcuito simétrica. Vale ressaltar que se utilizam as mesmas expressões e valores que foram utilizados para curtos trifásicos (IEC 60909, 2001; EREMIA; SHAHIDEHPOUR, 2013).

O fator de assimetria no valor de pico da corrente de curto-círcuito simétrica deve ser aplicado para todos os tipos de curto-círcuito. Vale ressaltar que se utilizam as mesmas expressões e valores que foram utilizados para o curto-círcuito trifásico (IEC 60909, 2001; EREMIA; SHAHIDEHPOUR, 2013).

2.3.3 Considerações Referentes ao Nível de Curto-Círcuito do Sistema

Muitas das vezes considera-se nos cálculos das correntes de curto-círcuito um nível de curto-círcuito (S_{cc}) infinito no ponto de entrada – valores muito elevados de S_{cc} . Nessas situações, a impedância de entrada (Z_e) é desprezível e o que limita os curtos-circuitos são as impedâncias dos transformadores. Todavia, ao desconsiderar a entrada, por mais que se tenha um S_{cc} elevado, os valores obtidos são ligeiramente superiores aos que realmente existirão.

Existem ainda outros fatores que limitam as correntes de curto-círcuito, como por exemplo a presença de transformadores em série e até mesmo, reatores com núcleo de ar que visam a redução propriamente dita das correntes de curto. Por outro lado, tem-se também a possibilidade de operação de transformadores em paralelo que podem interferir nesses valores.

Em se tratando de casos onde se deseja levar em conta a impedância representativa do nível de curto-círcuito no ponto de entrega, o cálculo dessa impedância pode ser feito conforme a seguinte equação:

$$Z_e = \frac{U_l^2}{S_{cc}} \quad [\Omega] \quad (2.11)$$

No sentido de simplificar cálculos, a impedância em questão pode ser facilmente calculada em por unidade na base de potência do transformador, S_n , com auxílio da Equação 2.12.

$$Z_e = \frac{S_n}{S_{cc}} \text{ [p. u.]} \quad (2.12)$$

Por meio da Equação 2.12 não há necessidade de referir a impedância característica do sistema para o secundário do transformador.

Diante do exposto, em projetos onde a otimização é algo primordial, ou até mesmo, quando se queira levar em conta o referido nível de curto-circuito, a impedância equivalente não é somente a do transformador, mas a soma de todas as impedâncias até o ponto em que o curto-circuito ocorre, como descrito na Equação 2.13.

$$Z_{eq} = Z_{Traf} + Z_e + Z_{outros} \quad (2.13)$$

Em que:

Z_{eq} : Impedância equivalente, levando-se em consideração todos os elementos do sistema [p.u.];

Z_{outros} : Impedância dos demais elementos, tais como cabos e barramentos [p.u.].

Deve-se salientar ainda que as distribuidoras de energia elétrica são responsáveis por fornecer a potência de curto-circuito no ponto de entrega, permitindo a realização dos cálculos apresentados. Além disso, a potência de nível de curto-circuito dada em sua forma complexa permite o cálculo da relação R/X do sistema, sendo possível estimar o f_i e consequentemente, as correntes assimétricas de curto-circuito.

2.4 CORRENTES DE *INRUSH*

Em virtude da magnetização e saturação do núcleo ferromagnético do transformador, surgem as correntes transitórias de energização (*inrush*). No entanto, por definição, essas correntes são originadas por quaisquer variações abruptas de tensão nos enrolamentos (GREENWOOD, 1991).

Nesse entremeio, a ocorrência de faltas externas aos transformadores, ao reestabelecer a tensão após a extinção da falta, também pode originar as correntes de energização (APOLÔNIO, 2004). Entretanto, afirma-se que nas correntes de *inrush*, devido a energizações, se consideram os casos mais severos – as altas correntes podem ser entendidas até mesmo com faltas internas, provocando disparos indesejados dos relés de proteção (LING; BASAK, 1988).

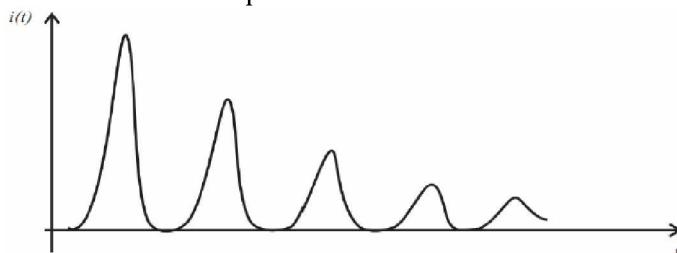
Existe o interesse em conhecer o comportamento da corrente de *inrush*; seu valor máximo, principalmente; e, por vezes, a taxa de decaimento da corrente. A amplitude dessas correntes é dependente de vários fatores, e os principais são o instante de chaveamento e a existência ou não de magnetismo residual no núcleo.

Verifica-se que a referida corrente pode atingir valores de pico que multiplicam várias vezes a amplitude da corrente nominal. Contudo, os desdobramentos das correntes de *inrush* não são investigados da mesma forma que as de curto-círcuito, no que tange à suportabilidade mecânica do transformador (KULKARNI; KHAPARDE, 2004).

Por outro lado, pesquisas realizadas anteriormente constatam que tais correntes também podem ocasionar dano aos enrolamentos dos transformadores, sob o ponto de vista dos esforços eletromecânicos (ADLY, 2001; STEURER; FRÖHLICH, 2002; FAIZ; EBRAHIMI; NOORI, 2008; NEVES et al., 2011; GUIMARÃES et al., 2013).

A Figura 2.6 mostra a forma de onda típica de uma corrente de *inrush* no caso mais desfavorável possível, no que tange ao chaveamento, ou seja, quando a forma de onda da tensão passa pelo valor nulo.

Figura 2.6 - Forma de onda típica de corrente de *inrush* de transformadores.



Fonte: Kulkarni e Kharpade (2004).

No que diz respeito ao equacionamento da corrente de *inrush*, estimativas analíticas do valor do primeiro pico, além da estimativa da atenuação da amplitude dessa corrente, esses e mais detalhamentos são encontrados em Kulkarni e Kharpade (2004). Salienta-se ainda que, por este ser um assunto bastante difundido e conhecido, não fora dado nesse trabalho grandes detalhamentos.

2.5 FALHAS ELETROMECÂNICAS EM TRANSFORMADORES

Mecanicamente, as condições normais de operação e até mesmo de sobrecarga pouco afetam a suportabilidade mecânica dos enrolamentos do transformador, fato que já fora

observado neste trabalho por meio da Equação 2.1. Contudo, em condições de curtos-circuitos quaisquer ou energizações, as elevadas correntes transitórias associadas aos campos de dispersão podem implicar na deformação e/ou no deslocamento dos enrolamentos.

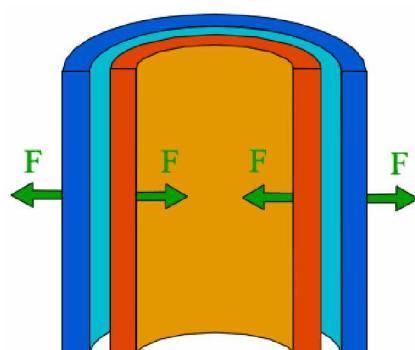
Geralmente, os danos mecânicos não são perceptíveis de imediato, pois dificilmente o esforço eletromecânico imposto aos enrolamentos do transformador é maior que o admissível por eles. Entretanto, a suportabilidade mecânica dos enrolamentos é reduzida de maneira gradativa, fazendo com que a capacidade em suportar novos eventos seja menor; por conseguinte, a vida útil poderá ser reduzida (GUIMARÃES, 2013; ARAUJO et al., 2016).

Conforme apresentado anteriormente, as forças eletromagnéticas podem ser decompostas em forças axiais e radiais. Assim, ressaltam-se em sequência as falhas mecânicas em enrolamentos devido aos esforços eletromecânicos advindos de forças radiais e axiais em transformadores do tipo de núcleo envolvido. As falhas para transformadores com núcleo envolvente se diferem das que serão citadas aqui, mas podem ser encontradas em Waters (1966).

2.5.1 Forças Radiais: Equacionamentos e Implicações

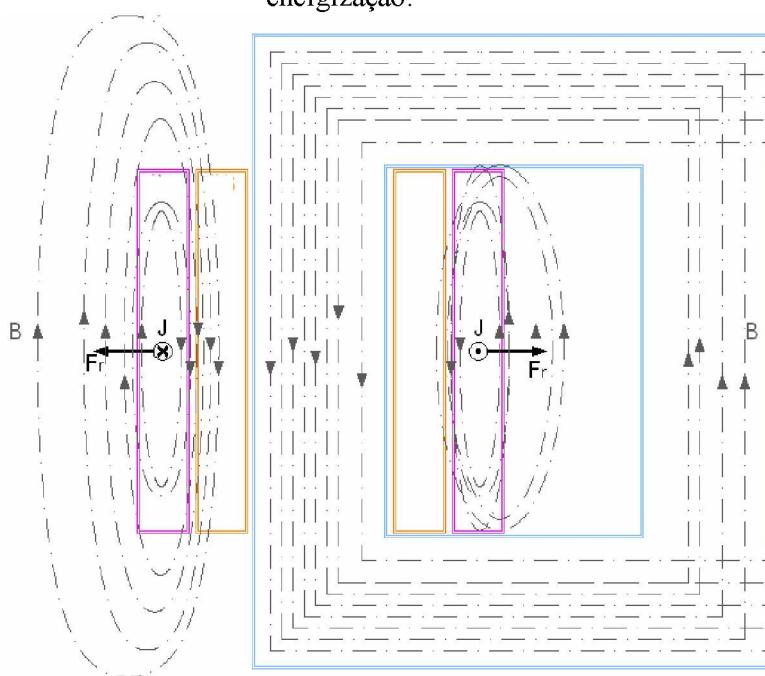
Forças radiais são originadas pela componente axial de fluxo magnético (B_a) e podem produzir alguns efeitos peculiares nos enrolamentos dos transformadores. Em equipamentos do tipo núcleo envolvido, as forças eletromagnéticas radiais tendem a tracionar os enrolamentos externos (estresses de tração) e a comprimir os enrolamentos internos (estresses de compressão) (ROSENTINO, 2010; CIGRE, 2002), conforme a Figura 2.7. Em se tratando de correntes de *inrush*, ao realizar a energização pelo enrolamento externo, por exemplo, a ação das forças pode ser observada na Figura 2.8.

Figura 2.7 - Ação das forças eletromagnéticas radiais nos enrolamentos externo e interno do transformador.



Fonte: Adaptado de Aguiar (2007).

Figura 2.8 - Ação das forças eletromagnéticas radiais no enrolamento externo em condições de energização.



Fonte: Adaptado de CHESF e UFU (2008).

Como consequências das deformações oriundas das forças eletromagnéticas radiais, há (MCNUTT et al., 1970; BJERKAN, 2005; AGUIAR, 2007):

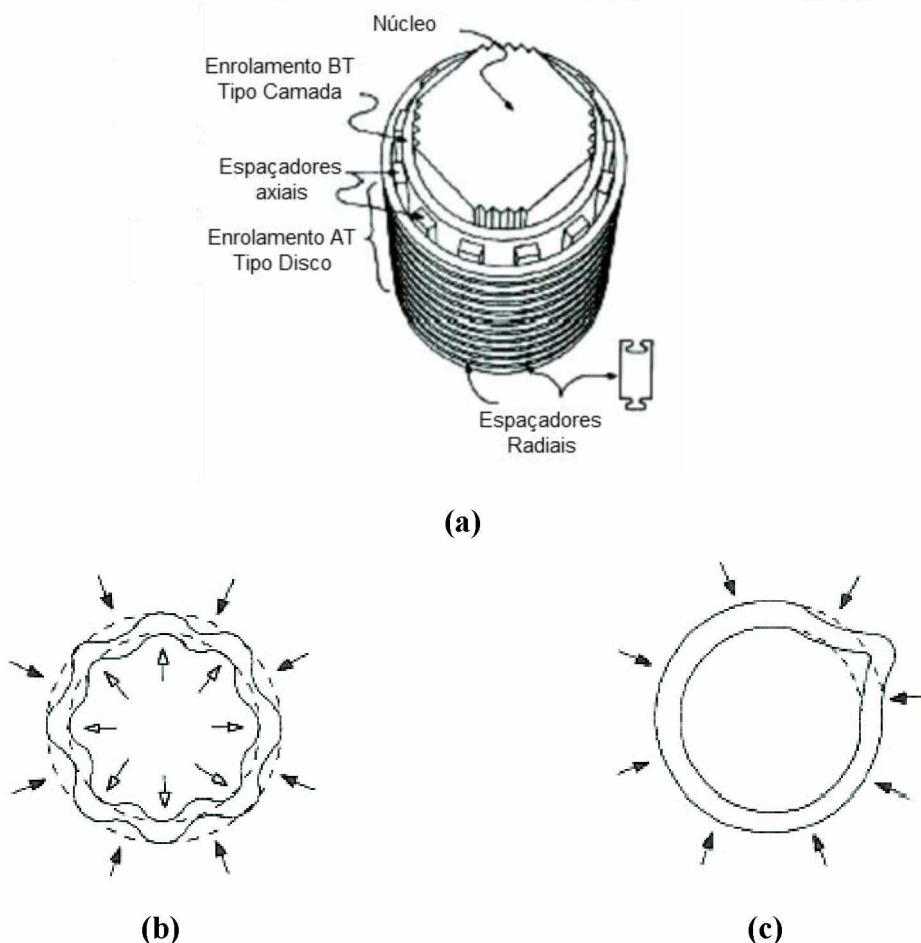
- Alongamento do isolante que reveste os condutores dos enrolamentos. Tal alongamento é altamente prejudicial, uma vez que degrada significativamente o material isolante, reduzindo a vida útil do transformador;
- Diminuição das distâncias de isolação entre o núcleo e o enrolamento interno. Além da possível mudança da distribuição de fluxo magnético no interior do transformador, partes do material isolante poderão estar expostas a maiores estresses elétricos e se reduzirá a capacidade do transformador em suportar surtos de tensão;
- Redução das distâncias de isolação entre o tanque e o enrolamento externo e entre enrolamentos. Os efeitos são os mesmos destacados no item anterior;
- Afrouxamento nas amarrações dos enrolamentos, o que permite a mobilidade aos condutores. Com isso, as vibrações são mais intensas e levam, em longo prazo, à fadiga do material isolante e das conexões. Além disso, o afrouxamento nas amarrações reduz a robustez do transformador, frente às solicitações impostas pelo sistema, como curtos-circuitos trifásicos, bifásicos, monofásicos, entre outros.

Os enrolamentos externos estão sujeitos às forças de tração, e por consequência, ao estresse de tração (*hoop stress*). Caso o limite de escoamento do condutor seja ultrapassado, valores de força superiores a esse limite podem implicar em danos à isolação do condutor.

Em se tratando de deformações, essa em sua forma radial, é mais ocorrente no enrolamento interno (CIGRE, 2002). Esses enrolamentos estão sujeitos a forças compressivas implicado em deformações de duas maneiras distintas. A primeira é chamada de “curvatura forçada” (*forced buckling*) – Figura 2.9b – que ocorre quando o enrolamento interno está firmemente sustentado por espaçadores axiais, conforme a Figura 2.9a.

Outra forma de deformação é denominada como “curvatura livre” (*free buckling*), em que o condutor se deforma livremente nos dois sentidos radiais em um ou mais pontos da espira do enrolamento (WATERS, 1966; CIGRE, 2002), como pode ser verificado na Figura 2.9c.

Figura 2.9 - Deformações devido às forças compressivas no enrolamento interno: (a) Ilustração dos espaçadores axiais e outros componentes do transformador; (b) *forced buckling*; (c) *free buckling*.



Fonte: CIGRE (2002) e Rosentino (2010).

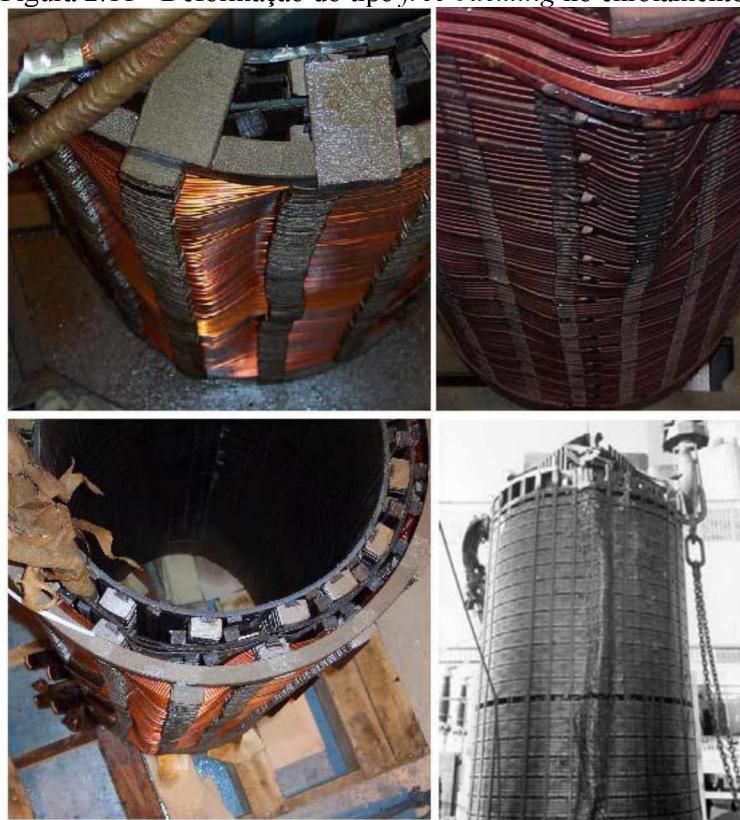
As Figuras 2.10 e 2.11 se referem, respectivamente, às deformações do tipo *forced buckling* e *free buckling* em transformadores reais.

Figura 2.10 - Deformação do tipo *forced buckling* no enrolamento.



Fonte: Bjerkan (2005).

Figura 2.11 - Deformação do tipo *free buckling* no enrolamento.



Fonte: Rosentino (2010).

Diante das implicações físicas, objetiva-se apresentar na sequência os principais equacionamentos relacionados às forças radiais e os respectivos efeitos. Salienta-se que mais detalhamentos podem ser encontrados em Waters (1966) e Cigré (2002).

A força radial atuante sobre o enrolamento interno ou externo pode ser determinada por meio da Equação 2.14 (WATERS, 1966).

$$F_r = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_\alpha)^2 \cdot D_m}{h} \cdot 10^{-7} [N] \quad (2.14)$$

Em que:

n : Número de espiras do enrolamento a ser analisado;

I_α : Valor da corrente de pico do evento α a ser analisado, isto é, valor das correntes assimétricas dos curtos-circuitos ou do pico da corrente de *inrush* [A];

D_m : Diâmetro médio do enrolamento analisado [m];

h : Altura do enrolamento [m].

A força radial dita como média (F_{rmed}) nas duas metades opostas do enrolamento é equivalente à pressão no diâmetro, enquanto a força radial (F_r) anteriormente calculada se equivale à pressão na circunferência πD_m .

Nesse sentido, a força média pode ser encontrada da seguinte forma:

$$F_{rmed} = \frac{F_r}{\pi} = \frac{2\pi \cdot (nI_\alpha)^2 \cdot D_m}{h} \cdot 10^{-7} [N] \quad (2.15)$$

Enquanto isso, a força radial distribuída ao longo de cada espira do enrolamento pode ser calculada pela Expressão 2.16.

$$F_{rad-dist} = \frac{2\pi \cdot n \cdot I_\alpha^2}{h} \cdot 10^{-7} [N/m] \quad (2.16)$$

Por fim, é possível calcular o estresse médio de tração no enrolamento, dado pela Equação 2.17.

$$\sigma_{r-médio} = \frac{F_{rad-dist} \cdot D_m}{2 \cdot b \cdot e} = \frac{F_{rad-dist} \cdot D_m}{2 \cdot a_c} [N/m^2] \quad (2.17)$$

Em que:

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

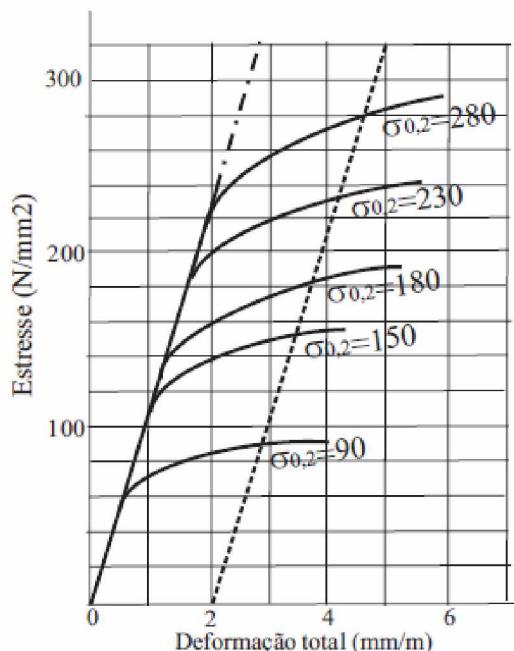
b: Distância axial do condutor [m];

e: Distância radial do condutor [m].

Convém dizer que o valor de estresse radial médio proporciona um referencial, no que tange às comparações com a suportabilidade mecânica dos enrolamentos do transformador. Muitas vezes, apenas compara-se esse valor encontrado com estresse admissível, fornecido pelo fabricante e conhecido na literatura como $\sigma_{0,2}$ ou $\sigma_{\text{máx}}$.

De modo a exemplificar tal fato, a Figura 2.12 ilustra os resultados obtidos de um resultado de tração *versus* deformação, o que indica, para uma prova de cobre com vários níveis de dureza, os respectivos valores críticos. A Figura 2.12 diz respeito ao estresse aplicado ao material que resulta em aproximadamente 0,2% de deformação permanente nele, valor aceitável para deformação. No entanto, é comum na prática a utilização de 80% desse valor ou 85% do estresse aplicado que resulte em 0,1% de deformação (CIGRE, 2002).

Figura 2.12 - Ensaio estresse *versus* deformação para vários níveis de dureza do cobre.



Fonte: CIGRE (2002).

As formulações e considerações salientadas anteriormente são válidas tanto para o enrolamento interno quanto para o externo. Todavia, conforme já discutido, o enrolamento interno é detentor de algumas particularidades, haja vista que este está sujeito às deformações do tipo *forced buckling* e *free buckling*.

Nesses termos, o valor crítico de estresse por efeito *buckling* pode ser calculado pela Expressão 2.18 (CIGRE, 2002).

$$\sigma_{crit-buckling} = \frac{E_c \cdot Esp_{axial}^2}{12} \cdot \left(\frac{e}{D_m} \right)^2 [N/m^2] \quad (2.18)$$

Em que:

E_c : Módulo de elasticidade do condutor [N/m²];

Esp_{axial} : Quantidade de suportes axiais.

Em contrapartida, a Equação 2.19 fornece o estresse por efeito *buckling*.

$$\sigma_{medio-buckling} = \frac{F_{rad-dist} \cdot L_{axial}^2}{2 \cdot b \cdot e^2} [N/m^2] \quad (2.19)$$

Em que:

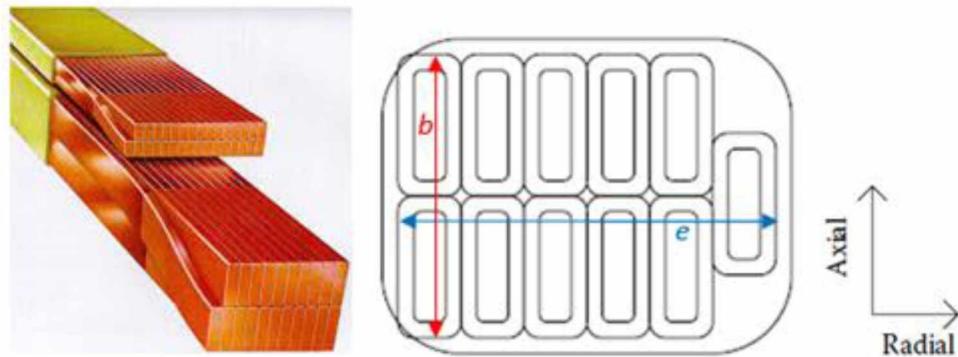
L_{axial} : Distância entre os suportes axiais [m];

Para a aplicação do equacionamento exposto, é necessário conhecer o tipo de cabo empregado para a construção dos enrolamentos do equipamento, visto que as dimensões axiais e radiais, b e e não são fornecidas de forma direta pelos fabricantes. Geralmente, os condutores utilizados em grandes transformadores são formados por um conjunto de fios continuamente transpostos (Cabo CTC), ou por um único fio magnético retangular (MW), também conhecido como cabo geminado ou *flat conductor*.

Em se tratando dos cabos do tipo CTC, o conjunto de fios que o compõem podem estar colados entre si por resina (*resin bonded* CTC) ou não (*CTC non-bonded*) (DEL VECCHIO et al., 2002). A estrutura do CTC é ilustrada na Figura 2.13, em que se mostram as dimensões b e e de tal cabo.

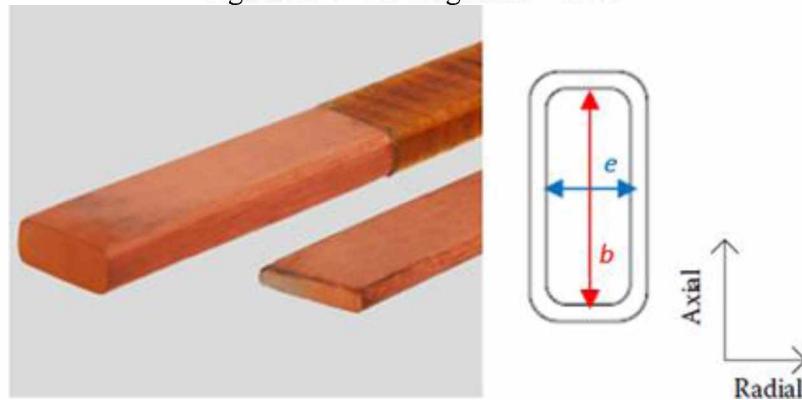
Uma característica do MW é seu nivelamento, que permite a associação em paralelo de condutores (DEL VECCHIO et al., 2002). A estrutura do MW é ilustrada na Figura 2.14, juntamente com as dimensões b e e desse tipo de cabo.

Figura 2.13 - Cabo transposto - CTC.



Fonte: Rosentino, Delaiba e Prévost (2017).

Figura 2.14 - Fio magnético - MW.



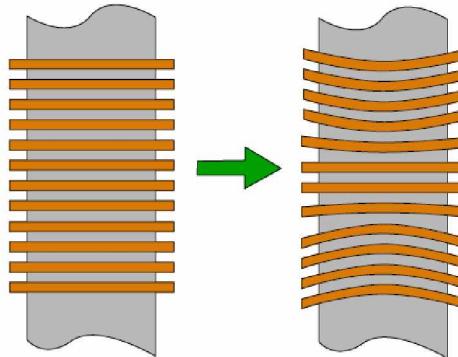
Fonte: Rosentino, Delaiba e Prévost (2017).

2.5.2 Forças Axiais: Equacionamentos e Implicações

As forças axiais são originadas pela componente radial do fluxo magnético (B_r) e produzem um efeito de compressão axial nos enrolamentos. Sob esse efeito, os enrolamentos podem se curvar entre os espaçadores isolantes localizados radialmente, ou se inclinarem entre si – esse último fenômeno é passível de ocorrer em transformadores com enrolamentos do tipo disco, comumente usados em transformadores de potência elevada.

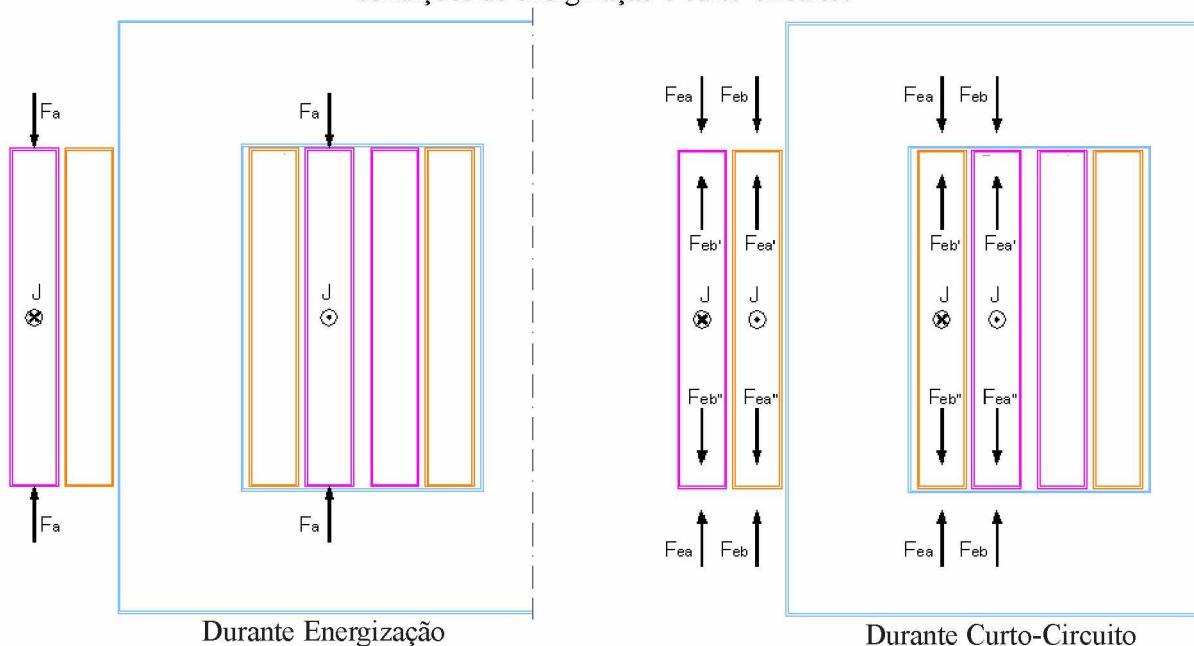
Com a finalidade de ilustrar esse tipo de deformações, a Figura 2.15 diz respeito a uma deformação axial no enrolamento de um transformador figurativo. Por outro lado, a ação das forças axiais é observada sob as condições de curto-círcuito e energizações na Figura 2.16.

Figura 2.15 - Deformação axial em um dos enrolamentos do transformador.



Fonte: Aguiar (2007).

Figura 2.16 - Ação das forças eletromagnéticas axiais nos enrolamentos externo e interno em condições de energização e curto-círcuito.



Fonte: Adaptado de CHESF e UFU (2008).

As consequências desse tipo de deformação são (AGUIAR, 2007):

- Torção dos condutores dos enrolamentos. Isso faz com que haja estiramento e/ou esmagamento do material isolante que reveste os condutores, reduzindo a vida útil do transformador;
- Diminuição da rigidez mecânica do disco de compressão ou a respectiva quebra, o que permite o deslocamento do enrolamento, as vibrações e a diminuição da suportabilidade mecânica;

- Afrouxamento nas amarrações dos enrolamentos, reduzindo a robustez do transformador frente às solicitações transitórias impostas pelo sistema elétrico, além de vibrações e fadiga do material isolante e conexões.

Complementarmente às figuras apresentadas, a Figura 2.17 se refere a um transformador real, com colapso axial originado por uma carga excessiva de força compressiva nos enrolamentos.

Figura 2.17 - Colapso axial devido a uma força axial excessiva causada por um curto-círcuito.



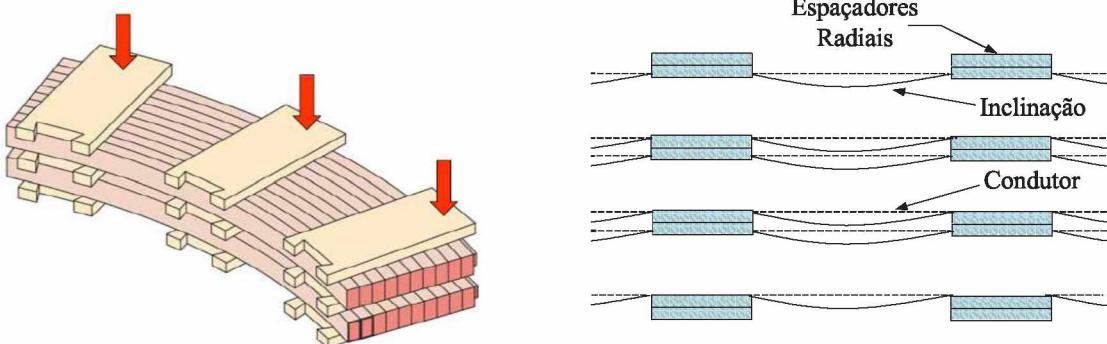
Fonte: Doble (2006).

Ademais, outros dois tipos de falhas relacionadas às forças eletromagnéticas axiais devem ser citados, quais sejam: flexão entre espaçadores radiais (*bending*) e tombamento (*tilting*).

Sob a ação de forças axiais compressivas, o condutor do enrolamento pode se inclinar entre os espaçadores isolantes localizados radialmente, conforme Figura 2.18 – tal inclinação no condutor pode resultar em danos à isolação. De forma contrária ao verificado com os esforços devido às forças radiais, a curvatura da deformação se dá num plano vertical e não horizontal (AZEVEDO, 2007).

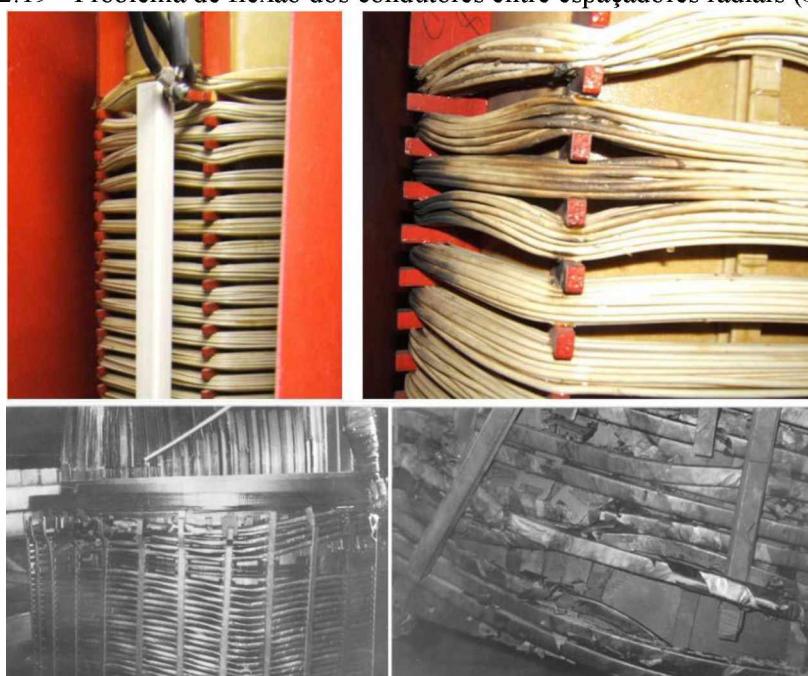
A Figura 2.19 ilustra, em transformadores reais, a ocorrência do fenômeno *bending*.

Figura 2.18 – Ilustração dos espaçadores radiais e da inclinação dos condutores entre espaçadores (*bending*).



Fonte: Adaptado Rosentino (2010).

Figura 2.19 - Problema de flexão dos condutores entre espaçadores radiais (*bending*).

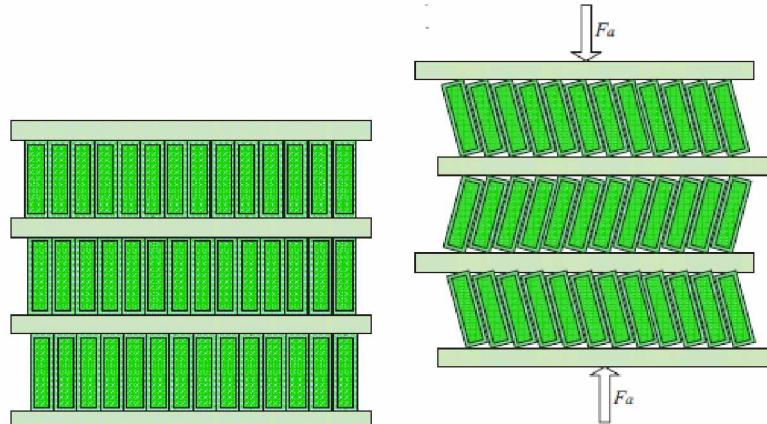


Fonte: Rosentino (2010).

Ainda como efeito dos esforços oriundos das forças axiais, tem-se o *tilting*, um dos principais tipos de defeitos em transformadores de grande porte. Essa falha pode ocorrer quando as forças são maiores que a carga limite suportável pelos enrolamentos do equipamento, caracterizando-se pela inclinação dos condutores em forma de zig-zag (AZEVEDO, 2007).

A Figura 2.20 evidencia tal fato e, devido à elevada força imposta, desloca-se a seção transversal dos condutores em torno do eixo de simetria perpendicular (ROSENTINO, 2010). De forma complementar, há a Figura 2.21, que mostra o efeito *tilting* em um transformador real.

Figura 2.20 - Tombamento dos condutores devido às forças axiais (*tilting*).



Fonte: Azevedo (2007).

Figura 2.21 - Ocorrência do efeito *tilting* em transformador de grande porte.



Fonte: Lapworth (2006).

As componentes axiais das forças eletromagnéticas de um transformador com enrolamentos concêntricos convencionais não podem ser calculadas com exatidão de forma analítica, haja vista que a curvatura do fluxo de campo magnético não pode ser referenciada sem soluções bastante complexas. Estas, por sua vez, requerem modelagens computacionais para maior fidedignidade.

Antes da possibilidade de realizar modelagens e simulações computacionais, algumas metodologias foram criadas para estimar as forças axiais, a exemplo do método Ampére-espira residual (WATERS, 1966; SAY, 1959; HEATHCOTE, 2007; MINHAS, 2007). Tal metodologia é usada principalmente nas condições em que há alguma contribuição para o

aumento das forças axiais nos enrolamentos como o uso de derivações (tapes) e o desalinhamento axial entre enrolamentos.

Nos transformadores que possuem distribuição uniforme de forças magnetomotrices, isto é, enrolamentos concêntricos sem derivação, sem deslocamento axial e comprimentos iguais, as forças axiais que ocorrem devido aos componentes radiais nas duas extremidades dos enrolamentos que estão dirigidas para o ponto médio dos enrolamentos (ROSENTINO, 2010). Nesse caso, as curvas de compressão total, também são consideradas ideais, conforme ilustrado na Figura 2.22, em que foram analisadas as forças compressivas nos enrolamentos de um transformador.

A curva pontilhada, referente à soma das outras duas, tem um valor praticamente constante ao longo da maior parte do enrolamento. A estimativa desse valor é dada pela Equação 2.20 (WATERS, 1966).

$$F_{c\ Total} = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_\alpha)^2 D_{médio} \cdot 10^{-7}}{h^2} \left[d_0 + \frac{d_i + d_e}{3} \right] [N] \quad (2.20)$$

Em que:

$D_{médio}$: Diâmetro médio dos enrolamentos interno e externo [m];

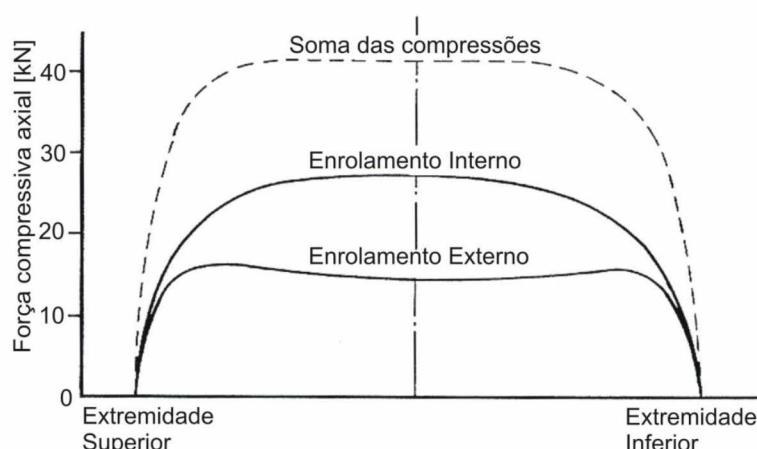
nI_α : Força magnetomotriz dos enrolamentos [A.e];

d_0 : Ducto do transformador [m];

d_i : Espessura radial do enrolamento interno [m];

d_e : Espessura radial do enrolamento externo [m].

Figura 2.22 - Curvas de compressão axial para enrolamentos considerados ideais.



Fonte: Heathcote (2007).

Ao considerar a força no pico da primeira metade do ciclo de um curto-circuito trifásico e assumir um fator de impulso genérico f_i , tem-se um valor máximo para a força compressiva total, estimado pela Equação 2.21 (ROSENTINO, 2010):

$$F_{c\ Total} = \frac{2,83 \cdot f_i \cdot S_\phi \cdot 10^5}{Z_{Traf} \cdot f \cdot h} \ [kN] \quad (2.21)$$

Em que:

S_ϕ : Potência aparente nominal por fase do transformador [MVA];

f : Frequência em ciclos por segundo.

Todavia, a Equação 2.21 permite apenas o cálculo de forças compressivas totais advindas de curtos-circuitos trifásicos, não sendo possível estimar tais forças para outras eventualidades. Para esses casos, a presente pesquisa propõe uma adaptação nessa equação, dando origem à equação subsequente – essa adaptação é realizada a partir de sua coerência com resultados obtidos pelo método dos elementos finitos e sua validação será contemplada no Capítulo III onde perceber-se-á resultados analíticos muito próximos aos resultados advindos de simulações computacionais para as forças compressivas totais em todos os eventos analisados.

$$F'_{c\ Total} = F_{c\ Total} \times \zeta = \left(\frac{2,83 \cdot f_i \cdot S_\phi \cdot 10^5}{Z_{Traf} \cdot f \cdot h} \right) \cdot \zeta \ [kN] \quad (2.22)$$

Em que:

$$\zeta = (I_\alpha / I_{3\phi s})^2.$$

Segundo Waters (1966), para transformadores de maior porte, no caso de ausência de análises detalhadas, pode-se considerar que cerca de 2/3 a 3/4 dessa força é aplicada no enrolamento interno (F_{c-int}), e os 1/3 a 1/4 restantes, estão distribuídos no enrolamento externo (F_{c-ext}).

De forma individual, os estresses mais elevados ocorrem no final dos enrolamentos. A força axial total no final da bobina ou espira de qualquer enrolamento, em condições ideais, é dada pela Equação 2.23 (WATERS, 1966).

$$F_a = 0,366 \cdot q \cdot F \cdot \log \left(1 + \frac{4 \cdot d_1^2}{w^2} \right) [N] \quad (2.23)$$

Em que:

q : Fração do ampére-espira total em um enrolamento e depende do número de discos (N_d) ou do número de camadas (N_L) do enrolamento;

$$d_1 = d_0 + \frac{1}{3}(d_i + d_e) [m];$$

$$F = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_\alpha)^2 \cdot D_{médio}}{h} \cdot 10^{-7} [N];$$

$$w = b + w_b [m].$$

Uma vez que se pode estimar a força axial total no final da bobina dos enrolamentos (F_a), a força axial distribuída ($F_{ax-dist}$) também pode ser estimada por meio da Equação 2.24.

$$F_{ax-dist} = \frac{F_a}{\pi \cdot D_m} [N/m] \quad (2.24)$$

Conforme já discutido, quando se utilizam espaçadores radiais, há uma tendência de curvatura (efeito *bending*) dos condutores na direção axial entre os espaçadores. Nesse sentido, o estresse mecânico associado a tal efeito pode ser matematizado conforme a Equação 2.25.

$$\sigma_{ax-bending} = \frac{F_{ax-dist} \cdot L_{radial}^2}{2 \cdot n_s \cdot e \cdot b^2} [N/m^2] \quad (2.25)$$

Em que:

n_s : Número de espiras por seção de um disco do enrolamento, N_s , em enrolamento do tipo disco, e igual ao número de camadas, N_L , em enrolamento do tipo camada;

$$L_{radial} = \frac{\pi \cdot D_m}{N_{radial}} - R_{radial} [m].$$

Em que:

N_{radial} : Quantidade de espaçadores radiais;

R_{radial} : Dimensão radial dos espaçadores radiais [m].

Por fim, preocupa-se com a possibilidade de inclinação dos condutores sob elevadas forças axiais (efeito *tilting*), principalmente quando os condutores que formam o enrolamento são do tipo MW e/ou CTC *non-bonded*. Esse efeito é causado pela compressão axial

acumulativa, aplicada aos condutores e transmitida por meio dos espaçadores e estruturas de fixação.

Constata-se que a carga crítica que pode ser suportada pelo enrolamento é dependente dos parâmetros do condutor, da construção do enrolamento e da isolação entre os condutores (WATERS, 1966; CIGRE, 2002; PATEL, 2002). Por conseguinte, a força máxima de compressão axial deve ser menor que a carga crítica, a qual pode ser calculada por meio da Equação 2.26 (IEC 60076, 2000).

$$F_{ax-crit} = \left[k_1 \frac{n_s \cdot E \cdot e \cdot b^2}{D_m} + k_2 \frac{\gamma \cdot \chi \cdot n_s \cdot \pi \cdot D_m \cdot e^3}{b} \right] \cdot k_3 \cdot k_4 [N] \quad (2.26)$$

Em que:

$\chi = \frac{R_{radial} \cdot L_{radial}}{\pi \cdot D_m}$, definida para o enrolamento do tipo disco com espaçador;

$\chi = 1$, para o enrolamento do tipo camada;

γ : Constante que leva em conta a forma do condutor, sendo $\gamma = 1,0$ para um raio de curvatura de um fio normal ou $\gamma = 0,85$ para fios condutores totalmente arredondados;

k_1 : Coeficiente do termo de torção, sendo $k_1 = 0,5$;

k_2 : Coeficiente do termo de transposição, sendo $k_2 = 45 [N/mm^3]$ para condutor do tipo MW e $k_2 = 22 [N/mm^3]$ para CTC *non-bonded*;

k_3 : Fator que leva em consideração o grau de dureza do cobre (ver Tabela 2.3);

k_4 : Fator que leva em conta a inclinação dinâmica (ver Tabela 2.4).

Tabela 2.3 - Valores para k_3 .

Estresse Máximo - $\sigma_{0,2}$ - (N/mm^2)	k_3
< 150	1,0
150	1,1
180	1,2
230	1,3
> 230	1,4

Fonte: IEC 60076 (2000).

Tabela 2.4 - Valores para k_4 .

Tipo do Condutor	Tipo do Enrolamento	
	Disco	Camada
MW	1,2	1,1
CTC <i>non-bonded</i>	1,7	1,3

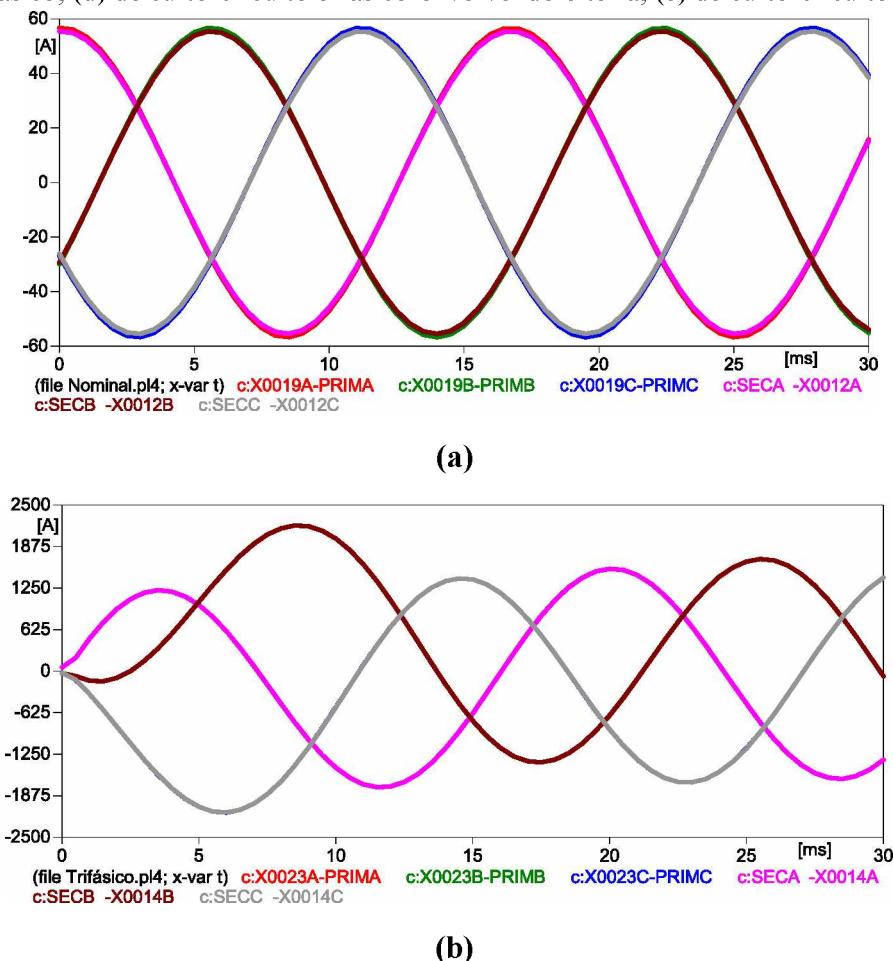
Fonte: IEC 60076 (2000).

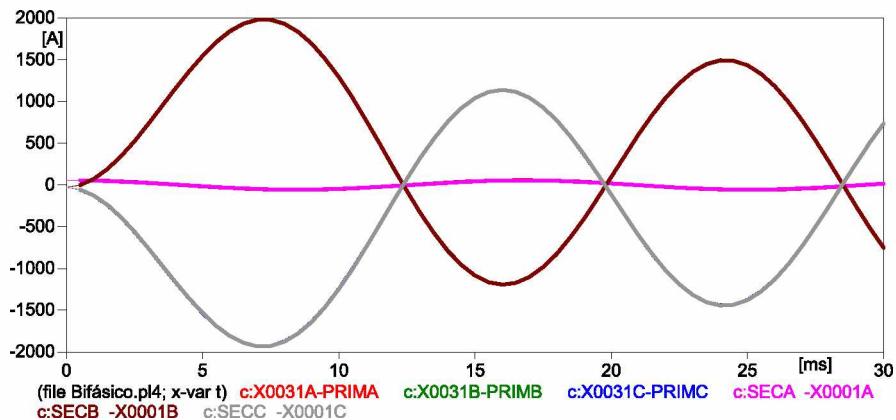
2.5.3 Aplicação da Metodologia Analítica em Transformador Trifásico de 15 kVA

Este item objetiva mostrar a aplicação da metodologia analítica para cálculos de estresses e forças eletromecânicas em um transformador de 15 kVA submetido a condições de curtos-circuitos. O transformador em questão não possui tapes, e seus enrolamentos são desprovidos de espaçadores radiais e axiais, de acordo com a configuração do tipo camada.

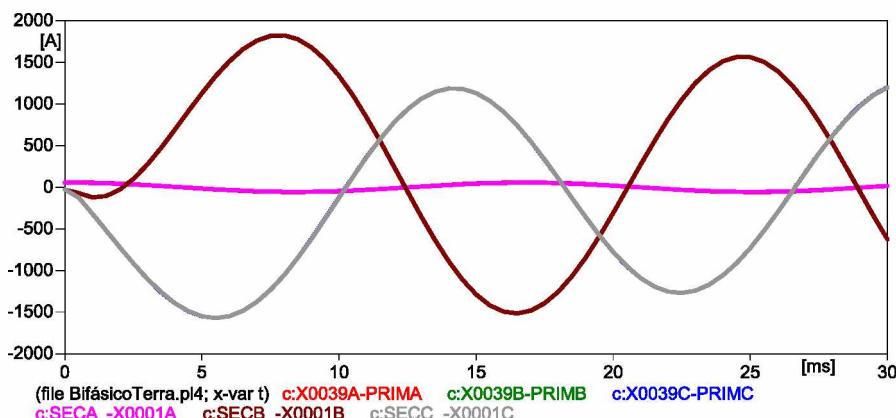
As correntes dos variados tipos de curtos-circuitos dizem respeito, num primeiro momento, a um fator de assimetria (f_i) de aproximadamente 1,38, valor este coerente com uma resistência percentual do transformador de 1% implicando em uma relação R/X de 0,3. Tais correntes foram obtidas por meio do *software* ATP e suas formas de onda são apresentadas na Figura 2.23. Ainda na Figura 2.23, apresenta-se também a forma de onda das correntes nos enrolamentos interno e externo do transformador quando em condições nominais de operação.

Figura 2.23 - Formas de onda das correntes: (a) nominais; (b) de curto-círcuito trifásico; (c) de curto-círcuito bifásico; (d) de curto-círcuito bifásico-envolvendo o terra; (e) de curto-círcuito monofásico.

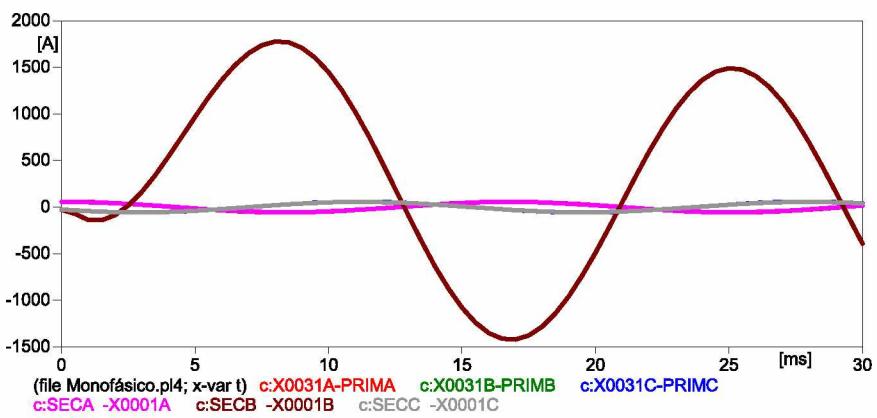




(c)



(d)



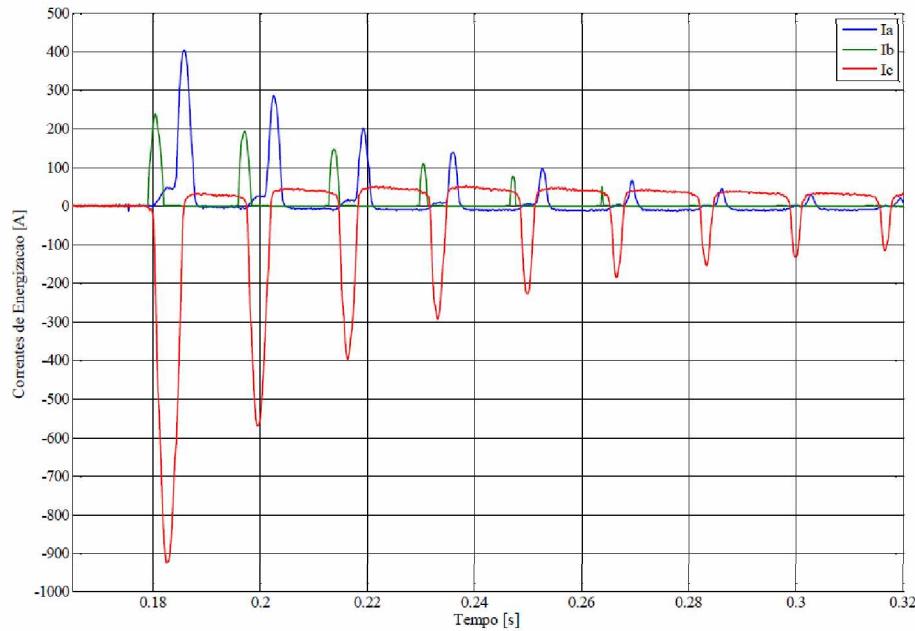
(e)

Fonte: Autor.

As simulações computacionais realizadas para a obtenção das correntes de falta são realizadas devido à dificuldade de obter tais correntes por meio de ensaios laboratoriais. Todavia, a energização de transformadores é um evento comum e pode ser facilmente experimentado laboratorialmente. Saraiva (2011) levantou para o transformador ora estudado as correntes de *inrush* para a condição mais desfavorável possível – chaveamento no instante em que a tensão de uma das fases tem valor próximo de zero. Dessa maneira, optou-se para as investigações relacionadas às correntes de energização, pelo emprego dos valores de corrente

obtidos por meio de ensaios experimentais. As correntes de energização são apresentadas na Figura 2.24.

Figura 2.24 - Correntes de energização do transformador de 15 kVA.



Fonte: Saraiva (2004).

Diante do exposto, a Tabela 2.5 abarca os valores assimétricos das correntes de curto-círcuito, de pico da corrente nominal e de *inrush* para a aplicação da metodologia apresentada neste capítulo.

A Tabela 2.6 diz respeito às características elétrica, magnética, física e geométrica do transformador de 15 kVA ora estudado.

Tabela 2.5 - Correntes elétricas trifásicas para as variadas situações estudadas.

Corrente	Enrolamento	Fase A [A]	Fase B [A]	Fase C [A]
I_{np}	Externo	-25,655	56,632	-30,977
	Interno	-25,094	55,431	-30,337
$I_{3\phi s}$	Externo	-769,577	2192,14	-1422,57
	Interno	-768,975	2191,88	-1422,9
$I_{2\phi s}$	Externo	-48,764	1980,8	-1932
	Interno	-47,72	1980	-1932,3
$I_{2\phi Ts}$	Externo	-56,001	1823,7	-1053
	Interno	-54,811	1823,1	-1053,3
$I_{\phi Ts}$	Externo	-56,001	1777,3	20,227
	Interno	-54,811	1776,8	19,78
I_{inrush}	Externo	-	-	-
	Interno	52	0	-948

Fonte: Autor.

Tabela 2.6 - 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 4,5mm
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 de enrolamento	Enrolamento externo	125 mΩ
	Enrolamento interno	85 mΩ
Bobina interna	Diâmetro externo	106x10 ⁻³ m
	Diâmetro interno	87x10 ⁻³ m
Bobina externa	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	

Fonte: CHESF e UFU (2008).

A partir das Tabelas 2.5 e 2.6, bem como do equacionamento destacado neste capítulo, os cálculos foram feitos para obter as forças e os estresses radiais e axiais.

2.5.3.1 Cálculo das forças e estresses radiais

As forças radiais total (F_r), média (F_{rmed}) e distribuída ($F_{rad-dist}$) foram obtidas com a aplicação das Equações 2.14, 2.15 e 2.16, para o enrolamento externo e interno, frente às correntes assimétricas de curto-círcuito trifásico ($I_{3\phi s}$), bifásico ($I_{2\phi s}$), bifásico envolvendo o terra ($I_{2\phi Ts}$) e monofásico ($I_{\phi Ts}$), além da corrente de energização (I_{inrush}). Para fins comparativos, as forças eletromecânicas radiais também foram estimadas para condições nominais, em que transformador está sujeito à corrente de pico nominal (I_{np}).

Apresentam-se, porquanto, os resultados obtidos na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Forças radiais obtidas pela aplicação da metodologia analítica - Transformador sob condições diversas.

Corrente	Enrolamento	Força Radial Total (F_r [N])	Força Radial Média (F_{rmed} [N])	Força Radial Distribuída ($F_{rad-dist}$ [N/mm])
I_{np}	Externo	23,366	7,434	$7,9640 \times 10^{-4}$
	Interno	15,266	4,860	$7,6298 \times 10^{-4}$
$I_{3\phi s}$	Externo	$35,010 \times 10^3$	$11,144 \times 10^3$	1,1933
	Interno	$23,871 \times 10^3$	$7,598 \times 10^3$	1,1930
$I_{2\phi s}$	Externo	$28,585 \times 10^3$	$9,099 \times 10^3$	0,9742
	Interno	$18,551 \times 10^3$	$5,905 \times 10^3$	0,9272
$I_{2\phi Ts}$	Externo	$24,079 \times 10^3$	$7,665 \times 10^3$	0,8208
	Interno	$16,410 \times 10^3$	$5,224 \times 10^3$	0,8202
$I_{\phi Ts}$	Externo	$23,000 \times 10^3$	$7,321 \times 10^3$	0,7839
	Interno	$15,695 \times 10^3$	$4,996 \times 10^3$	0,7844
I_{inrush}	Externo	—	—	—
	Interno	$4,465 \times 10^3$	$1,421 \times 10^3$	0,22232

Fonte: Autor.

A partir das forças eletromecânicas radiais arroladas na Tabela 2.7 e da Equação 2.17, o estresse radial médio nos enrolamentos ($\sigma_{r-médio}$) foi calculado para todas as ocorrências. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Estresses causados pelas forças radiais, obtidos pela aplicação da metodologia analítica - Transformador sob condições diversas.

Corrente	Enrolamento	Estresse Radial Médio no Enrolamento ($\sigma_{r-\text{médio}} [N/mm^2]$)
I_{np}	Externo	$3,577 \times 10^{-3}$
	Interno	$2,337 \times 10^{-3}$
$I_{3\phi s}$	Externo	5,3603
	Interno	3,6548
$I_{2\phi s}$	Externo	4,3766
	Interno	2,8404
$I_{2\phi Ts}$	Externo	3,6867
	Interno	2,5126
$I_{\phi Ts}$	Externo	3,521
	Interno	2,402
I_{inrush}	Externo	—
	Interno	0,6837

Fonte: Autor.

2.5.3.2 Cálculo das forças axiais

Da mesma forma que para os esforços radiais, os resultados relacionados às forças e esforços axiais, são verificados na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Forças axiais obtidas pela aplicação da metodologia analítica - Transformador sob condições diversas.

Corrente	Enrolamento	Força Compressiva Enrolamento ($F_c [N]$)	Força Extremidade Enrolamento ($F_a [N]$)	Força Compressiva Total ($F_{cT} [N]$)
I_{np}	Externo	1,2497	0,3865	3,7491
	Interno	2,499	0,3703	
$I_{3\phi s}$	Externo	$1,87 \times 10^3$	$0,579 \times 10^3$	$5,62 \times 10^3$
	Interno	$3,74 \times 10^3$	$0,579 \times 10^3$	
$I_{2\phi s}$	Externo	$1,53 \times 10^3$	$0,473 \times 10^3$	$4,59 \times 10^3$
	Interno	$3,06 \times 10^3$	$0,450 \times 10^3$	
$I_{2\phi Ts}$	Externo	$1,288 \times 10^3$	$0,3984 \times 10^3$	$3,86 \times 10^3$
	Interno	$2,58 \times 10^3$	$0,3981 \times 10^3$	
$I_{\phi Ts}$	Externo	$1,23 \times 10^3$	$0,3805 \times 10^3$	$3,69 \times 10^3$
	Interno	$2,46 \times 10^3$	$0,3807 \times 10^3$	
I_{inrush}	Externo	—	—	$1,051 \times 10^3$
	Interno	$1,051 \times 10^3$	$0,108 \times 10^3$	

Fonte: Autor.

Pelo fato de o transformador não possuir espaçadores distribuídos radialmente nos enrolamentos e pelos enrolamentos serem do tipo camada, não existem preocupações relacionadas aos efeitos *bending* e *tilting*. Dessa forma, torna-se desnecessário e inaplicável o equacionamento para estresses críticos devido a estes tipos de falhas.

2.5.3.3 Discussão e análise dos resultados

Em consonância aos resultados apresentados nos itens anteriores, neste momento pretende apresentar uma análise comparativa entre os variados eventos salientados.

Assim, os valores de estresses radiais observados na Tabela 2.8 são normalizados e, a partir disso, torna-se possível a aplicação do conceito de distância Euclidiana, fortemente utilizado na avaliação dos efeitos de afundamentos de tensão em motores de indução (GUASCH; CÓRCOLES; PEDRA, 2004). No contexto desta pesquisa, tal metodologia possibilitará comparações entre os estresses originados pelos variados eventos e com o estresse máximo, no que tange à sua magnitude e severidade.

Para a construção de uma matriz de distâncias Euclidianas, faz-se necessário que, para cada enrolamento, seja determinado o estresse radial máximo verificado entre os variados eventos estudados ($\sigma_{rmáx}$) – esse valor é definido em observância à Tabela 2.8. A partir disso, define-se a Equação 2.27 como uma expressão normalizada da distância Euclidiana percentual entre estresses radiais $\sigma_{r\alpha}$ e $\sigma_{r\beta}$, sendo α e β eventos quaisquer.

$$d(\sigma_{r\alpha}, \sigma_{r\beta}) = \frac{D(\sigma_{r\alpha}, \sigma_{r\beta})}{MAX} 100 = \frac{100}{\sigma_{rmáx}} \sqrt{(\sigma_{r\alpha} - \sigma_{r\beta})^2} \quad (2.27)$$

Logo, ao se basear na Equação 2.27 e na Tabela 2.8, para fins comparativos, a Tabela 2.10 abarca as distâncias Euclidianas relacionadas aos estresses radiais ocorrentes no EE (enrolamento externo), e a Tabela 2.11 compreende os resultados referentes aos estresses radiais ocorrentes no EI (enrolamento interno).

Tabela 2.10 - Comparativo de estresses radiais no enrolamento externo por distância Euclidiana.

Distância Euclidiana – Estresse Radial Médio (EE)					
$\sigma_{r3\phi}$ (%)	$\sigma_{r2\phi}$ (%)	$\sigma_{r2\phi T}$ (%)	$\sigma_{r\phi T}$ (%)	$\sigma_{rinrush}$ (%)	MAX (%)
$\sigma_{r3\phi}$ (%)	18,35	31,22	34,31	—	0,00
$\sigma_{r2\phi}$ (%)	18,35	12,87	15,96	—	18,35
$\sigma_{r2\phi T}$ (%)	31,22	12,87	3,09	—	31,22
$\sigma_{r\phi T}$ (%)	34,31	15,96	3,09	—	34,31
$\sigma_{rinrush}$ (%)	—	—	—	—	—
MAX (%)	0,00	18,35	31,22	34,31	—

Fonte: Autor.

Tabela 2.11 - Comparativo de estresses radiais no enrolamento interno por distância Euclidiana.

Distância Euclidiana – Estresse Radial Médio (EI)					
$\sigma_{r3\phi}$ (%)	$\sigma_{r2\phi}$ (%)	$\sigma_{r2\phi T}$ (%)	$\sigma_{r\phi T}$ (%)	$\sigma_{rinrush}$ (%)	MAX (%)
$\sigma_{r3\phi}$ (%)	22,28	31,25	34,28	81,29	0,00
$\sigma_{r2\phi}$ (%)	22,28	8,97	11,20	59,01	22,28
$\sigma_{r2\phi T}$ (%)	31,25	8,97	3,03	50,04	31,25
$\sigma_{r\phi T}$ (%)	34,28	11,20	3,03	47,01	34,28
$\sigma_{rinrush}$ (%)	81,29	59,01	50,04	47,01	81,29
MAX (%)	0,00	22,28	31,25	34,28	81,29

Fonte: Autor.

Por intermédio das Tabelas 2.10 e 2.11, observa-se que os estresses radiais oriundos de energizações possuem maior distância para os valores de estresse máximo, isto é, $d(\sigma_{rinrush}, \sigma_{rmáx}) = 81,29\%$ para o EI. Para o EE, não se compreendem as distâncias Euclidianas associadas à corrente de *inrush*, pois o transformador é energizado a vazio pelo EI.

Enquanto isso, para curtos monofásicos, tem-se $d(\sigma_{r\phi T}, \sigma_{rmáx}) = 34,31\%$ para o EE, e $d(\sigma_{r\phi T}, \sigma_{rmáx}) = 34,28\%$ para o EI. Nota-se um distanciamento considerável, mas não se compara ao verificado nas correntes de *inrush*. Constatou-se que a menor distância Euclidiana entre um evento e o máximo valor observado, foi para curtos-circuitos do tipo bifásico, em que é percebido $d(\sigma_{r2\phi}, \sigma_{rmáx}) = 18,35\%$ para o EE e $d(\sigma_{r2\phi}, \sigma_{rmáx}) = 22,28\%$ para o EI.

No tocante às comparações entre eventos, a metodologia proposta se mostra ainda mais pertinente, possibilitando, de forma indireta, a comparação de severidades entre os esforços gerados pelos eventos. Como exemplo desse fato, observa-se que os estresses radiais para o EE, devido a curtos-circuitos bifásicos e monofásicos, possuem a distância entre si de $d(\sigma_{r2\phi}, \sigma_{r\phi T}) = 15,96\%$, ao passo que, para o EI, é de $d(\sigma_{r2\phi}, \sigma_{r\phi T}) = 11,20\%$.

A partir das referidas tabelas, nota-se ainda que as distâncias normalizadas dos estresses radiais para o EE pouco se diferem das aquelas normalizadas para o EI. No entanto, pela Tabela

2.8 já foi citado que os estresses radiais constantes no EE possuem valores superiores aos observados no EI. Salienta-se ainda que, para o EE, não se mencionam as distâncias relacionadas à corrente de *inrush* pelos motivos já mencionados.

Sob outra perspectiva, nota-se que os estresses máximos, seja para o EE ou para o EI, são advindos de curtos trifásicos, isto é, $d(\sigma_{r3\phi}, \sigma_{rmáx}) = 0\%$. Nota-se a partir do comparativo realizado, que as distâncias Euclidianas entre faltas simétricas e assimétricas não são extremamente elevadas. Isto posto, aliado à maior ocorrência das faltas assimétricas, justifica o direcionamento deste trabalho para análises dos esforços eletromecânicos, também em virtude dessas faltas.

No tocante às forças axiais, a partir de pequenas modificações na Equação 2.27, a Equação 2.28 é uma expressão normalizada de distância Euclidiana percentual aplicada às forças axiais compressivas totais $\mathbf{F}_{cT\alpha}$ e $\mathbf{F}_{cT\beta}$, sendo α e β eventos quaisquer.

$$d(\mathbf{F}_{cT\alpha}, \mathbf{F}_{cT\beta}) = \frac{D(\mathbf{F}_{cT\alpha}, \mathbf{F}_{cT\beta})}{MAX} 100 = \frac{100}{\mathbf{F}_{cTmáx}} \sqrt{(\mathbf{F}_{cT\alpha}, \mathbf{F}_{cT\beta})^2} \quad (2.28)$$

Da mesma maneira que fora realizado para os estresses radiais, elencam-se na Tabela 2.12 as distâncias Euclidianas percentuais para as forças axiais compressivas totais (\mathbf{F}_{cT}). Em se tratando das forças axiais, dispensam-se mais comparações além desta, posto que as distâncias percentuais das outras modalidades de força possuem valores semelhantes aos demonstrados na Tabela 2.12.

Tabela 2.12 - Comparativo de forças compressivas totais por distância Euclidiana.

Distância Euclidiana – Força Compressiva Total					
$\mathbf{F}_{cT3\phi}$ (%)	$\mathbf{F}_{cT2\phi}$ (%)	$\mathbf{F}_{cT2\phi T}$ (%)	$\mathbf{F}_{cT\phi T}$ (%)	$\mathbf{F}_{cTinrush}$ (%)	MAX (%)
$\mathbf{F}_{cT3\phi}$ (%)	18,33	31,25	34,29	81,30	0,00
$\mathbf{F}_{cT2\phi}$ (%)	18,33	12,92	15,96	62,97	18,33
$\mathbf{F}_{cT2\phi T}$ (%)	31,25	12,92	3,04	50,05	31,25
$\mathbf{F}_{cT\phi T}$ (%)	34,29	15,96	3,04	47,01	34,29
$\mathbf{F}_{cTinrush}$ (%)	81,30	62,97	50,05	47,01	81,30
MAX (%)	0,00	18,33	31,25	34,29	81,30

Fonte: Autor.

De forma um tanto quanto semelhante aos estresses radiais, observa-se que a força compressiva total advinda de energizações possui maior distância para o valor de força máxima observada quando na presença de curtos-circuitos trifásicos.

A partir da Tabela 2.12, pode-se ainda realizar comparações entre os eventos e por conseguinte, da severidade entre as forças compressivas totais geradas pelos eventos. Ademais, pode-se observar que as distâncias Euclidianas percentuais obtidas são próximas das verificadas para os estresses radiais.

No capítulo subsequente, os resultados dos esforços eletromecânicos para o transformador serão apresentados a partir de simulações computacionais baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF). Dessa forma, comparar-se-ão os resultados analíticos aqueles obtidos pelas simulações.

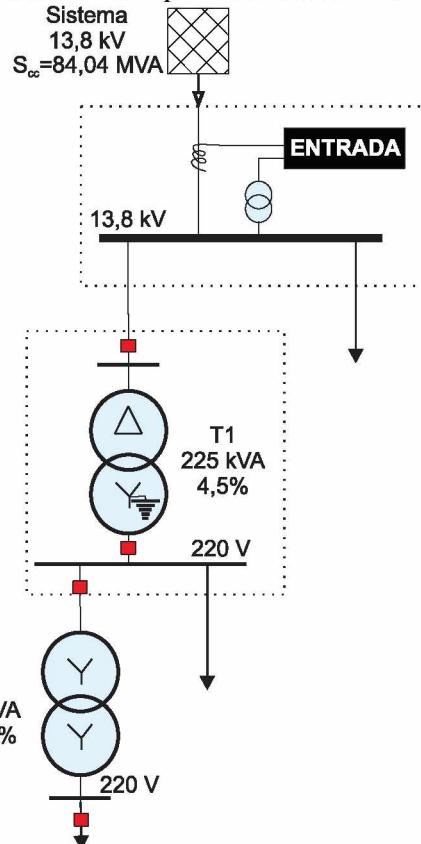
2.5.4 Aplicação da Metodologia Analítica Considerando-se o Nível de Curto-Círcuito

Como exemplo dos cálculos considerando-se o nível de curto-círcuito no ponto de entrega, esta subseção visa apresentar as forças e esforços eletromecânicos advindas para curtos-circuitos trifásicos, relacionando com aquelas obtidas nos itens anteriores, onde o referido nível de curto-círcito não é considerado.

Em trabalhos como este, é difícil precisar um nível de curto-círcito no ponto de entrega no qual o transformador está alocado, pois o trabalho pretende ser o menos específico possível, não atribuindo particularidades de um sistema em questão. Todavia, esse item é apresentado no sentido de ressaltar as diferenças de levar-se em conta o nível de curto-círcito em cálculos e análises mais específicas.

Para tal, considera-se o nível de curto-círcito da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) que, no ponto de entrega, realizado sob tensão de 13.800 V, equivale à $84,04\angle -75,85^\circ$ [MVA]. Em uma das sete subestações existentes na UFU, há um transformador delta-estrela à óleo 225 kVA com impedância de 4,5% que rebaixa a tensão de 13.800 para 220 V (SILVA, 2014). Nesse contexto, imagina-se que o transformador de 15 kVA esteja conectado ao secundário desse transformador, conforme o esquema apresentado na Figura 2.25.

Figura 2.25 - Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico em análise.



Fonte: Adaptado de Silva (2014).

Nessas condições, a corrente de curto-círcuito assimétrica advinda de um curto-círcuito trifásico equivale a 2.029,68 [A] no secundário do transformador de 15 kVA – valor esse encontrado por meio do *software* Análise de Faltas Simultâneas (ANAFAS).

Conforme esperado, o valor da corrente assimétrica foi reduzido devido à consideração de todos elementos do sistema. Salienta-se ainda que, de forma aproximada, as reduções nas forças eletromecânicas se darão com o quadrado da corrente reduzida, o que pode produzir uma redução considerável nos esforços. Nesse sentido, apresenta-se na Tabela 2.13 os resultados obtidos para as forças radiais totais, estresses radiais médios e forças compressivas totais em ambos enrolamentos, tendo em vista as condições referidas. Ainda nesta tabela, apresenta-se as respectivas diferenças percentuais entre os resultados ao considerar, ou não, o nível de curto-círcuito exato no ponto de conexão do transformador.

Tabela 2.13 - Resultados obtidos ao considerar o nível de curto-círcuito no ponto de entrega.

Tipo de Análise	$F_r [N]$		$\sigma_{r-\text{médio}} [N/mm^2]$		$F_{ct} [N]$
	Externo	Interno	Externo	Interno	
Desconsiderando S_{cc}	$35,010 \times 10^3$	$23,871 \times 10^3$	5,3603	3,6548	$5,62 \times 10^3$
Considerando S_{cc}	$30,013 \times 10^3$	$20,468 \times 10^3$	4,5952	3,1339	$4,82 \times 10^3$
Diferença [%]	14,27%	14,26%	14,27%	14,32%	14,23%

Fonte: Autor.

Destarte, caso o transformador de 15 kVA estivesse alocado no sistema elétrico da UFU, conforme a Figura 2.25, ao não considerar o nível de curto-círcuito no ponto de conexão do transformador, ter-se-ia uma superestimação de aproximadamente 14% em todos os valores de forças e estresses eletromecânicos. Por conseguinte, fica claro que considerar o nível de curto-círcuito e o sistema elétrico à montante do transformador, produz informações mais fidedignas no que tange às solicitações dinâmicas impostas aos transformadores. Adicionalmente, considerar ou não o sistema à montante, traz impactos em propostas que visam investigar a redução de vida útil de transformadores, por exemplo.

Não obstante, assumir no presente trabalho um nível de curto-círcuito específico torná-lo-ia muito particular. Nesse sentido, optou-se por não levar em conta essa impedância no Capítulo III. No Capítulo IV, algumas considerações referentes a níveis de curto-círcito e outros detalhamentos pontuais de sistemas elétricos são investigados.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo, num primeiro momento, foi apresentada uma conceituação teórica elementar acerca das forças eletromagnéticas atuantes nos enrolamentos do transformador. Destacou-se que tais forças são advindas da interação de correntes elétricas e fluxos de dispersão situados, mais especificamente, entre os enrolamentos do transformador.

Uma apresentação breve acerca das correntes atreladas às faltas simétricas, assimétricas e energizações foi realizada.

Deve-se salientar que a literatura destaca curtos trifásicos e energizações e esta pesquisa, motivada pela elevada incidência percentual das faltas assimétricas, destaca essas situações que, em alguns casos, podem ser até mais severas que as correntes de curtos trifásicos.

Salientou-se os principais tipos de falhas associadas à decomposição das forças resultantes em duas componentes – radial e axial.

A partir da definição das forças eletromagnéticas, as forças axiais são ocasionadas pela interação da corrente elétrica com fluxos de dispersão radiais e, por outro lado, as radiais são obtidas a partir da interação da corrente elétrica com fluxos de dispersão axiais. Observou-se também que a força radial tende a tracionar o enrolamento externo e a comprimir o enrolamento interno do transformador. Foram evidenciadas, até mesmo a partir de fotografias, as possíveis falhas decorrentes dessas forças e, complementarmente, uma descrição analítica de tais forças e dos estresses associados foi realizada.

Diante dos aspectos citados, este capítulo apresentou os esforços eletromecânicos obtidos a partir da aplicação da metodologia exposta em um transformador trifásico de 15 kVA. A análise contemplou o transformador frente às energizações e às faltas simétricas e assimétricas, e do conceito de distância Euclidiana, foram comparados os estresses originados pelos variados eventos sob estudo.

Dessa maneira, os estresses máximos observados advêm das faltas simétricas. Todavia, a partir do comparativo, verificou-se um distanciamento não tão grande no que tange à severidade dos demais eventos, em relação aos estresses advindos de curtos trifásicos.

Por meio de um sistema elétrico específico, os esforços eletromecânicos foram estimados com a aplicação da metodologia analítica exposta no presente capítulo, considerando-se o nível de curto-circuito e característica do sistema. Foi corroborado que as forças e esforços eletromecânicos são ligeiramente inferiores àquelas calculadas de forma simplificada, onde se desconsidera o nível de curto-circuito no ponto de entrega.

CAPÍTULO III

AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS EM TRANSFORMADORES UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

ESTIMATIVAS dos esforços eletromecânicos em transformadores podem ser feitas, também, pelo emprego da técnica no domínio no tempo. Todavia, de forma mais fidedigna, principalmente, às características geométricas do transformador, o método dos elementos finitos (MEF) torna-se tecnicamente mais atrativo.

O MEF consiste em um método numérico aproximado para a análise de diversos fenômenos físicos, descritos por equações diferenciais parciais, com determinadas condições de contorno e, quando possível, condições iniciais. A ideia principal do método é dividir o domínio do problema em sub-regiões de geometrias mais simples (formato triangular, quadrilateral, cúbico etc.). Do fato de possuírem dimensões finitas, tais sub-regiões são chamadas “elementos finitos”, em contraste com elementos infinitesimais utilizados no cálculo diferencial integral. Advém daí o nome “Método dos Elementos Finitos”, estabelecido por Ray Clough, na década de 1950 (SOUZA, 2003).

Muitas são as áreas de aplicação do MEF. Inúmeros problemas físicos podem ser analisados por intermédio desse método, tais como o eletromagnetismo, eletroestática,

transferência de calor, acústica, hidrodinâmica, aerodinâmica, lubrificação etc. (SOUZA, 2003).

No contexto da engenharia elétrica, observa-se grande utilização do MEF para a análise de equipamentos que compõem os sistemas elétricos de potência, tais como geradores, motores, transformadores, cabos, entre outros. Adicionalmente, destaque é dado a essa técnica em relação às demais, pois ela permite determinar a distribuição de campos e fluxos eletromagnéticos nos mais diversos componentes dos equipamentos.

Dentre vários programas baseados no MEF, escolheu-se o FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) para a realização das simulações, que é um programa livre e que proporciona ferramentas para resolução de problemas, em ambiente bidimensional (2D) (MEEKER, 2015). Ressalta-se ainda que os resultados obtidos pelo ambiente 2D são muito próximos daqueles obtidos em 3D. Dessa forma, tendo em vista que o esforço computacional e a complexidade das modelagens são menores, muitos são os motivos da modelagem em 2D (KLADAS; PAPADOPoulos; TEGOPOULOS, 1994; CARDOSO, 1995; BASTOS; SADOWSKI, 2003).

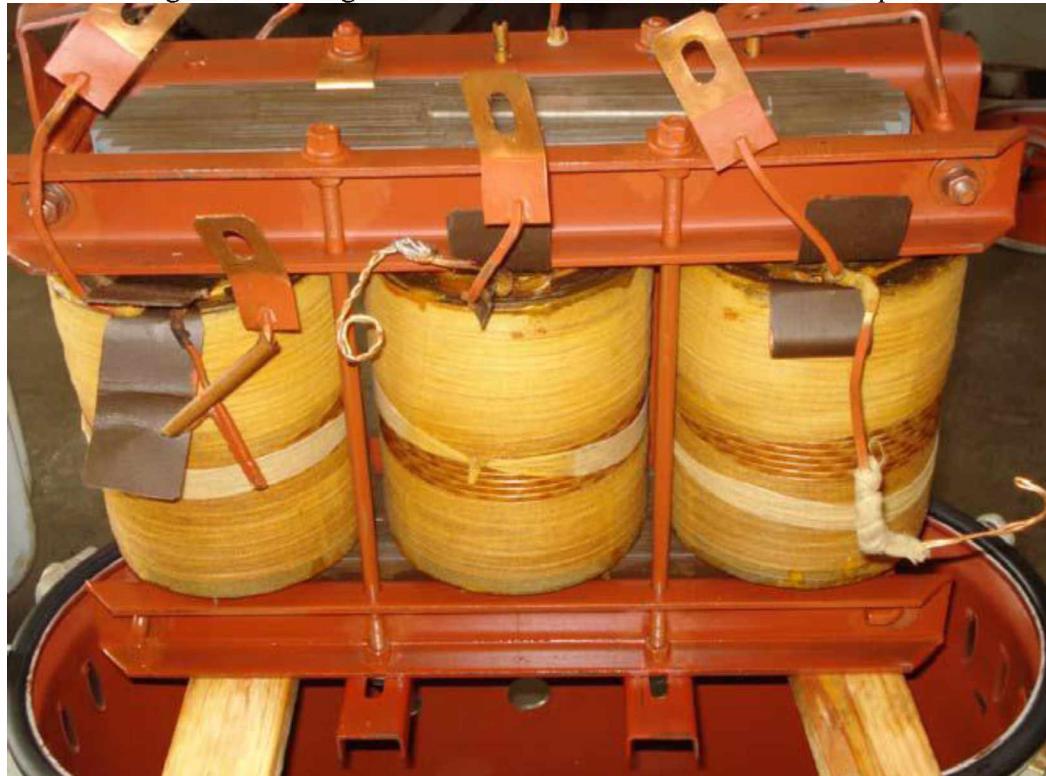
Salienta-se, ainda, que o FEMM permite a solução de problemas magnetostáticos lineares ou não lineares, problemas magnéticos lineares ou não lineares, problemas eletrostáticos lineares e problemas de fluxo de calor (MEEKER, 2015). Sob outra perspectiva, a plataforma não permite que o modelo seja conectado a um circuito elétrico externo. Dessa forma, as grandezas elétricas de entrada devem ser impostas ao programa. Para isso, utiliza-se neste trabalho o ATP (*Alternative Transient Program*), na extração das correntes elétricas a serem impostas nos enrolamentos do transformador.

Nessa conjuntura, este capítulo tem por objetivo apresentar e analisar estudos alusivos aos estresses eletromecânicos em um transformador trifásico de 15 kVA. Os estudos expostos abordam os aspectos elétricos, magnéticos e mecânicos, quando o transformador está sob condições nominais, energizações e faltas simétricas e assimétricas. Posteriormente, será investigado o comportamento desse transformador frente a esses variados eventos, quando na presença de desalinhamentos entre os enrolamentos. As implicações mecânicas da inserção de uma resistência entre o neutro do transformador e o terra – usual em transformadores e geradores – também serão apresentadas.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR SOB ESTUDO

O transformador modelado no FEMM é um transformador trifásico de três colunas do tipo núcleo envolvido, com dois enrolamentos de dupla camada por fase, conectados em estrela, cuja foto real está apresentada na Figura 3.1. Características elétricas, magnéticas e geométricas desse transformador estão também apresentadas na Tabela 3.1.

Figura 3.1 - Fotografia do transformador sob estudo sem o tanque.



Fonte: Rosentino (2010).

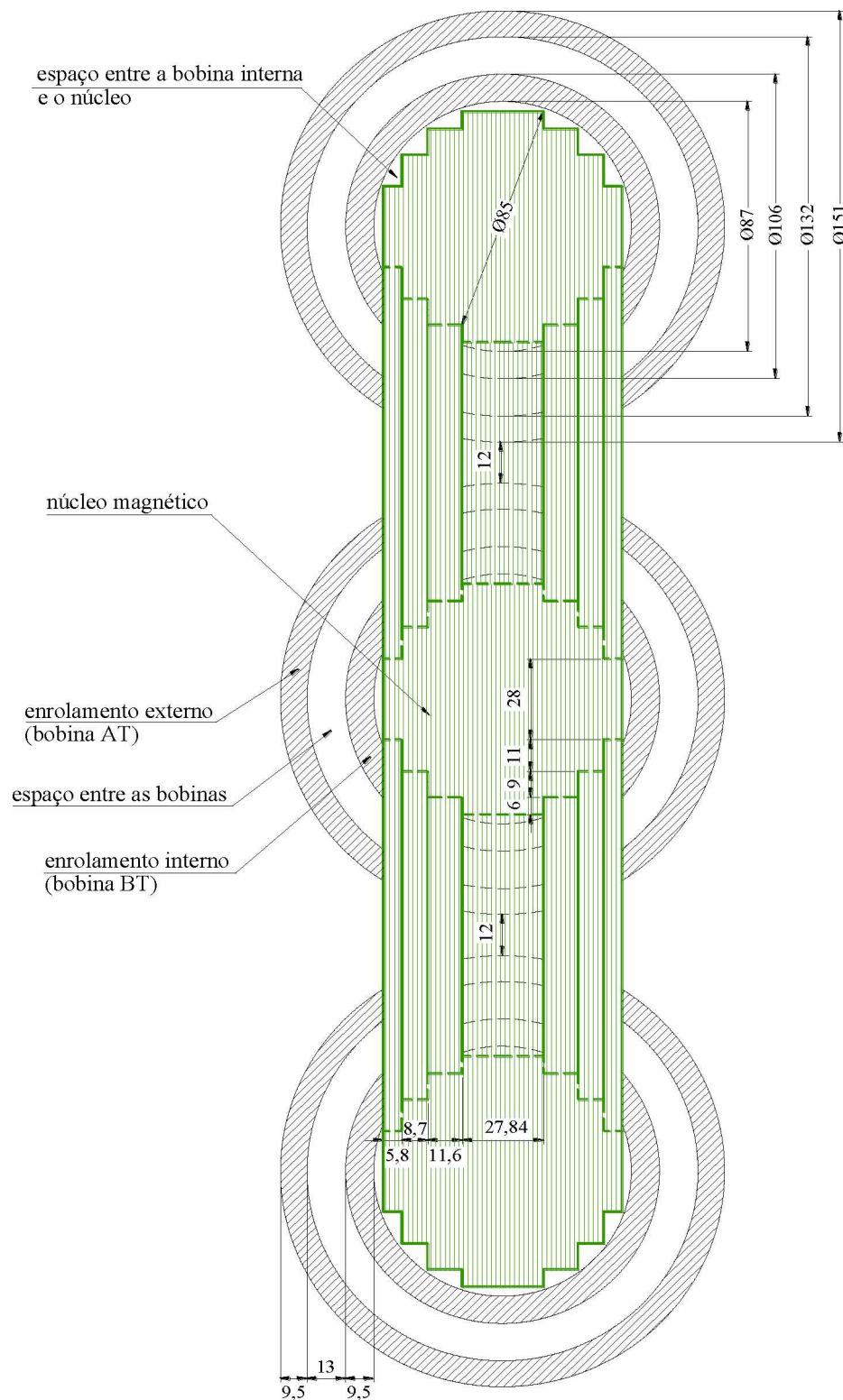
Tabela 3.1 - Características do transformador sob estudo.

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 4,5mm
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 de enrolamento	Enrolamento externo	125 mΩ
	Enrolamento interno	85 mΩ
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
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	

Fonte: Azevedo (2007).

Adicionalmente às características apresentadas, a Figura 3.2 mostra a vista superior do transformador, dando maior clareza no detalhamento dos enrolamentos, do núcleo magnético e de dimensões físicas necessárias para a implementação do transformador no FEMM.

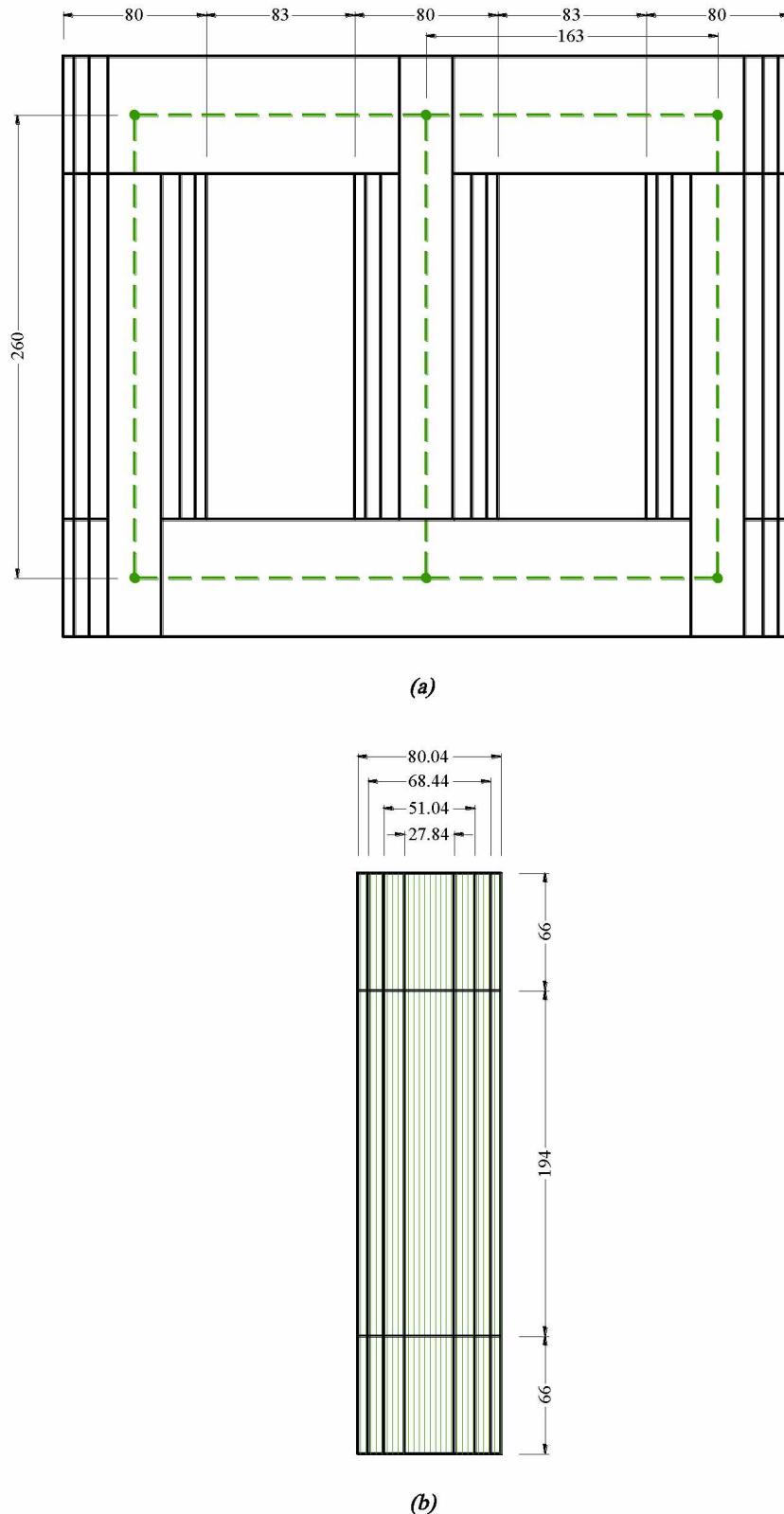
Figura 3.2 - Vista superior de corte do transformador sob estudo.



Fonte: Azevedo (2007).

As vistas frontal e lateral do núcleo ferromagnético também são apresentadas por intermédio da Figura 3.3a e 3.3b. Destaca-se na Figura 3.3a, a linha tracejada verde que representa o comprimento médio do fluxo magnético no núcleo.

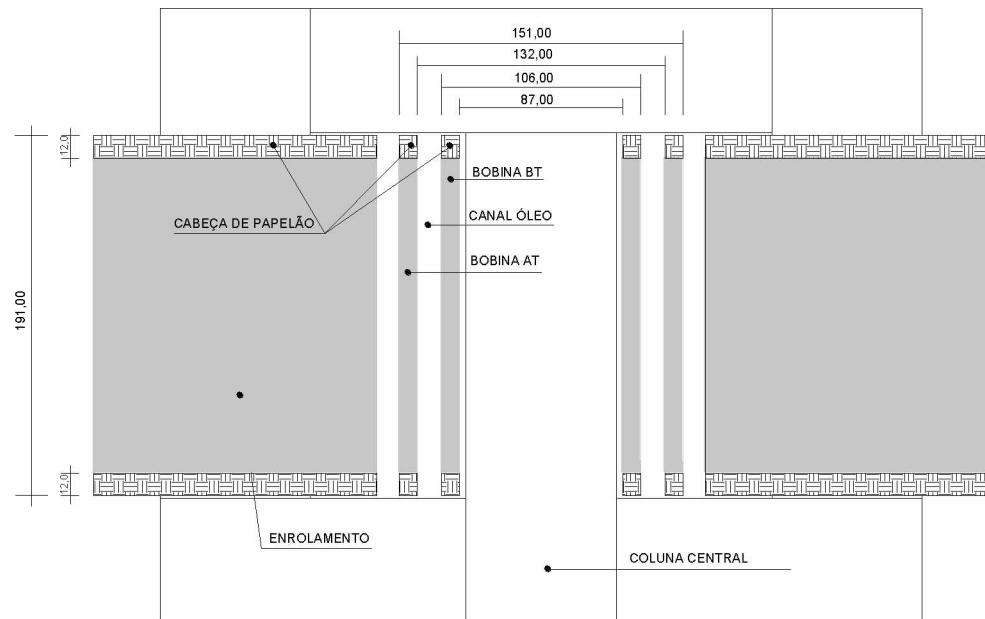
Figura 3.3 - Vistas do núcleo do transformador sob estudo: (a) frontal; (b) lateral.



Fonte: Azevedo (2007).

Complementarmente, apresenta-se na Figura 3.4 uma segunda vista frontal do núcleo. Todavia, nesta apresenta-se detalhamentos referentes aos enrolamentos.

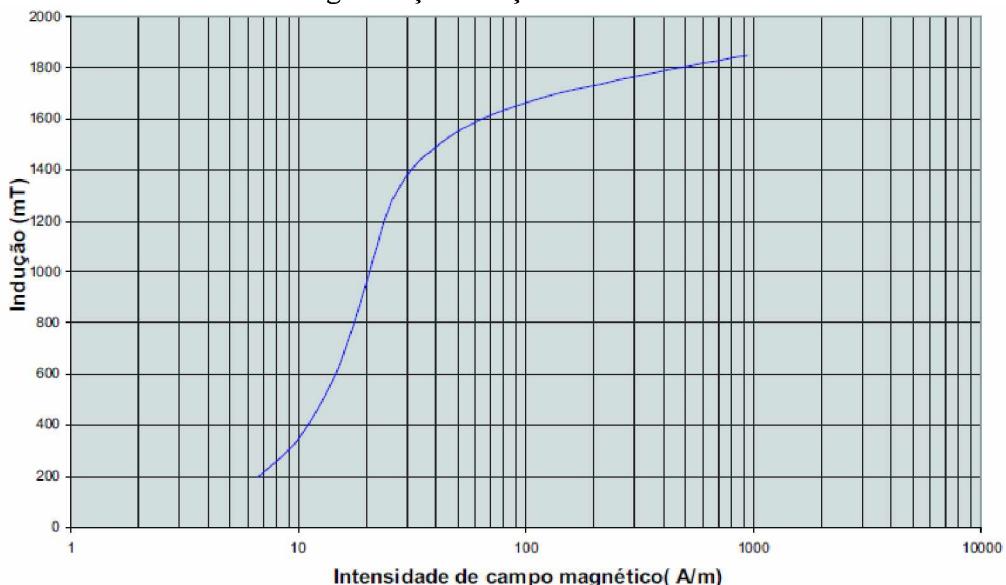
Figura 3.4 - Vista frontal do transformador sob estudo, considerando os enrolamentos.



Fonte: Rosentino (2010).

Por fim, para levar-se em conta os efeitos de saturação magnética, torna-se essencial a representação da característica de magnetização do equipamento. Nesse sentido, mostra-se na Figura 3.5 a curva de magnetização da chapa de silício utilizada no transformador estudado.

Figura 3.5 - Características de magnetização do aço silício utilizado no transformador sob estudo.



Fonte: Azevedo (2007).

A Tabela 3.2 apresenta alguns pontos da curva de magnetização exposta anteriormente.

Tabela 3.2 - Pontos específicos da curva B-H da Figura 3.5.

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

Fonte: Azevedo (2007).

3.3 MODELAGEM DO TRANSFORMADOR SOB ESTUDO NO FEMM

A partir do exposto, modelou-se o transformador sob estudo no FEMM. Ressalta-se que os enrolamentos do transformador foram modelados camada por camada e espira por espira, conforme fora feito em Rosentino (2010).

Barra, Rosentino e Delaiba (2016) apresentam em suas pesquisas a modelagem dos enrolamentos desse transformador em três versões, quais sejam: considerando-se enrolamento único, considerando-se o enrolamento camada por camada e por fim, considerando-se o enrolamento camada por camada e espira por espira. Constatou-se que, apesar de uma boa proximidade entre as modelagens, a modelagem camada por camada e espira por espira oferece informações mais detalhadas e acuradas, além de representar os enrolamentos de forma mais fidedigna. Nesse sentido, esta é a modelagem empregada neste trabalho.

Salienta-se ainda que foram considerados três entreferros no modelo implementado no FEMM, quais sejam: entreferro associado à coluna externa esquerda e culatras (lado esquerdo) superior e inferior (\mathfrak{R}_e), entreferro associado à coluna central (\mathfrak{R}_c) e entreferro associado à coluna externa direita e às culatras (lado direito) inferior e superior (\mathfrak{R}_d). Os valores de relutância utilizados foram obtidos por Saraiva (2004). Da mesma forma que Rosentino (2010), de posse desses valores de relutância, são calculados os valores das espessuras dos entreferros (ℓ), sendo eles, os inseridos no FEMM. A Equação 3.1 permite a realização desses cálculos. Os valores das relutâncias e as espessuras dos entreferros decorrentes estão apresentados na Tabela 3.3.

$$\mathfrak{R} = \frac{\ell}{\mu_0 \times A} \quad (3.1)$$

Em que:

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

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

A : Área da seção transversal da coluna [m^2];

μ_0 : Permeabilidade magnética do ar [H/m].

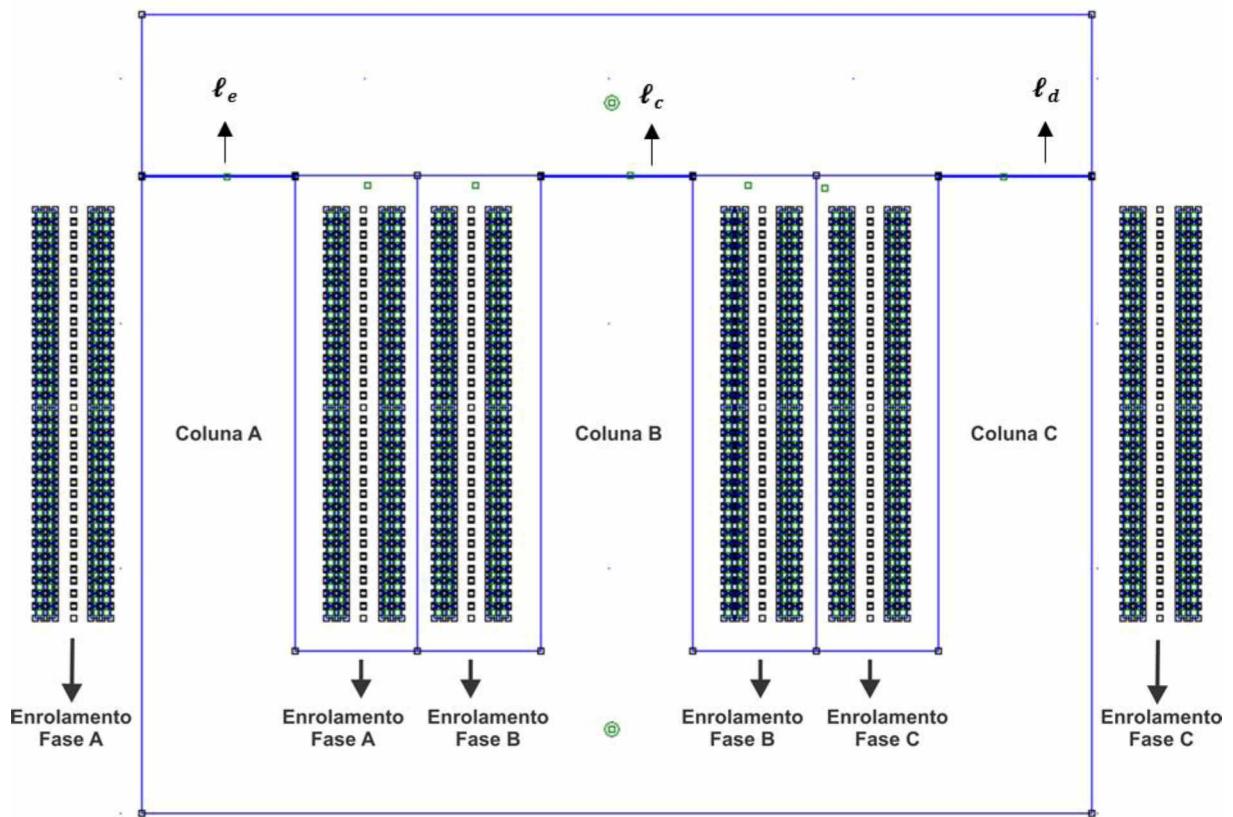
Tabela 3.3 - Valores das relutâncias e das espessuras de entreferros do transformador sob estudo.

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

Fonte: Rosentino (2010).

Por fim, como condição de contorno do modelo, o próprio tanque do transformador é utilizado. Apresenta-se, portanto, a modelagem do transformador trifásico sob estudo na Figura 3.6.

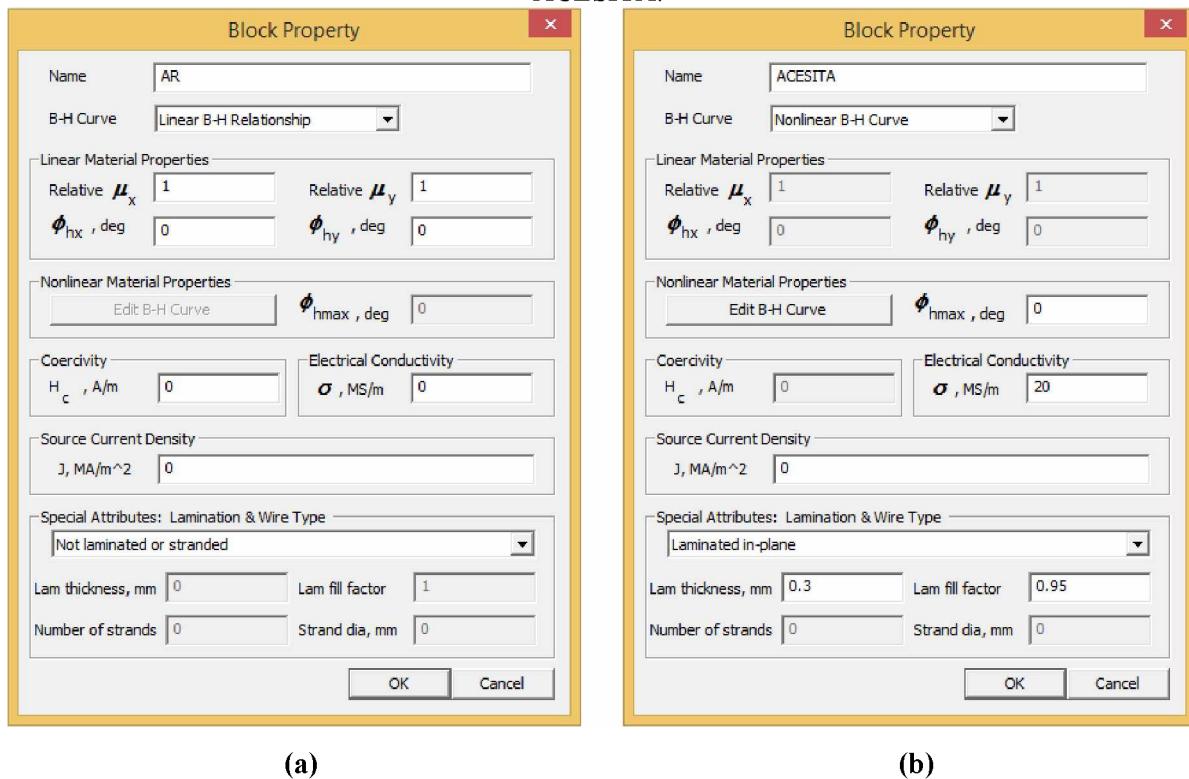
Figura 3.6 - Transformador sob estudo implementado no FEMM.



Fonte: Autor.

No que se refere aos materiais incorporados ao modelo, utiliza-se quatro diferentes tipos de materiais, quais sejam: ACESITA, AR, ENR_AT e ENR_BT. O primeiro material foi definido para toda a região do núcleo ferromagnético, onde leva-se em conta a curva de magnetização da chapa de aço silício utilizada no núcleo apresentada na Figura 3.5 e seus pontos específicos na Tabela 3.2. O material AR foi definido para as regiões do tanque, entreferros, entre espiras e também na janela do transformador. Ressalta-se que para os propósitos aqui almejados (análises magnéticas), as propriedades do ar e do óleo são semelhantes (ROSENTINO, 2010). Por fim, os materiais ENR_AT e ENR_BT definem os enrolamentos externos (AT) e internos (BT). Salienta-se ainda, que como estes dois últimos materiais são condutores, eles estão associados com circuitos elétricos, onde são requeridos valores das correntes em cada enrolamento e em cada fase. A Figura 3.7 ilustra a definição do material AR (que representa também os materiais ENR_AT e ENR_BT) e do material ACESITA.

Figura 3.7 - Definição dos materiais na implementação do transformador no FEMM: (a) AR; (b) ACESITA.

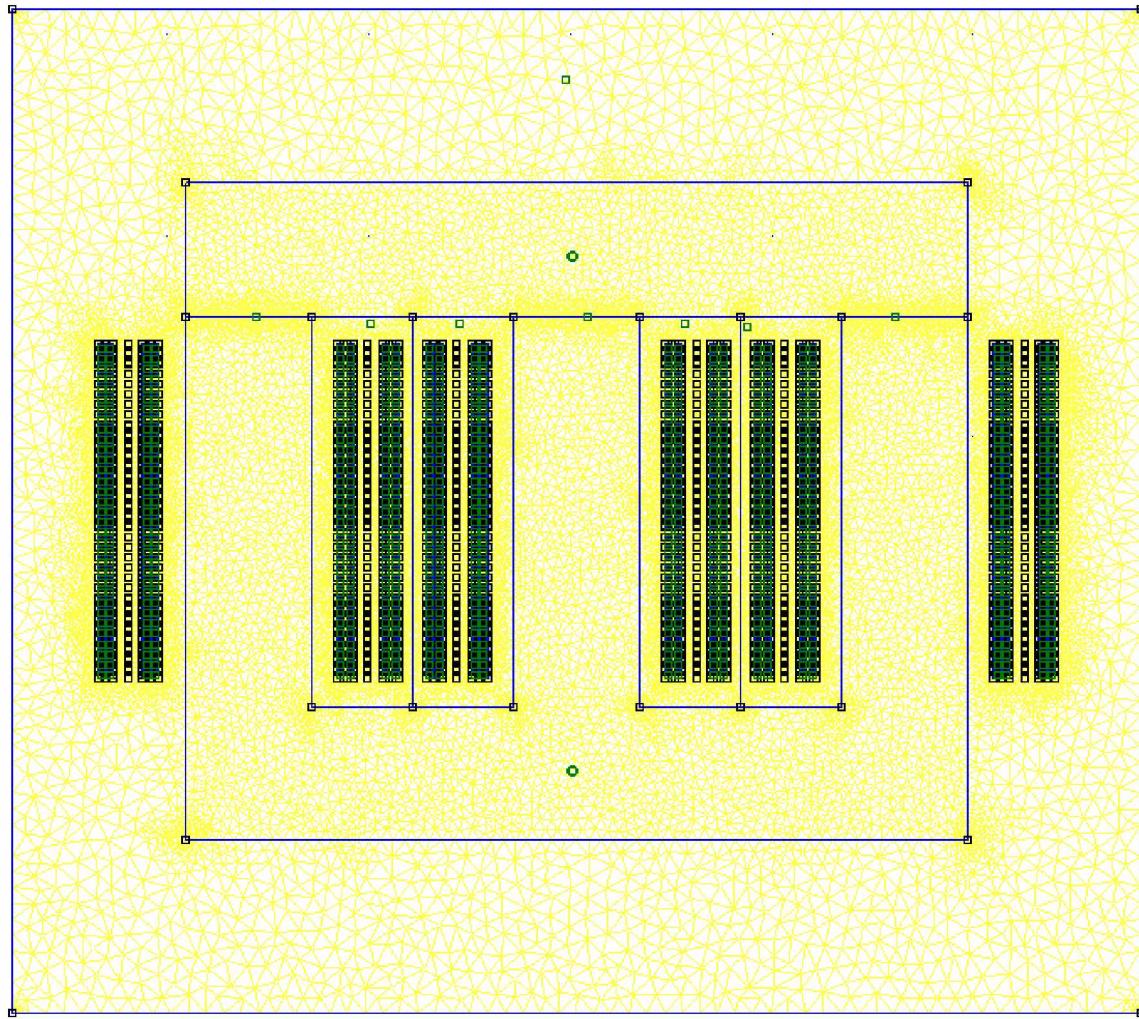


Fonte: Autor.

Conforme já exposto, os materiais ENR_AT e ENR_BT estão associados com os circuitos elétricos AT_A, AT_B, AT_C, BT_A, BT_B e BT_C. Cada um destes circuitos representa os valores de corrente elétrica em cada enrolamento e em cada fase do transformador. A obtenção das correntes elétricas para cada evento foi feita por intermédio do ATP. Para isso, utilizou-se a modelagem de transformador de três colunas, conforme Saraiva (2004), que fora utilizada com sucesso também em (ROSENTINO, 2010). As correntes trifásicas, bem como suas formas de ondas, serão apresentadas separadamente para cada evento.

Dessa maneira, pela inserção das correntes elétricas no modelo exposto acima, foi gerada a malha no FEMM, conforme apresenta-se na Figura 3.8. Essa malha gerada é do tipo triangular através da criação por parte do *software* de 443.179 nós, e representa todos os eventos ora estudados neste trabalho.

Figura 3.8 - Malha gerada no FEMM do modelo do transformador.



Fonte: Autor.

Deve-se ressaltar que a análise por intermédio dos elementos finitos é estática, no caso do FEMM. Isto posto, para cada evento, o instante de tempo a ser analisado é aquele cuja corrente seja máxima.

Diante do exposto, na sequência deste capítulo vários estudos de caso serão apresentados no sentido de compreender os esforços eletromecânicos para as várias eventualidades.

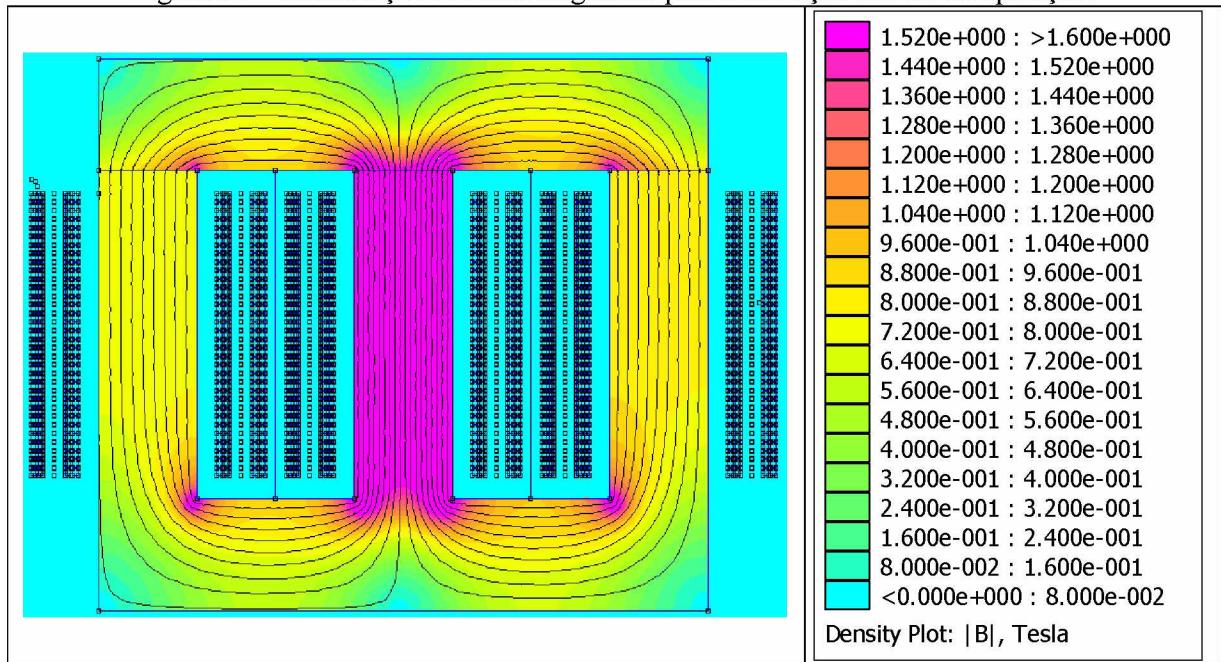
3.3.1 Transformador Trifásico de 15 kVA sob Condições Nominais

Na situação frequentemente experimentada pelo transformador, as correntes elétricas possuem magnitudes reduzidas, fazendo com que os fluxos de dispersão se tornem, também, pequenos. Dessa forma, pouco se espera que esse tipo de evento provoque falhas mecânicas aos transformadores. Todavia, essa é a situação operativa onde mais se conhece os resultados

elétricos e magnéticos do transformador. Portanto, se as simulações computacionais apresentam resultados que condizem com valores fornecidos pelos fabricantes, a modelagem torna-se consistente. Nesse sentido, as correntes elétricas apresentadas no Capítulo II para situações nominais são empregadas no FEMM. Deve-se enfatizar que o instante analisado é aquele onde foram observados os picos de corrente na fase B (56,632 [A] no enrolamento externo e 55,431 [A] no enrolamento interno), sendo este momento 5,5 [ms].

Após a inserção das correntes elétricas no modelo implementado, geram-se as malhas, representadas na Figura 3.8. Posteriormente, a isto, a característica de distribuição de fluxo magnético no interior do transformador pode ser visualizada para o instante de tempo ora escolhido. Isto posto, apresentam-se os resultados magnéticos obtidos para a condição normal de operação na Figura 3.9.

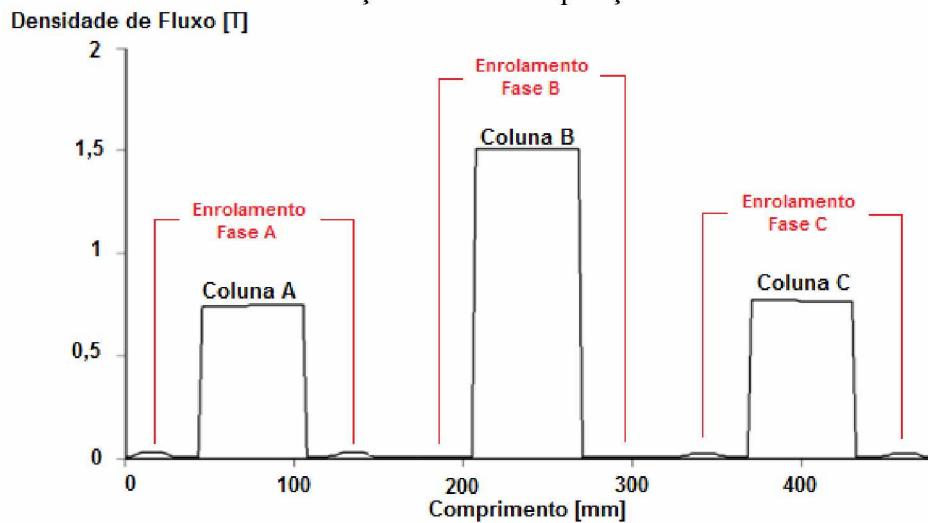
Figura 3.9 - Distribuição de fluxo magnético para a condição normal de operação.



Fonte: Autor.

Na Figura 3.9, observa-se que a densidade de fluxo na coluna central vale aproximadamente 1,55 [T], valor este, informado pelo fabricante. Nota-se também que praticamente inexistem fluxos magnéticos de dispersão. Complementarmente, a Figura 3.10 ilustra o comportamento da densidade de fluxo magnético ao longo do transformador.

Figura 3.10 - Densidade de fluxo nas colunas e nas regiões entre enrolamentos de cada fase para a condição nominal de operação.



Fonte: Autor.

Na Figura 3.10 pode-se perceber que, de fato, o fluxo de dispersão entre os enrolamentos é desprezível. Portanto, o produto vetorial entre este fluxo de dispersão e a corrente em condição nominal, produzirão forças eletromecânicas também reduzidas. Contudo, a Tabela 3.4 apresenta para fins meramente informativos, as forças radiais totais experimentadas pelos enrolamentos interno e externo nessa condição operacional. Adicionalmente, são apresentados os valores encontrados pela metodologia analítica para ter-se uma ligeira comparação.

Tabela 3.4 - Forças radiais totais nos enrolamentos externo e interno em condições nominais.

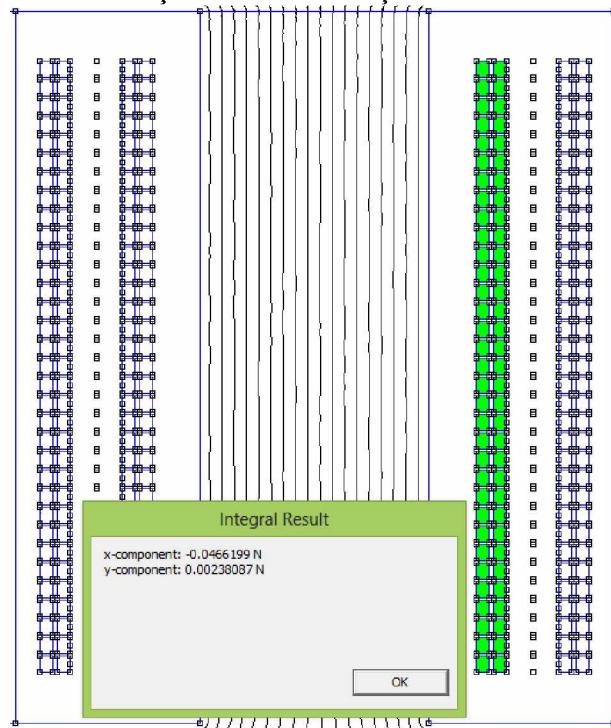
Tipo de Análise	F_r [N] - EI	F_r [N] - EE
FEMM	14,1336	20,9107
Metodologia Analítica	15,266	23,366

Fonte: Autor.

A Figura 3.11 ilustra um dos passos para a obtenção da força radial total descrita acima. No entanto, deve-se salientar que o modelo implementado faz uso de uma modelagem do tipo planar, com profundidade 1 [mm], o que implica na necessidade da interpretação dos valores em [N/mm] e não em [N]. Por conseguinte, caso o objetivo seja estimar o valor total da força em [N], uma média deve ser realizada entre os valores de força distribuída entre os lados esquerdo e direito do enrolamento em questão para que, por fim, leve-se em conta também o comprimento médio da espira. Nesse sentido, após a soma dos valores distribuídos de força para cada lado do enrolamento, faz-se uma média e multiplicam-se esses valores pelo comprimento médio, assumido como ($\pi \cdot 96,5$ [mm]) para espiras do enrolamento interno e

($\pi \cdot 141,5$ [mm]) para espiras do enrolamento externo. Esse mesmo procedimento também será aplicado para os eventos estudados na sequência deste trabalho.

Figura 3.11 - Extração da soma de forças distribuídas no FEMM.



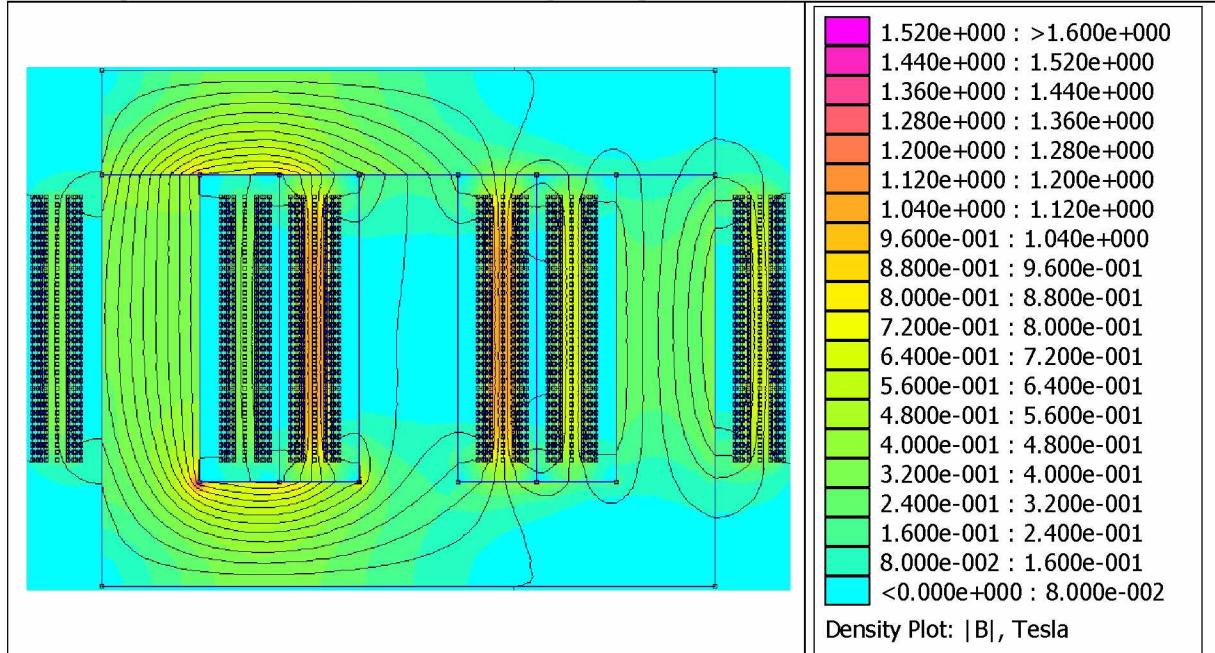
Fonte: Autor.

3.3.2 Transformador Trifásico de 15 kVA sob Curto-Círcuito Trifásico

Da mesma forma que fora feito para o caso anterior, as correntes a serem empregadas são aquelas apresentadas no Capítulo II. Nessa situação operacional, observa-se que o maior valor de pico da corrente assimétrica de curto-círcuito trifásico aconteceu na fase B, com aproximadamente 2.192,14 [A] no primário e 2.191,88 [A] no secundário, no instante de tempo 8,5 [ms]. Dessa forma, a atenção dos estudos será direcionada às forças eletromecânicas ocorrentes apenas nessa fase e nesse instante de tempo.

Novamente, pela inserção das correntes elétricas observadas no instante de tempo 8,5 [ms] no FEMM, é gerada uma malha, já representada pela Figura 3.8, a qual, após o processamento do modelo, permite a visualização da nova distribuição de fluxo magnético no transformador, que pode ser observada na Figura 3.12.

Figura 3.12 - Distribuição de fluxo magnético para a condição de curto-círcuito trifásico.

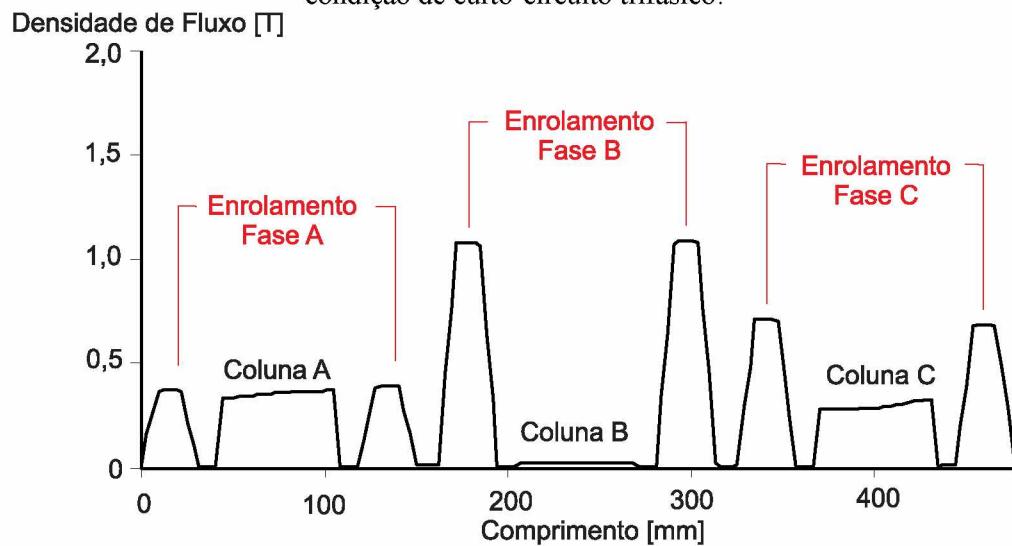


Fonte: Autor.

De forma divergente à anterior, na Figura 3.12 verifica-se que grande parte da densidade de fluxo magnético concentra-se entre os enrolamentos, sobremaneira da fase B, onde observa-se um fluxo de dispersão de aproximadamente 1,1 [T]. Dessa forma, esse elevado valor de fluxo de dispersão associado à elevada corrente de curto-círcuito trifásico, implica em elevados esforços eletromecânicos. Adicionalmente, observou-se uma redução significativa na concentração de fluxo magnético no núcleo ferromagnético.

De forma complementar, a Figura 3.13 apresenta o comportamento da densidade de fluxo magnético ao longo do transformador, onde observa-se de forma mais clara a redução significativa da concentração de fluxo nas colunas e o aumento do fluxo de dispersão entre os enrolamentos, sobremaneira da fase B.

Figura 3.13 - Densidade de fluxo nas colunas e nas regiões entre enrolamentos de cada fase para a condição de curto-círcuito trifásico.



Fonte: Autor.

Na sequência, os resultados e análises relacionadas às forças eletromagnéticas radiais e axiais atrelados à condição de curto-círcuito trifásico, para os enrolamentos da fase B do transformador.

3.3.2.1 Forças Radiais para Curtos-Circuitos Trifásicos

Apresenta-se na Figura 3.14 a força radial distribuída por espira ao longo do enrolamento externo (EE), ao lado direito e esquerdo do núcleo. Deve-se salientar que para todos os casos subsequentes, a espira está representando a somatória das forças atuantes nas espiras nas duas camadas. Nesse sentido, para os gráficos apresentados o eixo y varia de 1 a 33. Apresenta-se também a força distribuída por espira ao longo do enrolamento interno (EI), na Figura 3.15. As setas indicadas em todas as figuras subsequentes tão somente indicam o sentido das forças atuantes visando facilitar a análises no tocante ao sentido das mesmas.

Figura 3.14 - Força radial de tração distribuída no EE.

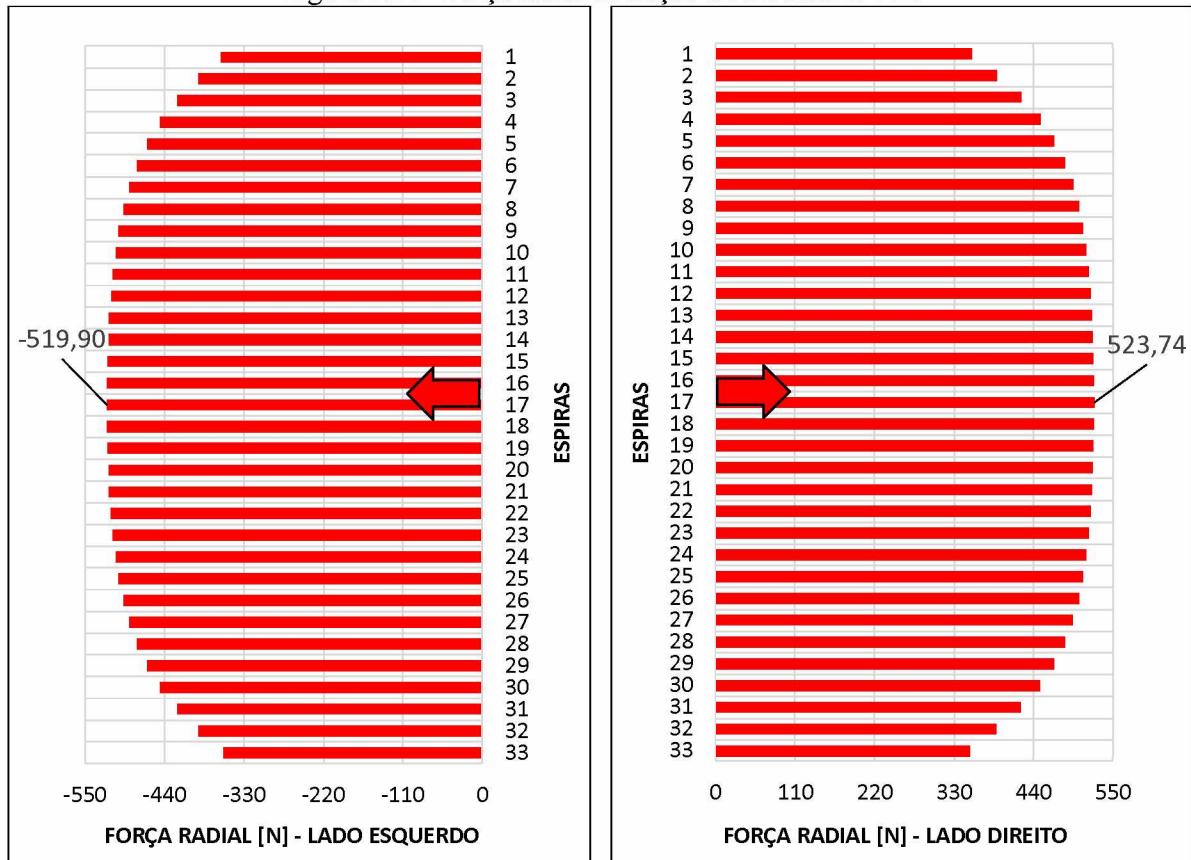
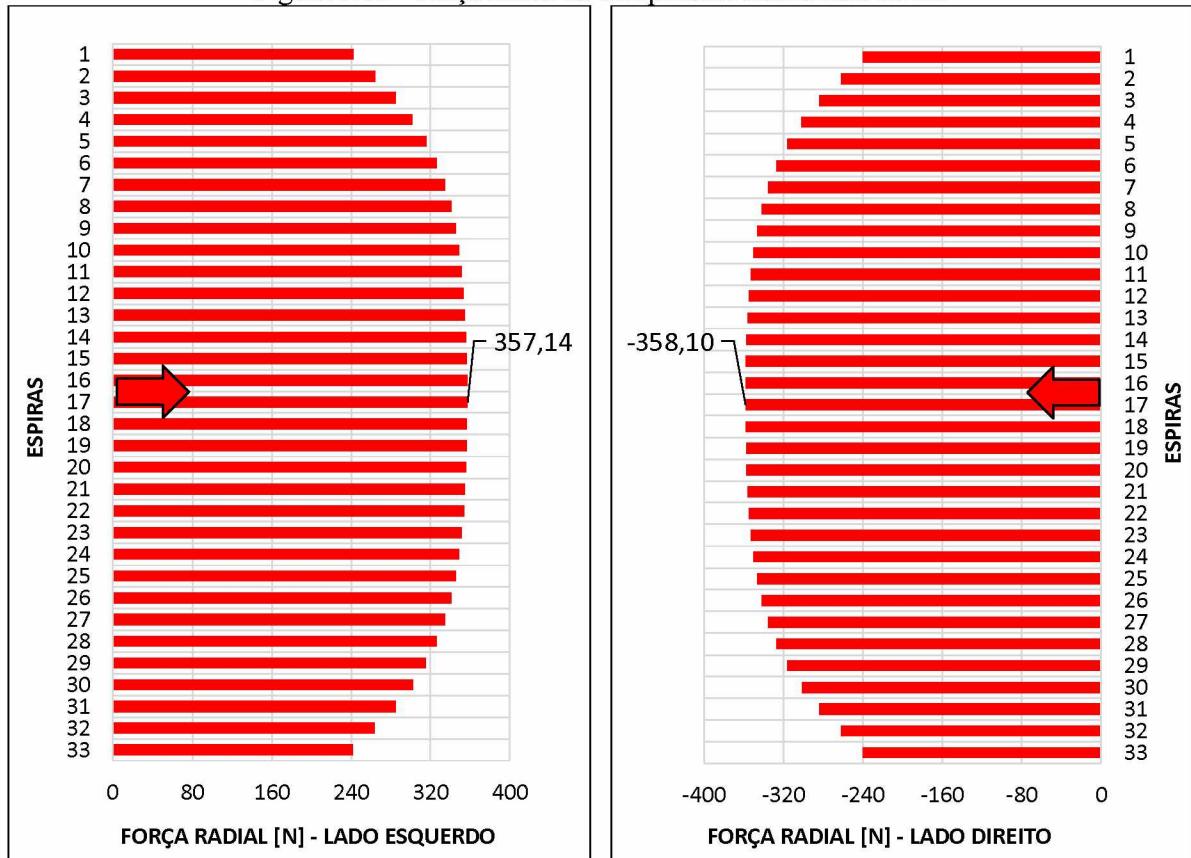


Figura 3.15 - Força radial de compressão distribuída no EI.



Fonte: Autor.

As Figuras 3.14 e 3.15 comprovam que as forças radiais tendem a tracionar os enrolamentos externos e a comprimir os enrolamentos internos do transformador. Percebe-se também que os maiores valores de forças radiais distribuídas são observados no ponto médio dos enrolamentos. Objetivando a comparação dos valores de força radial distribuída encontrada por intermédio do FEMM, com aqueles ora estimados pela metodologia analítica, realiza-se uma média entre a força radial distribuída observada na esquerda do núcleo com essa mesma força observada na direita do núcleo, dividindo-se o resultado pelo comprimento médio, conforme já comentado anteriormente. Para essa comparação, o valor de força considerado entre todas as espiras do enrolamento, é aquele observado no ponto médio, por este ser o maior. A Tabela 3.5 apresenta esses valores de força radial distribuída em [N/mm] em conjunto com aqueles estimados pela metodologia analítica no Capítulo II.

Tabela 3.5 - Forças radiais distribuídas nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito trifásico.

Tipo de Análise	$F_{\text{rad-dist}}$ [N/mm] - EI	$F_{\text{rad-dist}}$ [N/mm] - EE
FEMM	1,1796	1,1739
Metodologia Analítica	1,1930	1,1933

Fonte: Autor.

Em observância à Tabela 3.5, constata-se que os valores apresentados são muito próximos. Deve-se ressalvar que as estimativas de forças radiais distribuídas são de grande importância, pois observa-se pela Equação 2.17 do Capítulo II que a partir das mesmas, os valores dos estresses eletromecânicos são estimados.

Pelas Figuras 3.14 e 3.15 é possível estimar a força radial total para cada enrolamento, pela soma das forças radiais apresentadas para cada espira. Com esse procedimento são contemplados na Tabela 3.6 os valores de força radial total para cada enrolamento, onde apresenta-se também os valores obtidos pela metodologia.

Tabela 3.6 - Forças radiais totais nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito trifásico.

Tipo de Análise	F_r [N] - EI	F_r [N] - EE
FEMM	$21,664 \times 10^3$	$31,669 \times 10^3$
Metodologia Analítica	$23,871 \times 10^3$	$35,010 \times 10^3$

Fonte: Autor.

Por fim, mostra-se na Tabela 3.7 o estresse radial médio para cada enrolamento sob a condição de curto-círcuito trifásico.

Tabela 3.7 - Estresses radiais médios nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcuito trifásico.

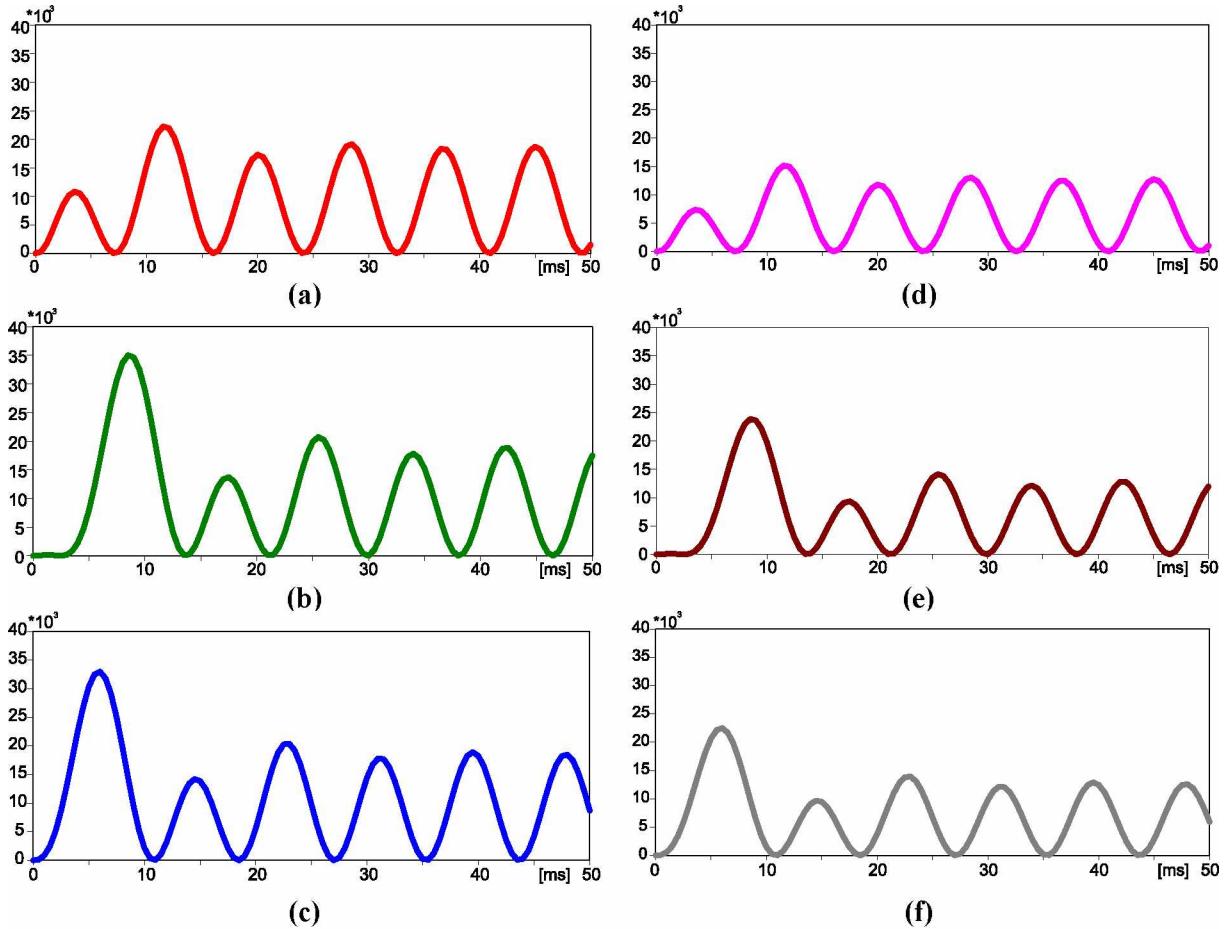
Tipo de Análise	$\sigma_{r-\text{médio}} [N/mm^2]$ - EI	$\sigma_{r-\text{médio}} [N/mm^2]$ - EE
FEMM	3,6138	5,2730
Metodologia Analítica	3,6548	5,3603

Fonte: Autor.

De forma complementar, a Figura 3.16 mostra a força radial total de tração e compressão em função do tempo para todas as fases. Esses resultados foram obtidos por meio da implementação das formulações analíticas nas formas de onda das correntes elétricas obtidas pelo ATP. Portanto, os valores apresentados estão em consonância com a metodologia analítica. Todavia, essa figura é exposta tão somente no sentido de enfatizar que o momento de pico (8,5 [ms]) proporciona para a fase B o momento de maior força radial, mas não a maior força radial para os enrolamentos das outras fases. Esse fato justifica a desnecessidade de maiores detalhamentos para as outras fases do transformador nesse instante de tempo.

Ainda por meio da Figura 3.16, percebe-se a existência de valores expressivos de forças radiais para outros instantes de tempo, mas que nunca, em quaisquer fases, são superiores ao valor de força em análise. Não obstante, mesmo com magnitudes inferiores às observadas nos enrolamentos da fase B, os enrolamentos das fases A e C também são penalizados mecanicamente.

Figura 3.16 - Forças radiais de tração e compressão em função do tempo no enrolamento: (a) externo da fase A; (b) externo da fase B; (c) externo da fase C; (d) interno da fase A; (e) interno da fase B; (f) interno da fase C.

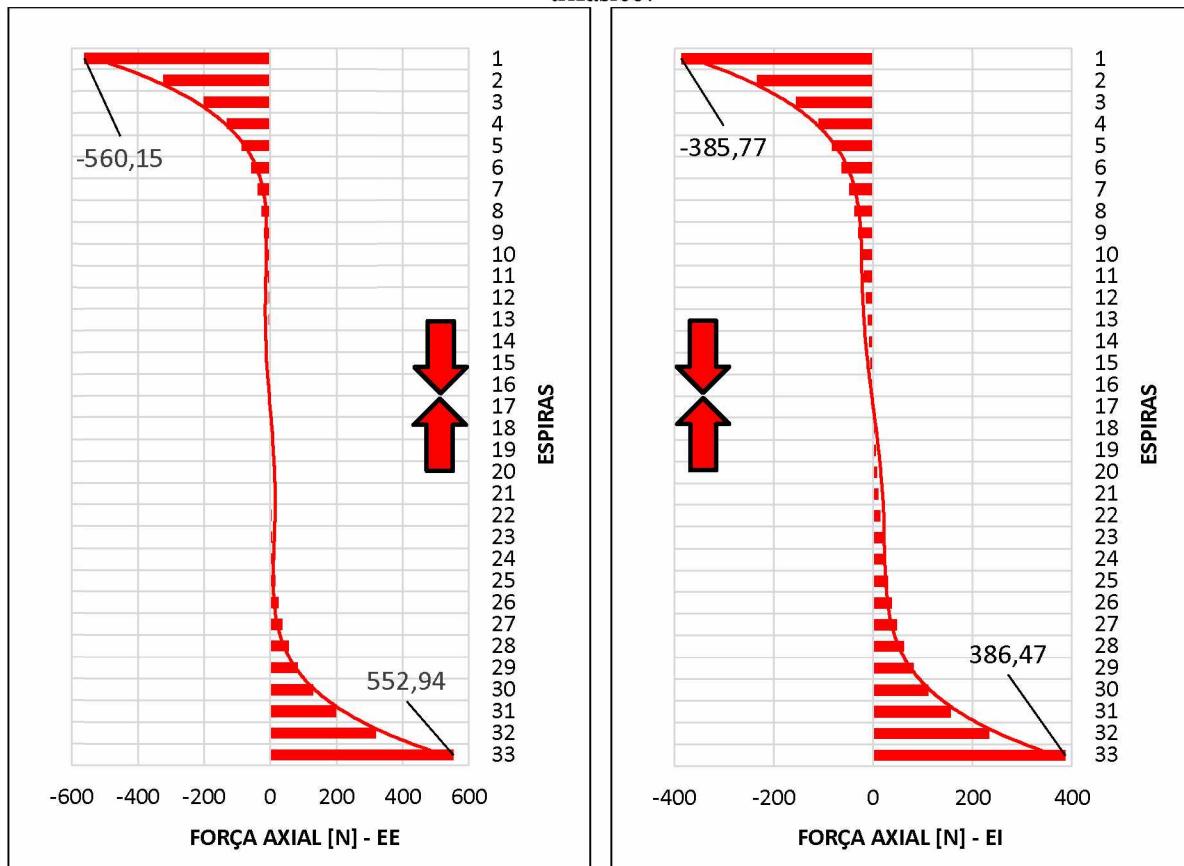


Fonte: Autor.

3.3.2.2 Forças Axiais para Curtos-Circuitos Trifásicos

A força axial distribuída por espira do enrolamento externo e interno é apresentada na Figura 3.17. O efeito de compressão em ambos enrolamentos é constatado. Ressalta-se ainda que, devido à simetria e aos valores apresentados na figura em questão, caso fossem somadas as forças axiais ao longo do enrolamento (como no caso das forças radiais) ter-se-iam, valores que tendem a zero. No entanto, nota-se ainda que existem forças elevadas e estas incidem nas extremidades dos enrolamentos.

Figura 3.17 - Força axial distribuída total em ambos enrolamentos, para condições de curto-círcuito trifásico.



Fonte: Autor.

No que se refere, de forma mais específica, às forças axiais existentes nas extremidades dos enrolamentos, apresenta-se na Tabela 3.8 um comparativo dos valores expostos neste capítulo com aqueles encontrados anteriormente através da metodologia analítica.

Tabela 3.8 - Força axial nas extremidades dos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcuito trifásico.

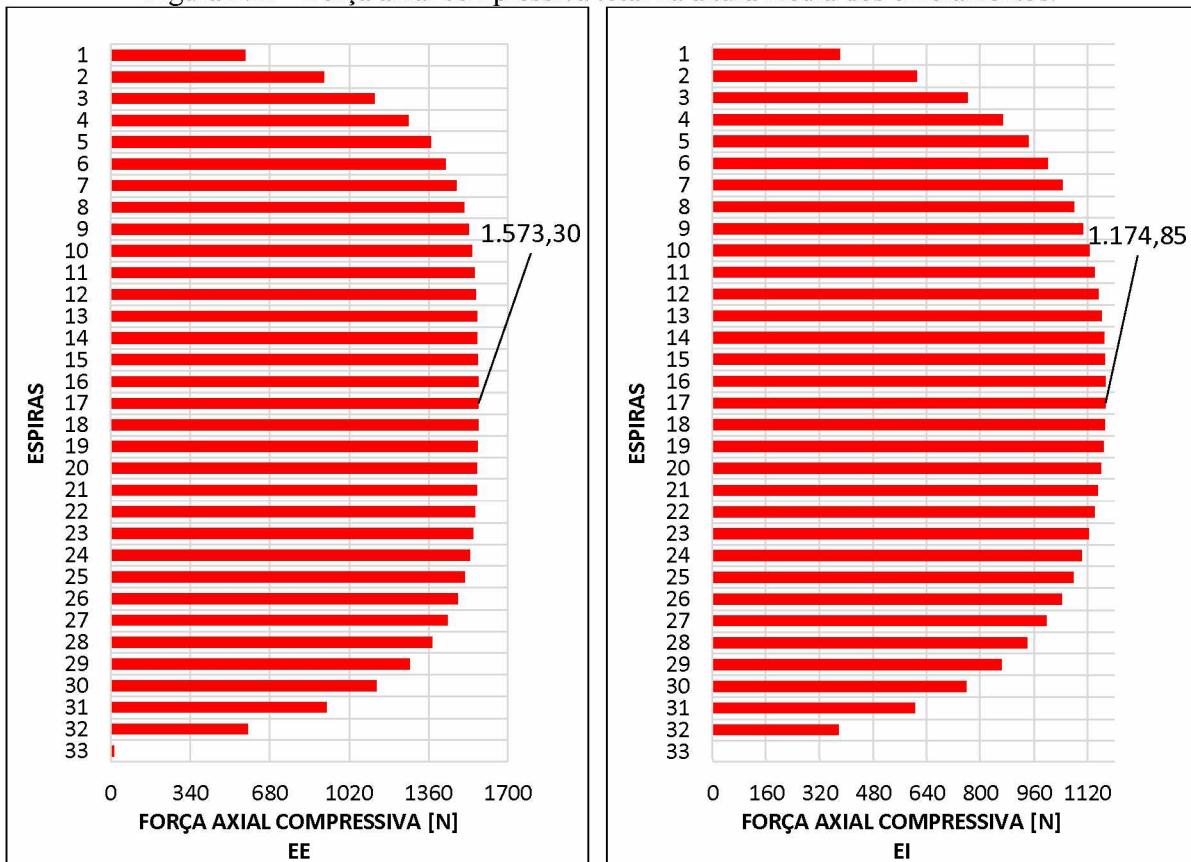
Tipo de Análise	$F_a [N] - EI$	$F_a [N] - EE$
FEMM	$0,386 \times 10^3$	$0,556 \times 10^3$
Metodologia Analítica	$0,579 \times 10^3$	$0,579 \times 10^3$

Fonte: Autor.

Ainda acerca da Figura 3.17, pode-se observar que caso somadas as áreas, delimitadas pela linha de tendência, formadas pelas forças radiais distribuídas totais positivas e negativas, ter-se-ia um valor que tende a zero. Isto é, a soma acumulada das forças axiais ao longo do enrolamento tende a zero. Dessa forma, se a soma iniciar na primeira espira, a força axial distribuída total acumulada na 33ª espira é desprezível, como pode-se notar na Figura 3.18 para

ambos enrolamentos. Não obstante, por meio desse somatório constata-se uma força axial compressiva elevada na altura média dos enrolamentos, conforme também pode ser notado na Figura 3.18.

Figura 3.18 - Força axial compressiva total na altura média dos enrolamentos.



Fonte: Autor.

É factível reforçar que a somatória apresentada na figura anterior foi realizada com início na 1^a espira. Devido a isso, a força correspondente à espira 33 é aproximadamente zero, para os dois enrolamentos, devido à simetria anteriormente discutida.

Mostra-se na Tabela 3.9, por fim, os valores das forças axiais compressivas totais em ambos enrolamentos e da força axial compressiva total, comparando-os com os resultados que foram obtidos anteriormente pela da metodologia analítica.

Tabela 3.9 - Força axial compressiva total nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcuito trifásico.

Tipo de Análise	F_c [N] - EI	F_c [N] - EE	F_{cT} [N]
FEMM	$2,349 \times 10^3$	$3,147 \times 10^3$	$5,496 \times 10^3$
Metodologia Analítica	$1,87 \times 10^3$	$3,74 \times 10^3$	$5,62 \times 10^3$

Fonte: Autor.

Diferentemente do caso das forças radiais, nota-se para as forças axiais que os resultados obtidos pelas duas metodologias são ligeiramente diferentes. Esse fato é observado nas Tabelas 3.8 e 3.9. Todavia, essas diferenças mais acentuadas já eram, de certa forma, esperadas tendo em vista que existe maior complexidade para a estimativa de forças axiais. Nesse sentido, aproximações analíticas de forças axiais podem não ter resultados tão exatos, sobretudo, neste caso, por não se levar em conta a não uniformidade do campo de dispersão radial.

Ainda em relação ao método analítico, destaca-se que a proximidade do tanque, núcleo e a presença das colunas vizinhas influenciam no cálculo das forças axiais nas extremidades dos enrolamentos. Outrossim, a distribuição de fluxo nas extremidades é totalmente não uniforme.

A respeito das forças compressivas totais, observa-se total coerência. Porém, há bastante diferença nas forças compressivas nos enrolamentos. Waters (1966) ressalta que a distribuição entre os enrolamentos da força compressiva total depende do espaço entre o enrolamento interno e o núcleo, comparado com a largura do ducto. Não obstante, Waters (1966) considera, que para grande maioria dos transformadores, aproximadamente dois terços da força compressiva total é atribuída ao enrolamento interno e um terço ao enrolamento externo. Isso posto, verificou-se divergência entre essa consideração e os resultados obtidos por intermédio do método dos elementos finitos, tendo em vista a diferença da proporção de distribuição da força compressiva total. Além dessa diferença de proporcionalidade, ela é justificada pela distribuição, consideravelmente simétrica, do campo de dispersão em ambos os enrolamentos.

Sob outra perspectiva, admite-se a existência de limitações por parte do programa utilizado, uma vez que por ser 2D, considera-se que a distribuição do fluxo de dispersão seja semelhante ao longo da circunferência.

Nessa conjuntura, verifica-se que a metodologia analítica, devido às suas aproximações, pode se distanciar da exatidão. Por outro lado, devido ao fato de a modelagem 2D considerar características geométricas e magnéticas do transformador de forma mais fidedigna, tem-se resultados mais exatos.

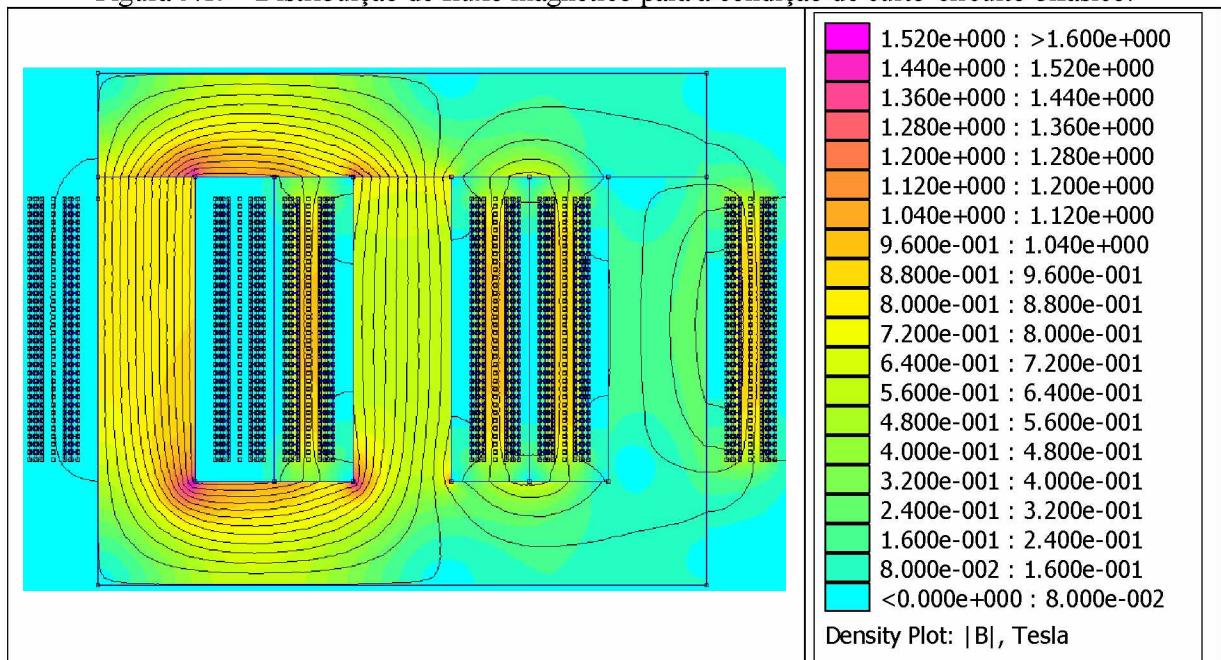
3.3.3 Transformador Trifásico de 15 kVA sob Curto-Círcuito Bifásico

As correntes elétricas que percorrem os enrolamentos do transformador, quando em situações de curto-círcuito do tipo bifásico foram também obtidas por meio do ATP, e já foram apresentadas anteriormente no Capítulo II. O maior valor de pico observado da corrente assimétrica de curto-círcuito bifásico aconteceu na fase B, com magnitude aproximada de 1.980,8 [A] no primário, 1.980,0 [A] no secundário.

Diante do exposto, nota-se uma situação bem peculiar e diferente das ocorrências até então apresentadas. Para o curto-círcuito bifásico, os enrolamentos da fase B e C estão sujeitos às elevadas correntes transitórias, diferentemente do curto-círcuito trifásico onde apenas o enrolamento da fase B é penalizado de forma mais severa.

Por meio da inserção das correntes elétricas observadas no instante de tempo onde ocorre o pico no FEMM, apresenta-se na Figura 3.19 a distribuição de fluxo magnético no transformador frente à um curto-círcuito do tipo bifásico.

Figura 3.19 - Distribuição de fluxo magnético para a condição de curto-círcuito bifásico.

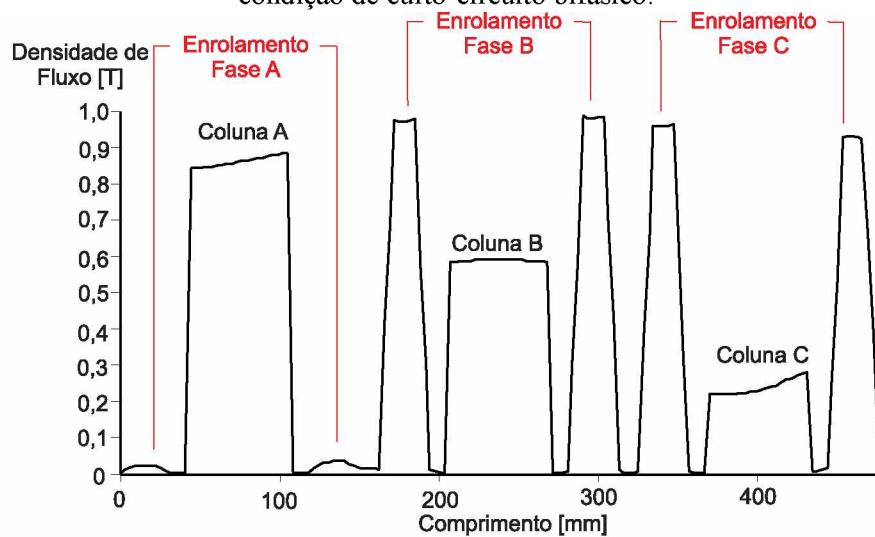


Fonte: Autor.

De forma um tanto quanto semelhante à situação onde o transformador enfrenta curtos-circuitos trifásicos, para este caso – curtos-circuitos bifásicos – é observada uma grande concentração de fluxo magnético entre os enrolamentos. Encontra-se a magnitude média de 0,9686 [T] de fluxo de dispersão entre os enrolamentos da fase B e de 0,9362 [T] entre os enrolamentos da fase C. Percebe-se também que este valor de fluxo de dispersão é inferior ao encontrado na situação anterior. Todavia, por ser fluxo de dispersão, ainda assim, é um valor consideravelmente elevado. Ainda se percebe uma redução significativa da concentração de fluxo magnético no núcleo quando comparado com as condições nominais de operação. Porém, essa redução é menos acentuada quando comparada ao caso do curto-círcuito trifásico.

A Figura 3.20 apresenta, de forma complementar, a distribuição de fluxo magnético ao longo do transformador.

Figura 3.20 - Densidade de fluxo nas colunas e nas regiões entre enrolamentos de cada fase para a condição de curto-círcuito bifásico.



Fonte: Autor.

Na sequência são apresentados os resultados obtidos por meio das simulações computacionais para as condições de curto-círcuito bifásico, para os enrolamentos da fase B do transformador.

3.3.3.1 Forças Radiais para Curtos-Circuitos Bifásicos

A Figura 3.21 apresenta a força radial distribuída por espira ao longo do enrolamento externo, ao lado direito e esquerdo do núcleo para essa nova condição operativa. Sob esse mesmo enfoque, a Figura 3.22 apresenta a força distribuída por espira ao longo do enrolamento interno.

Figura 3.21 - Força radial de tração distribuída no EE para curtos bifásicos.

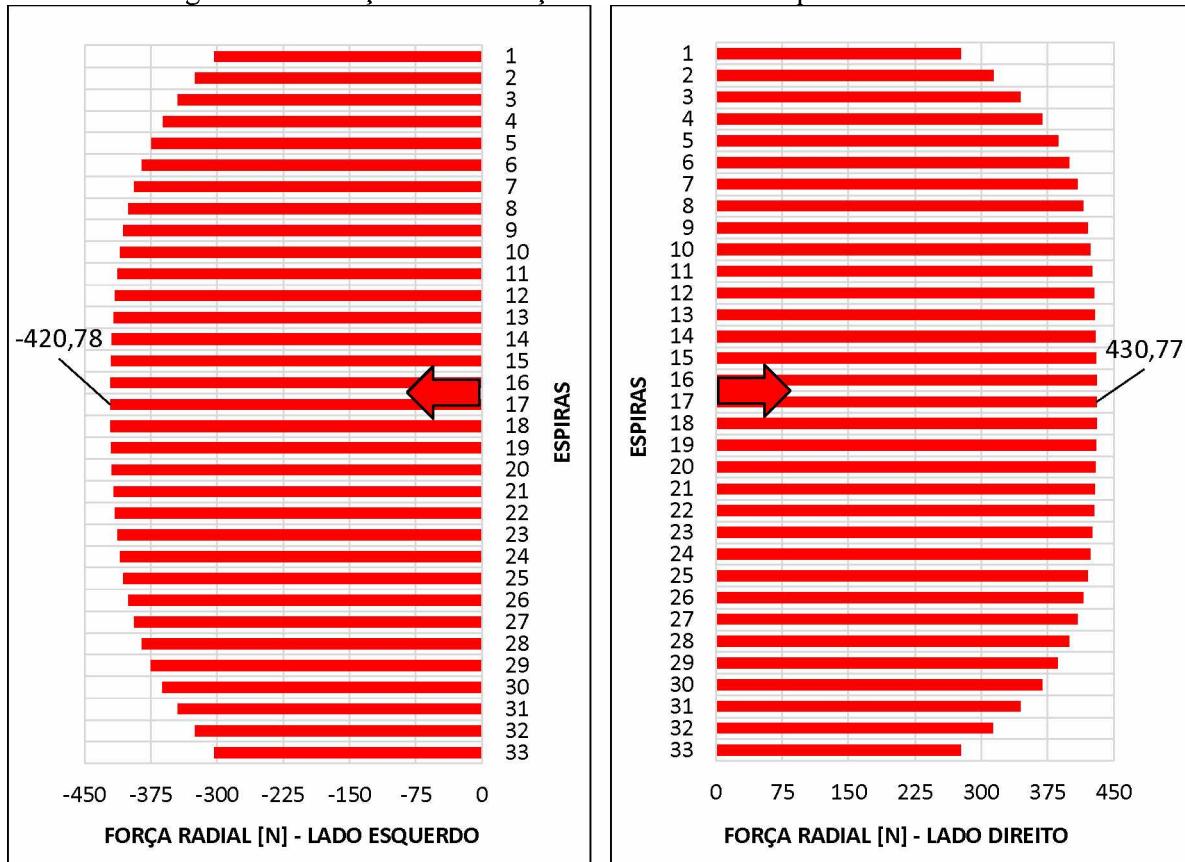
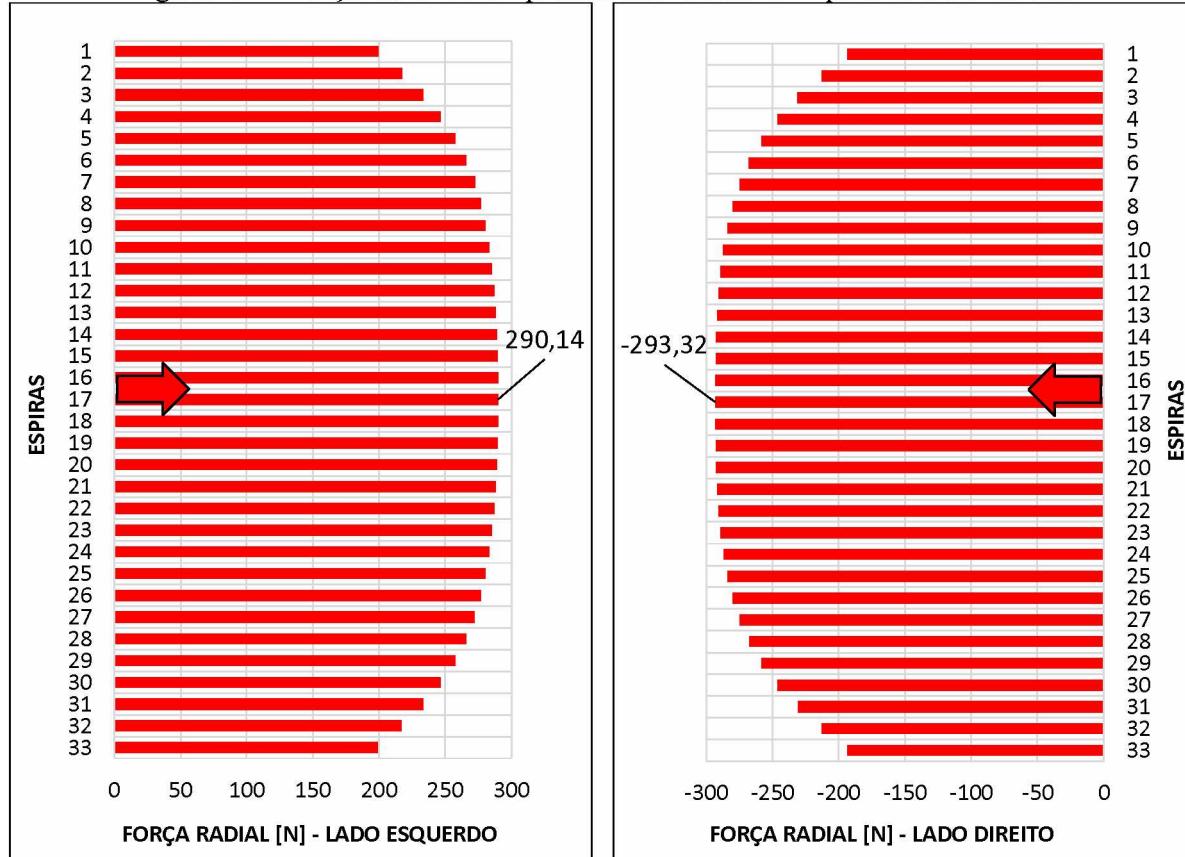


Figura 3.22 - Força radial de compressão distribuída no EI para curtos bifásicos.



Fonte: Autor.

Nas Figuras 3.21 e 3.22, observa-se que apesar das forças eletromecânicas não serem advindas de curtos-circuitos trifásicos, ainda nesse caso, as forças radiais tendem a tracionar os enrolamentos externos e a comprimir os enrolamentos internos do transformador.

Com exceção das magnitudes, verifica-se que o comportamento das forças radiais se manteve praticamente inalterado, quando comparado com os resultados obtidos para curtos-circuitos trifásicos.

A Tabela 3.10 apresenta os valores de força radial distribuída comparados com os valores estimados no Capítulo II.

Tabela 3.10 - Forças radiais distribuídas nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito bifásico.

Tipo de Análise	$F_{\text{rad-dist}} [\text{N/mm}] - \text{EI}$	$F_{\text{rad-dist}} [\text{N/mm}] - \text{EE}$
FEMM	0,9623	0,9578
Metodologia Analítica	0,9272	0,9742

Fonte: Autor.

De forma semelhante aos casos anteriores, observa-se um erro percentual pequeno. Sob outra perspectiva, estima-se agora a força radial total para cada enrolamento, pela soma das forças radiais apresentadas para cada espira. A Tabela 3.11 apresenta os valores de força radial total para cada enrolamento.

Tabela 3.11 - Forças radiais totais nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito bifásico.

Tipo de Análise	$F_r [\text{N}] - \text{EI}$	$F_r [\text{N}] - \text{EE}$
FEMM	$17,683 \times 10^3$	$25,942 \times 10^3$
Metodologia Analítica	$18,551 \times 10^3$	$28,585 \times 10^3$

Fonte: Autor.

Aponta-se na Tabela 3.12 o estresse radial médio para cada enrolamento sob a condição de curto-círcito bifásico.

Tabela 3.12 - Estresses radiais médios nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito bifásico.

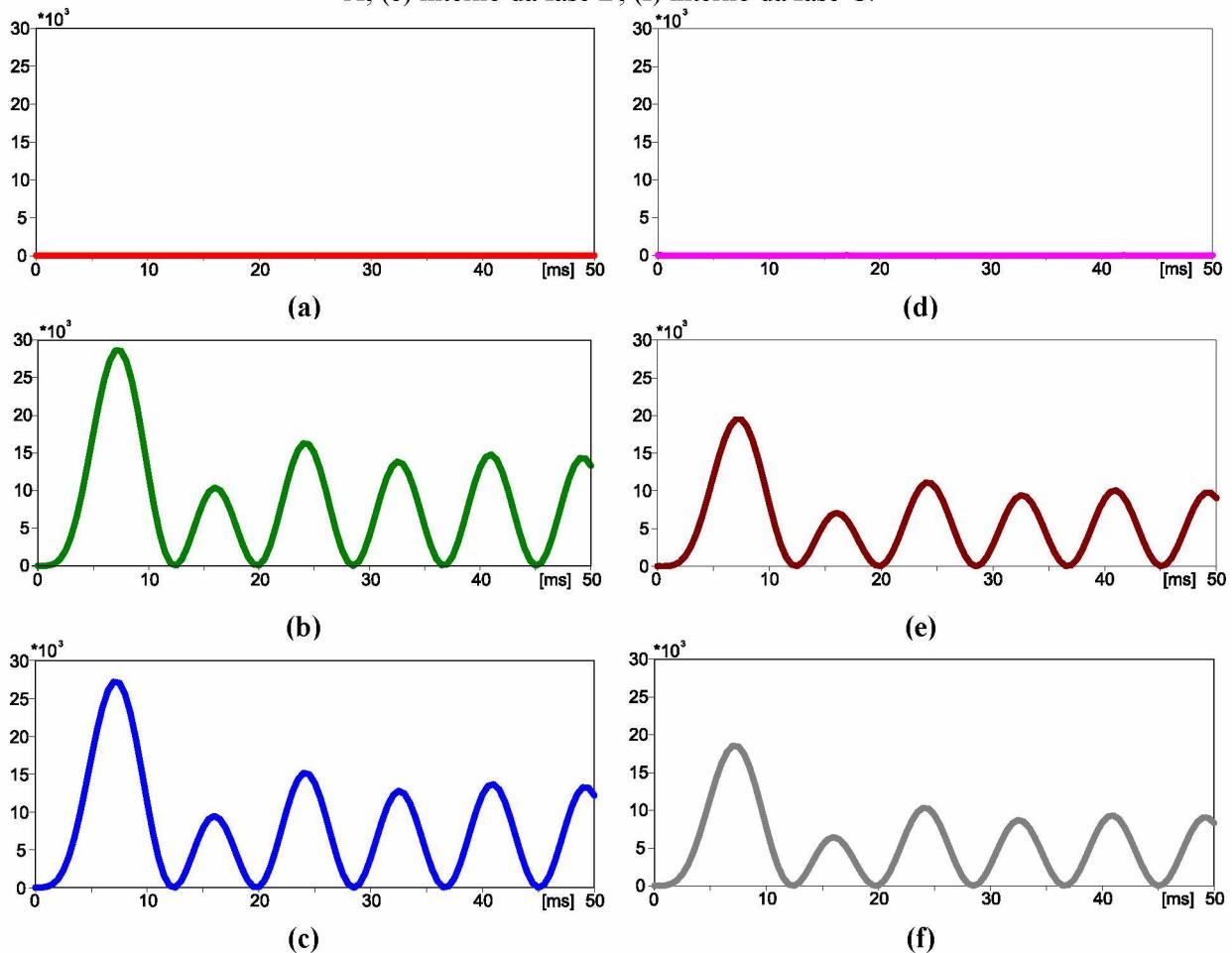
Tipo de Análise	$\sigma_{r-\text{médio}} [\text{N/mm}^2] - \text{EI}$	$\sigma_{r-\text{médio}} [\text{N/mm}^2] - \text{EE}$
FEMM	2,948	4,3025
Metodologia Analítica	2,8404	4,3766

Fonte: Autor.

De forma complementar, apresenta-se para o caso dos curtos-circuitos bifásicos a força radial de tração e compressão em função do tempo para todas as fases na Figura 3.23. Da mesma forma que para curtos trifásicos, esses resultados são consonantes com a metodologia analítica que fora implementada no ATP para obtenção dessas forças em função do tempo.

Do fato que para curtos bifásicos as correntes das fases em curto possuem magnitudes próximas, nota-se pela Figura 3.23 que os valores de forças radiais de tração e compressão observadas na fase C são tão expressivas quanto as na fase B – os enrolamentos das fases B e C são penalizados da mesma forma. Por outro lado, na fase A onde a corrente é a de carga, as forças são desprezíveis.

Figura 3.23 - Forças radiais de tração e compressão em função do tempo advindas de curtos bifásicos no enrolamento: (a) externo da fase A; (b) externo da fase B; (c) externo da fase C; (d) interno da fase A; (e) interno da fase B; (f) interno da fase C.



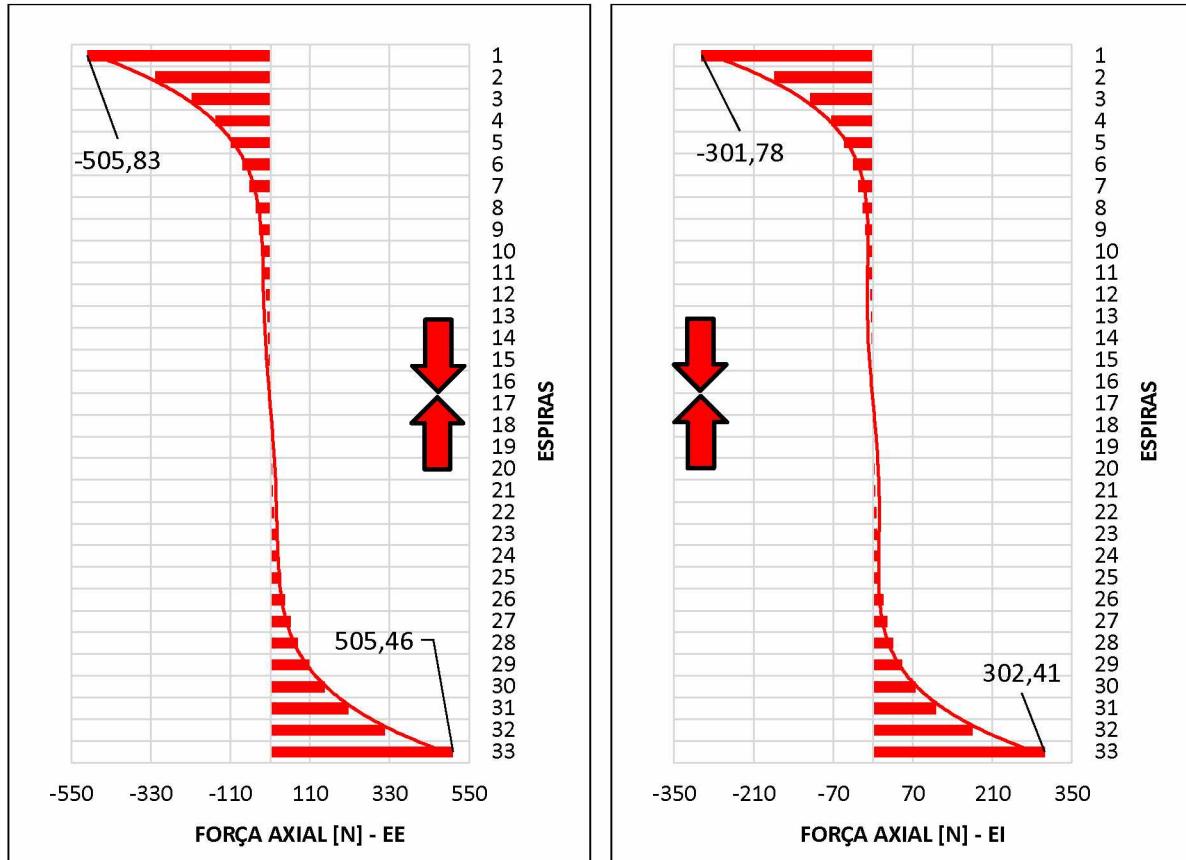
Fonte: Autor.

3.3.3.2 Forças Axiais para Curtos-Circuitos Bifásicos

Sob a perspectiva de forças axiais, a Figura 3.24 apresenta a força axial distribuída por espira do enrolamento externo e interno. Novamente, constata-se o efeito de compressão em

ambos. Da mesma forma que para o caso anterior, é observada uma simetria no gráfico e devido a isso, a soma dessas forças axiais também tende a zero. Todavia, a presença de forças elevadas nas extremidades ainda é observada.

Figura 3.24 - Força axial distribuída total em ambos enrolamentos, para condições de curto-círcuito bifásico.



Fonte: Autor.

No que se refere, de forma mais específica, às forças axiais existentes nas extremidades dos enrolamentos, apresenta-se na Tabela 3.13 um comparativo dos valores expostos neste capítulo com aqueles encontrados anteriormente pela metodologia analítica.

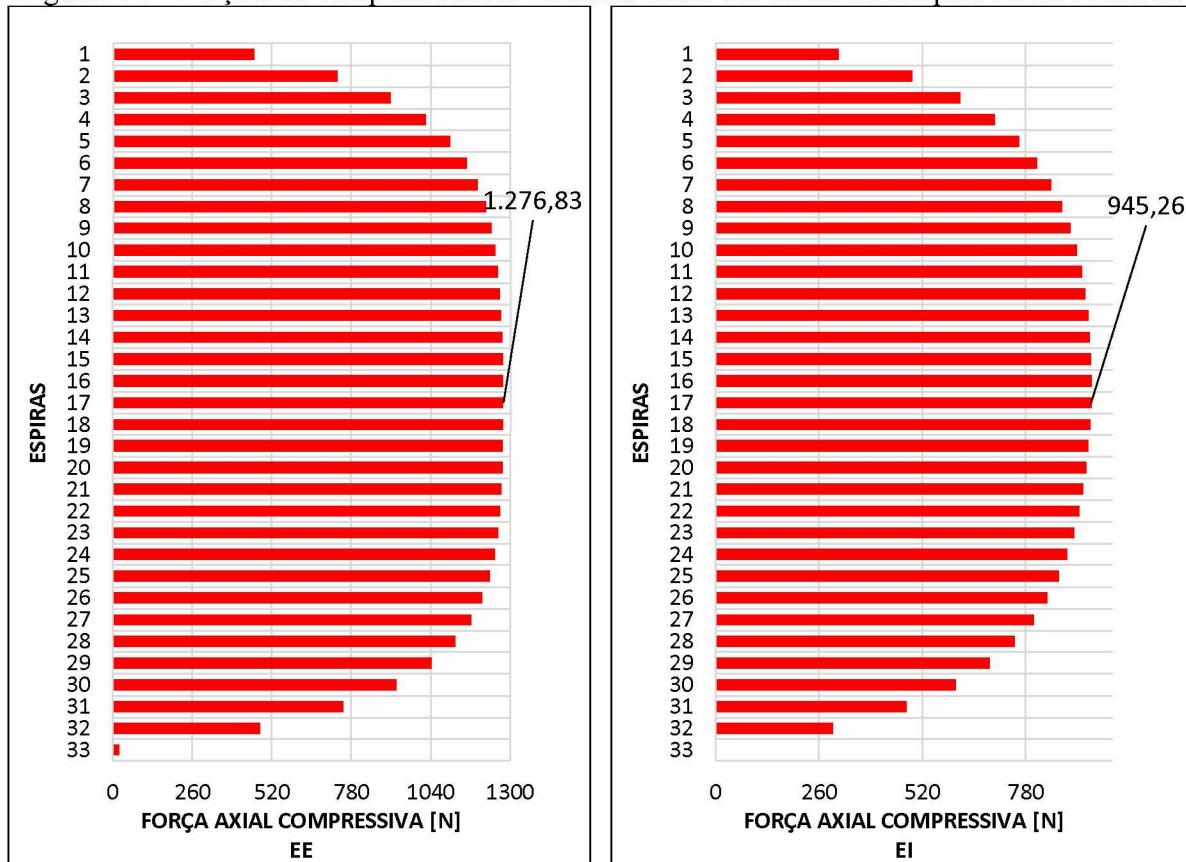
Tabela 3.13 - Força axial nas extremidades dos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcuito bifásico.

Tipo de Análise	$F_a [N] - EI$	$F_a [N] - EE$
FEMM	$0,302 \times 10^3$	$0,506 \times 10^3$
Metodologia Analítica	$0,450 \times 10^3$	$0,473 \times 10^3$

Fonte: Autor.

Do mesmo modo que para curtos-circuitos trifásicos, apesar do fato do somatório das forças axiais ao longo do enrolamento tenderem a zero – na 33^a espira do enrolamento – percebe-se por esse somatório, novamente, uma força axial compressiva elevada na altura média dos enrolamentos, com auxílio da Figura 3.25.

Figura 3.25 - Força axial compressiva total na altura média dos enrolamentos para curtos bifásicos.



Fonte: Autor.

Os valores das forças compressiva total e em ambos enrolamentos estão apresentados na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Força axial compressiva total nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcuito bifásico.

Tipo de Análise	F_c [N] - EI	F_c [N] - EE	F_{cT} [N]
FEMM	$1,891 \times 10^3$	$2,553 \times 10^3$	$4,444 \times 10^3$
Metodologia Analítica	$1,529 \times 10^3$	$3,058 \times 10^3$	$4,59 \times 10^3$

Fonte: Autor.

Nota-se para as forças axiais as mesmas discrepâncias observadas no caso de curtos-circuitos trifásicos. As justificativas feitas anteriormente são perfeitamente cabíveis, também, para essa situação.

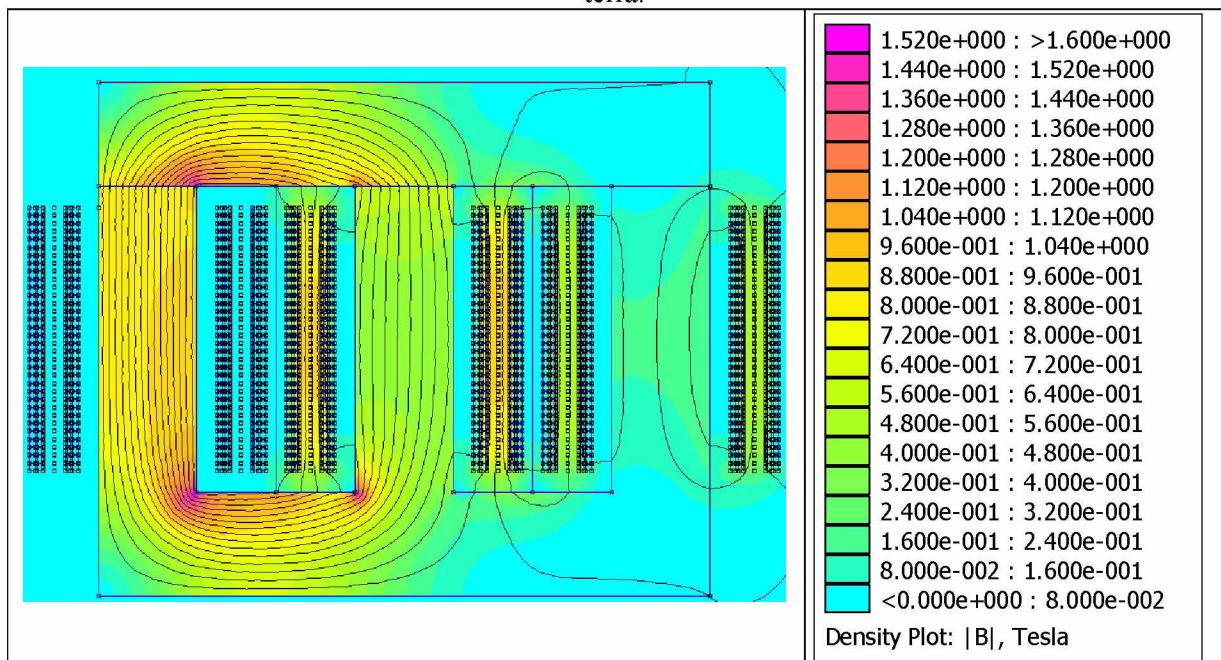
Em se tratando da força compressiva total, constata-se coerência também para situações além dos curtos-circuitos trifásicos. Isto é, a adaptação proposta por essa pesquisa para estimativa dessa força, indicada no Capítulo II pela Equação 2.22, é atestada por sua grande proximidade com valores obtidos por meio do método dos elementos finitos. No entanto, a proporcionalidade proposta por Waters (1966), também nesse caso, não é observada.

3.3.4 Transformador Trifásico de 15 kVA sob Curto-Círcuito Bifásico Envolvendo o Terra

No que tange aos curtos-circuitos fase-fase-terra, as máximas correntes elétricas de pico observadas foram 1.823,7 [A] no primário e 1.823,1 [A] no secundário, para a fase B. As correntes em função do tempo bem como as instantâneas para todos os enrolamentos e fases foram apresentadas no Capítulo II.

Por meio da inserção das correntes elétricas instantâneas no FEMM, apresenta-se na Figura 3.26 a distribuição de fluxo magnético no transformador frente à um curto-círcito do tipo bifásico envolvendo o terra.

Figura 3.26 - Distribuição de fluxo magnético para a condição de curto-círcuito bifásico envolvendo o terra.

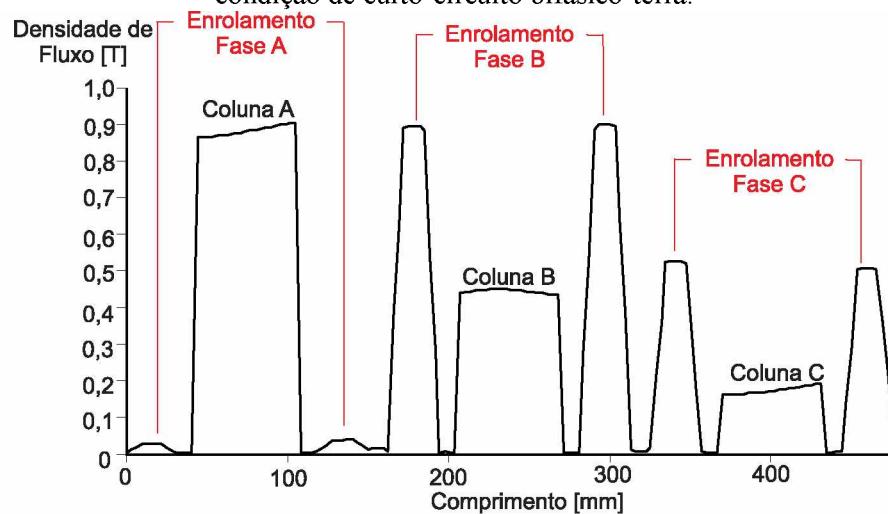


Fonte: Autor.

Conforme esperado, devido às elevadas correntes elétricas percorrendo os enrolamentos do transformador, foi observada novamente uma grande concentração de fluxo magnético entre os enrolamentos. Para esse caso, encontra-se uma magnitude média de 0,8908 [T] de fluxo de dispersão entre os enrolamentos da fase B e 0,5146 [T] entre os enrolamentos da fase C.

A Figura 3.27 oferece maiores detalhamentos acerca da distribuição de fluxo magnético no interior do transformador.

Figura 3.27 - Densidade de fluxo nas colunas e nas regiões entre enrolamentos de cada fase para a condição de curto-círcuito bifásico-terra.



Fonte: Autor.

Novamente, partindo da interação entre fluxos magnéticos de dispersão e correntes transitórias com magnitudes consideravelmente elevadas, analisa-se na sequência consequentes as forças radiais e axiais.

3.3.4.1 Forças Radiais para Curtos-Circuitos Bifásicos Envolvendo o Terra

A Figura 3.28 apresenta a força radial distribuída por espira ao longo do enrolamento externo, ao lado direito e esquerdo do núcleo para essa nova condição operativa. Sob esse mesmo enfoque, a Figura 3.29 apresenta a força distribuída por espira ao longo do enrolamento interno.

Figura 3.28 - Força radial de tração distribuída no EE para curtos bifásicos-terra.

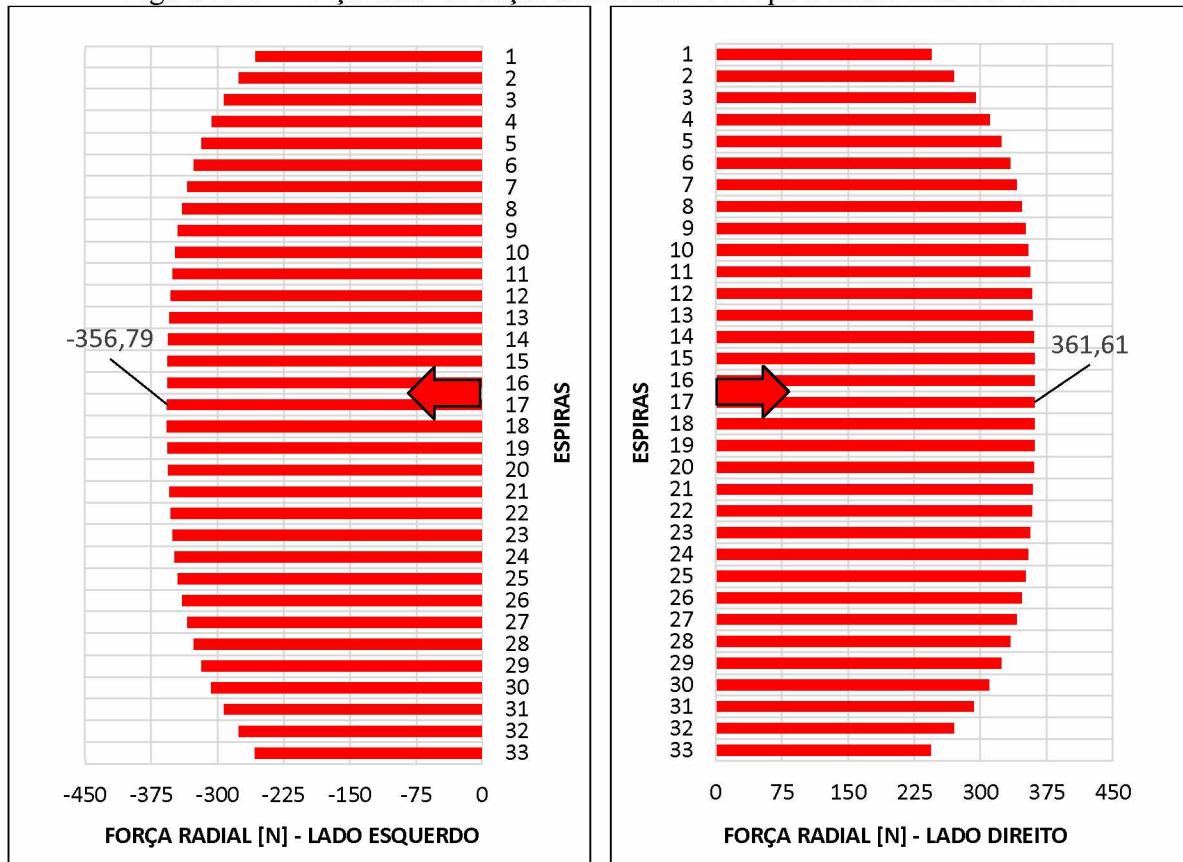
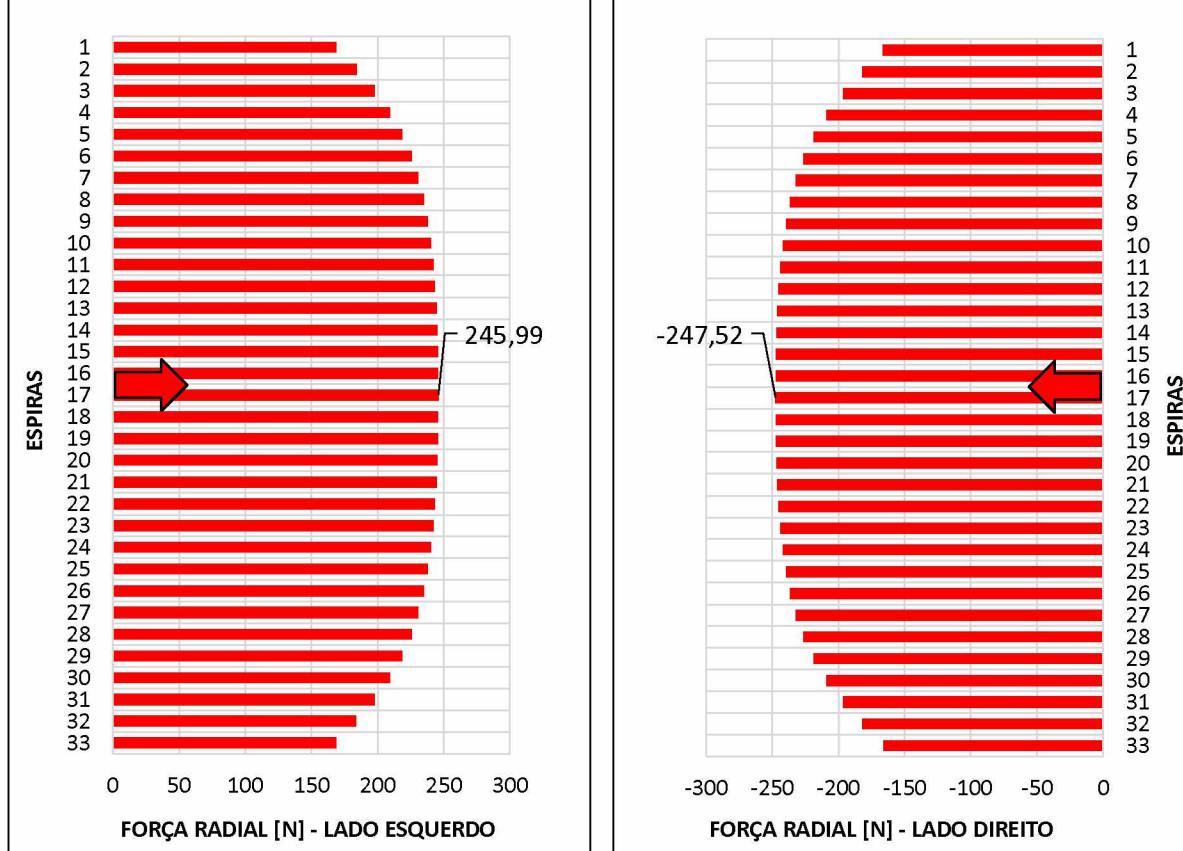


Figura 3.29 - Força radial de tração distribuída no EI para curtos bifásicos-terra.



Fonte: Autor.

As Figuras 3.28 e 3.29 apresentam os mesmos comportamentos já observados nos casos anteriores. A Tabela 3.15 apresenta os valores de força radial distribuída comparados com os valores estimados pela metodologia analítica.

Tabela 3.15 - Forças radiais distribuídas nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcuito bifásico envolvendo o terra.

Tipo de Análise	$F_{\text{rad-dist}} [\text{N/mm}] - \text{EI}$	$F_{\text{rad-dist}} [\text{N/mm}] - \text{EE}$
FEMM	0,8131	0,8080
Metodologia Analítica	0,8202	0,8208

Fonte: Autor.

Outra vez, observa-se uma diferença pequena entre os resultados obtidos pelas duas metodologias. Sob outra perspectiva, a força radial total para cada enrolamento está apresentada na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 - Forças radiais totais nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcuito bifásico envolvendo o terra.

Tipo de Análise	$F_r [\text{N}] - \text{EI}$	$F_r [\text{N}] - \text{EE}$
FEMM	$14,976 \times 10^3$	$21,904 \times 10^3$
Metodologia Analítica	$16,410 \times 10^3$	$24,079 \times 10^3$

Fonte: Autor.

Por fim, ainda relacionado às forças radiais, apresenta-se na Tabela 3.17 o estresse radial médio para cada enrolamento sob a condição de curto-círcuito bifásico envolvendo o terra.

Tabela 3.17 - Estresses radiais médios nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcuito bifásico envolvendo o terra.

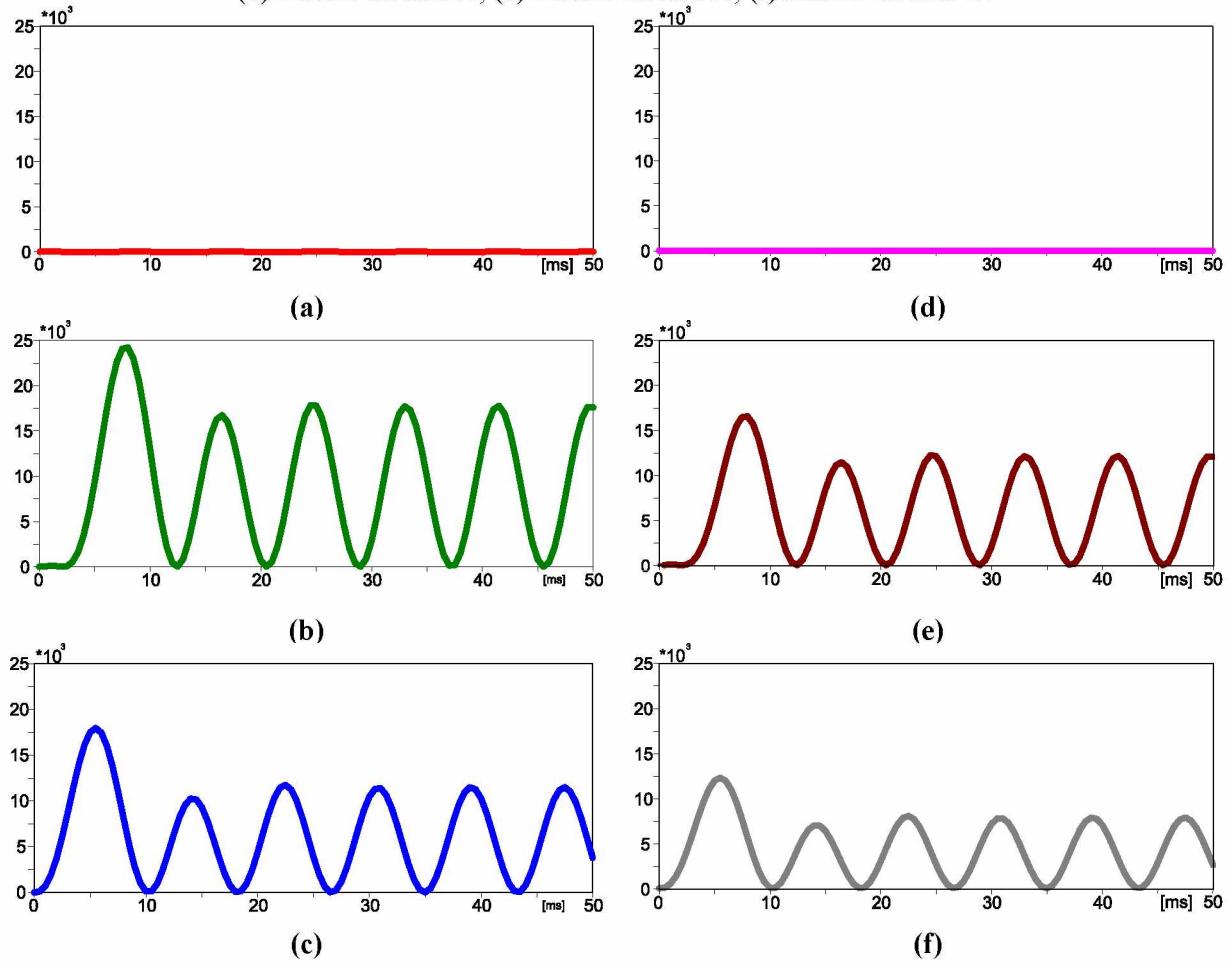
Tipo de Análise	$\sigma_{r-\text{médio}} [\text{N/mm}^2] - \text{EI}$	$\sigma_{r-\text{médio}} [\text{N/mm}^2] - \text{EE}$
FEMM	2,4935	3,6297
Metodologia Analítica	2,5126	3,6867

Fonte: Autor.

Como nos casos anteriores, apresenta-se na sequência a Figura 3.30 que retrata as forças radiais de tração e compressão em função do tempo para todas as fases.

De forma semelhante aos curtos-circuitos bifásicos, os enrolamentos da fase A estão sujeitos à corrente de carga que culmina em forças radiais de tração e compressão desprezíveis nos mesmos.

Figura 3.30 - Forças radiais de tração e compressão em função do tempo advindas de curtos bifásicos envolvendo o terra no enrolamento: (a) externo da fase A; (b) externo da fase B; (c) externo da fase C; (d) interno da fase A; (e) interno da fase B; (f) interno da fase C.

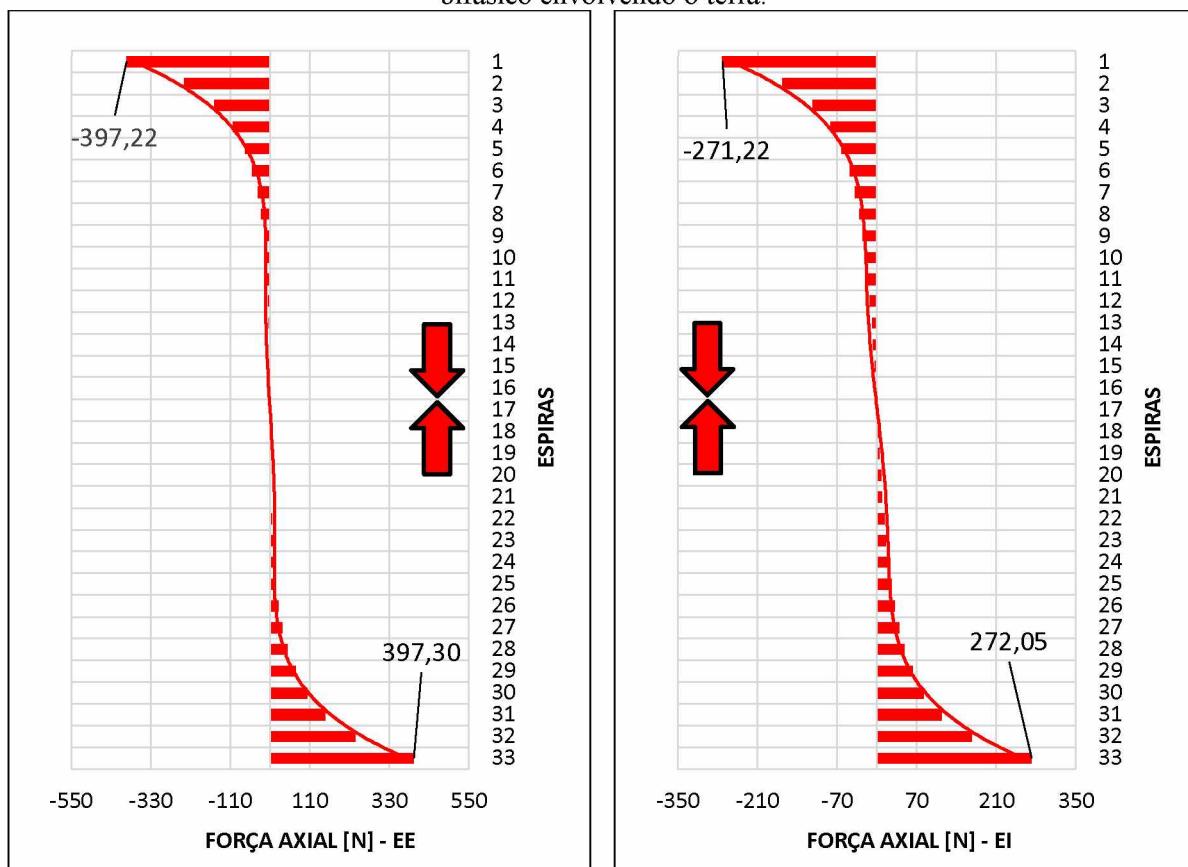


Fonte: Autor.

3.3.4.2 Forças Axiais para Curtos-Circuitos Bifásicos Envolvendo o Terra

No que se refere às forças axiais, no caso dos curtos-circuitos bifásicos que envolvem o terra, apresenta-se na Figura 3.31, em primeiro momento, a força axial distribuída por espira do enrolamento externo e interno. Percebe-se pela figura que, novamente, o efeito das forças é compressivo em ambos os enrolamentos.

Figura 3.31 - Força axial distribuída total em ambos enrolamentos, para condições de curto-círcuito bifásico envolvendo o terra.



Fonte: Autor.

Não obstante ao fato da soma das forças axiais distribuídas tenderem a zero devido à simetria apresentada no gráfico apresentado anteriormente, nota-se claramente que nas extremidades dos enrolamentos existe uma força axial um pouco mais elevada que nas demais regiões do enrolamento. Para fins comparativos com os outros eventos, apresenta-se na Tabela 3.18 a força axial na extremidade dos enrolamentos externo e interno, bem como o comparativo com esses mesmos valores estimados pela metodologia analítica.

Tabela 3.18 - Força axial nas extremidades dos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcuito bifásico envolvendo o terra.

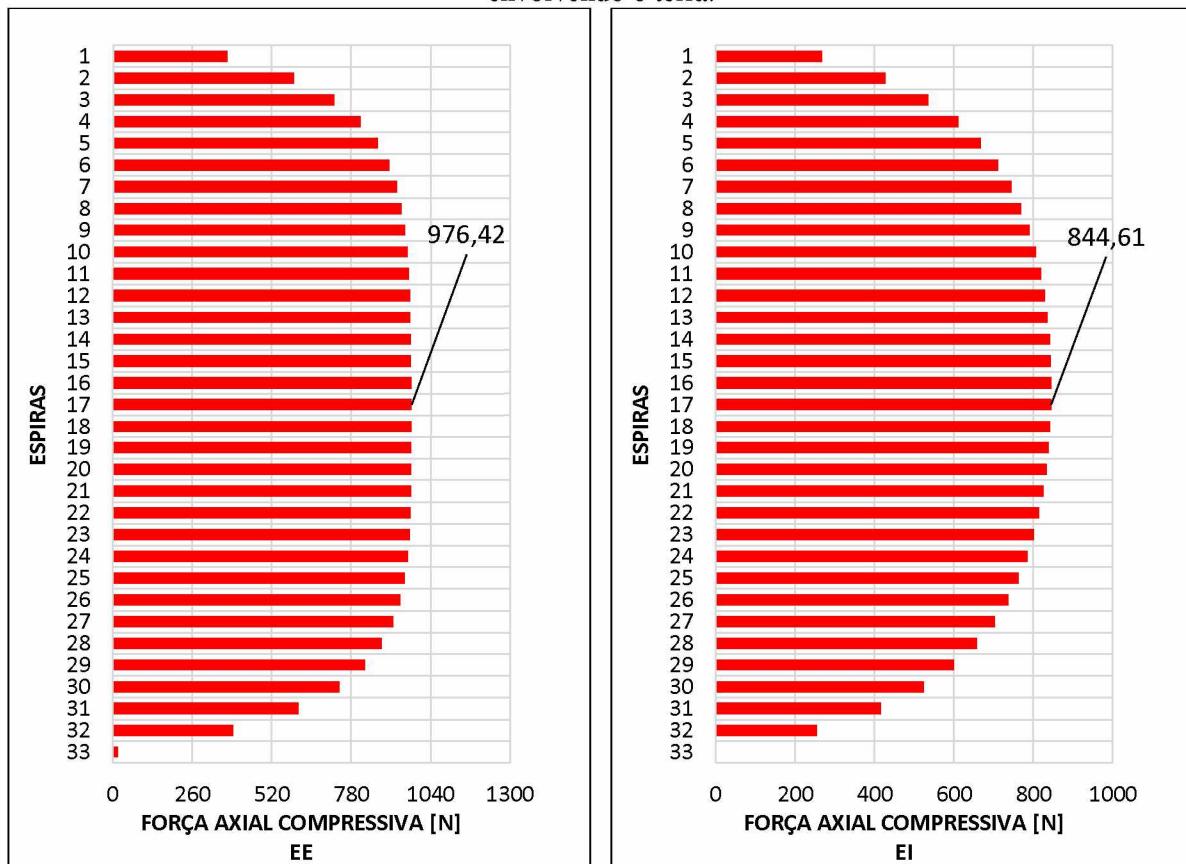
Tipo de Análise	$F_a [N] - EI$	$F_a [N] - EE$
FEMM	$0,272 \times 10^3$	$0,397 \times 10^3$
Metodologia Analítica	$0,3981 \times 10^3$	$0,3984 \times 10^3$

Fonte: Autor.

Além disso, na realização da soma das forças axiais distribuídas ao longo do enrolamento, percebe-se também a existência de uma elevada força axial compressiva na altura média dos enrolamentos, conforme vislumbra a Figura 3.32.

A Tabela 3.19, por sua vez, apresenta os valores das forças axiais compressivas totais em ambos enrolamentos e da força compressiva total, quando em situação de curto-círcuito bifásico envolvendo o terra.

Figura 3.32 - Força axial compressiva total na altura média dos enrolamentos para curtos bifásicos envolvendo o terra.



Fonte: Autor.

Tabela 3.19 - Força axial compressiva total nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcuito bifásico envolvendo o terra.

Tipo de Análise	F_c [N] - EI	F_c [N] - EE	F_{cT} [N]
FEMM	$1,689 \times 10^3$	$1,953 \times 10^3$	$3,642 \times 10^3$
Metodologia Analítica	$1,288 \times 10^3$	$2,576 \times 10^3$	$3,864 \times 10^3$

Fonte: Autor.

Nota-se para as forças axiais as mesmas discrepâncias observadas no caso de curtos-circuitos trifásicos e bifásicos. As justificativas feitas anteriormente são também cabíveis para

essa situação. Para a força axial compressiva total observa-se, novamente, uma boa aproximação entre os resultados o que novamente atesta que a proposta aqui realizada para cálculos analíticos dessa força é adequada.

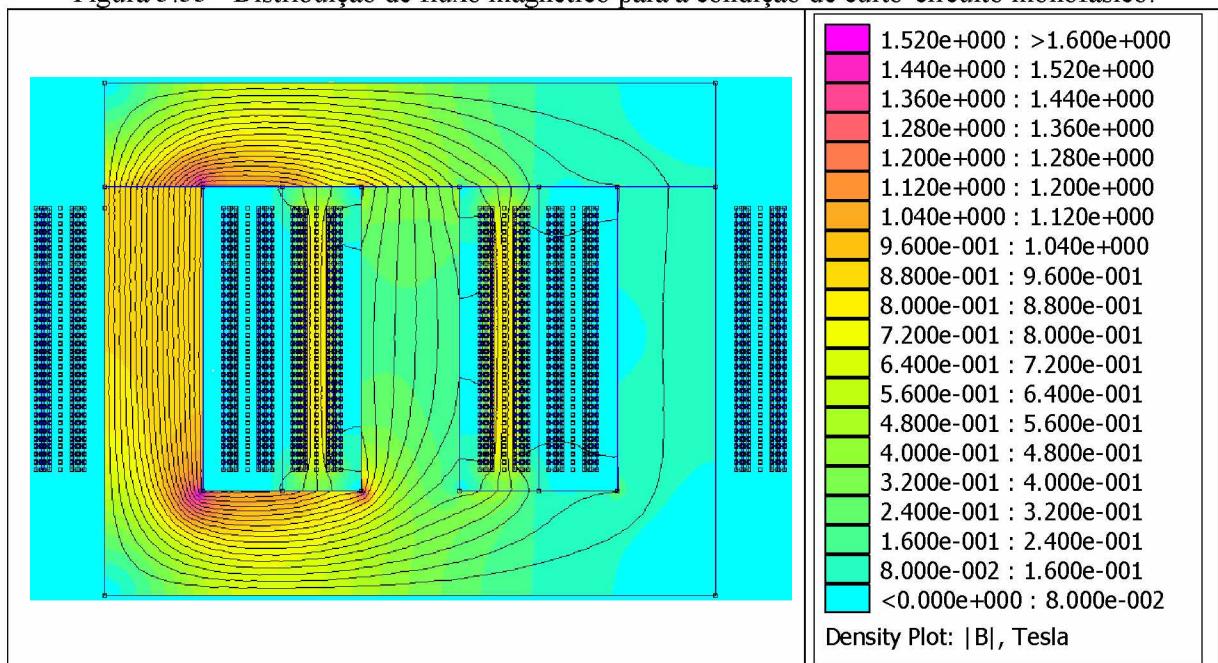
3.3.5 Transformador Trifásico de 15 kVA sob Curto-Círcuito Monofásico

Para curtos-circuitos monofásicos, as máximas correntes elétricas de pico foram 1.777,3 [A] no primário e 1.776,8 [A] no secundário nos enrolamentos da fase B do transformador. Os detalhes acerca dessa corrente foram apresentados no Capítulo II.

Novamente, por meio da inserção das correntes elétricas no instante de tempo em que ocorre as correntes supra postas, no modelo do FEMM, a distribuição de fluxo magnético no transformador é obtida, agora, para o transformador frente à curtos-circuitos monofásicos. Apresenta-se essa característica na Figura 3.33.

Na figura em questão, é observada uma grande concentração de fluxo entre os enrolamentos da fase em curto. Quando comparado com as condições nominais, observa-se também para esse caso uma redução significativa do fluxo magnético nas colunas do transformador.

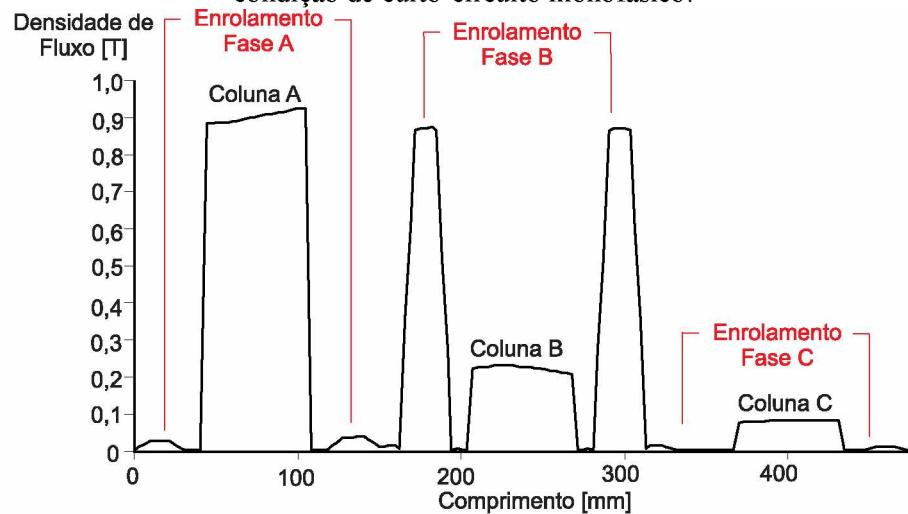
Figura 3.33 - Distribuição de fluxo magnético para a condição de curto-círcito monofásico.



Fonte: Autor.

Para o presente caso, encontra-se uma magnitude média de 0,8699 [T] de fluxo de dispersão entre os enrolamentos da fase B. De forma mais minudenciada, a Figura 3.34 mostra a distribuição de fluxo magnético ao longo do transformador.

Figura 3.34 - Densidade de fluxo nas colunas e nas regiões entre enrolamentos de cada fase para a condição de curto-círcuito monofásico.



Fonte: Autor.

Na sequência, apresentam-se os resultados obtidos para esse evento no que se refere às forças radiais e axiais.

3.3.5.1 Forças Radiais para Curtos-Circuitos Monofásicos

Apresenta-se na Figura 3.35 a força radial de tração distribuída ao longo do enrolamento externo, enquanto que a Figura 3.36 apresenta a força radial de compressão distribuída no enrolamento interno.

Figura 3.35 - Força radial de tração distribuída no EE para curtos monofásicos.

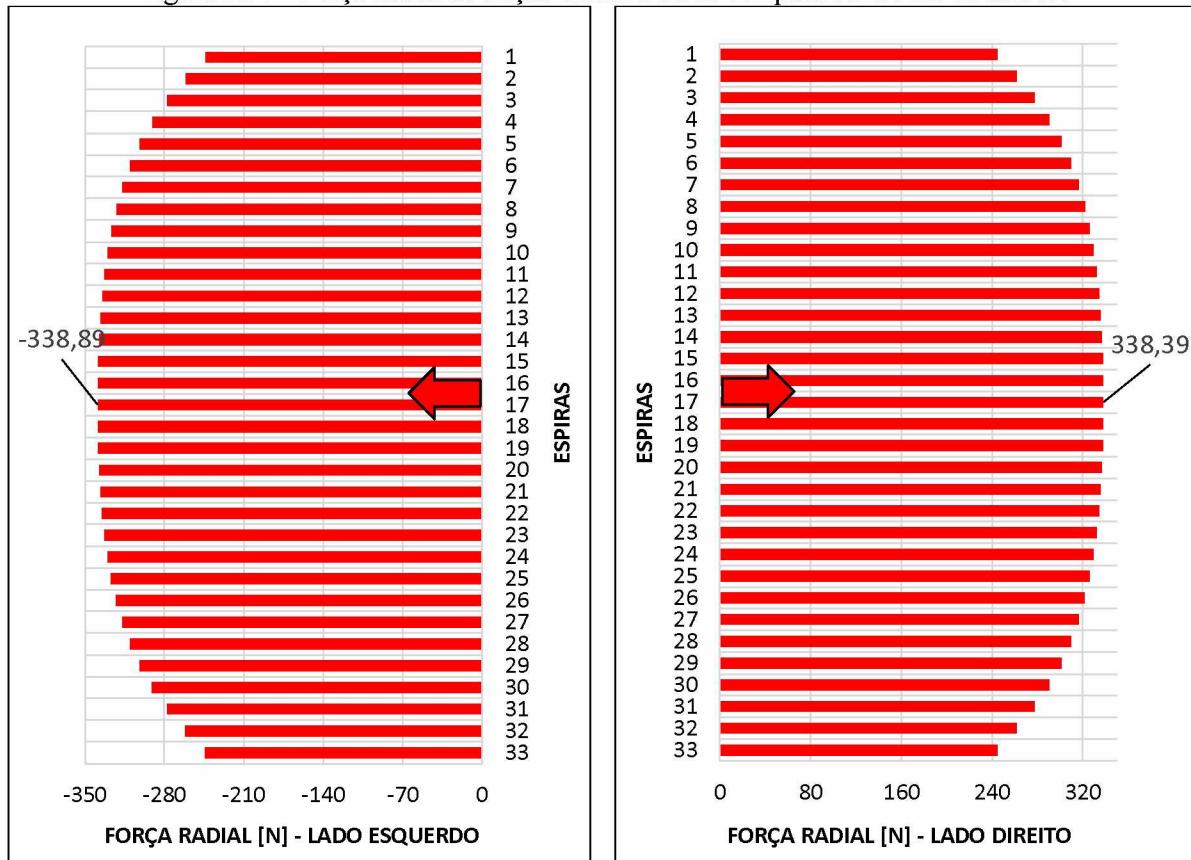
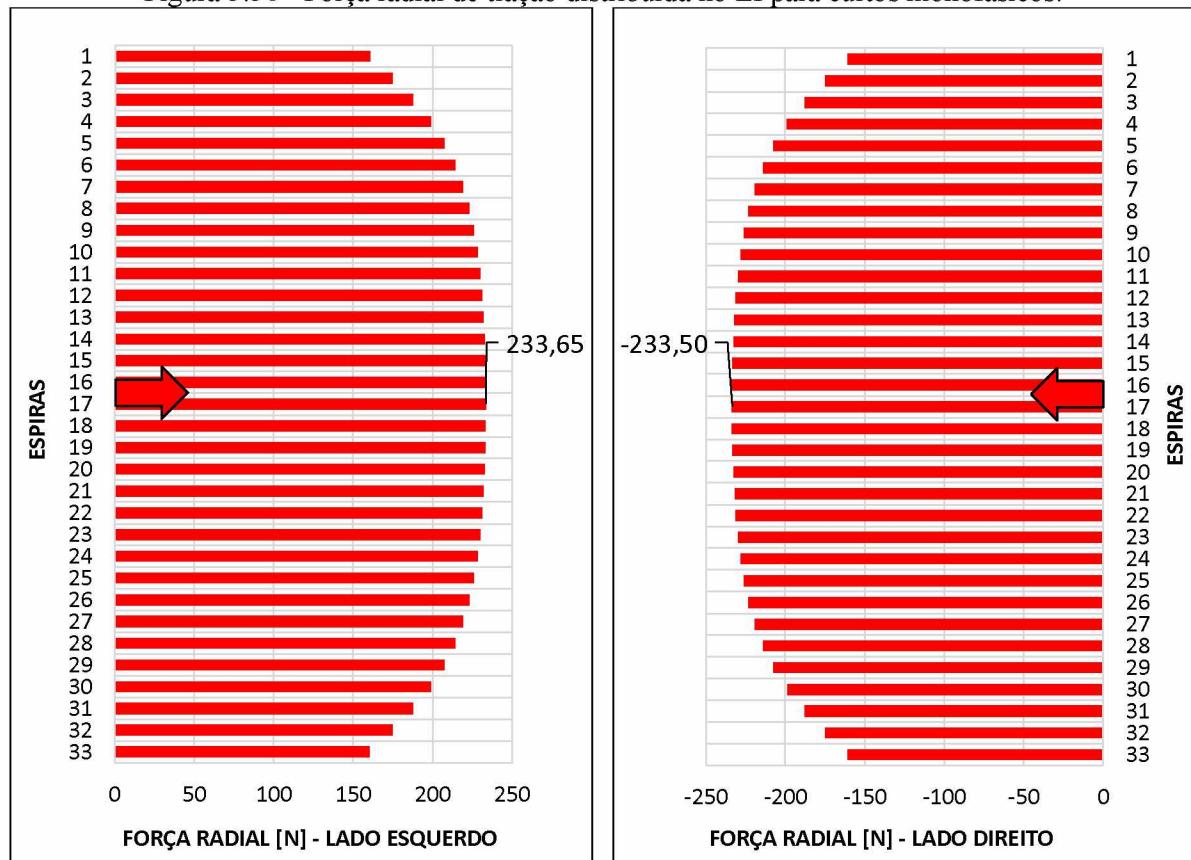


Figura 3.36 - Força radial de tração distribuída no EI para curtos monofásicos.



Fonte: Autor.

Constata-se mais uma vez o comportamento semelhante aos resultados de eventos já apresentados anteriormente, excetuando-se as magnitudes das forças. A Tabela 3.20 apresenta os valores de força radial distribuída comparados com os valores estimados pela metodologia analítica.

Tabela 3.20 - Forças radiais distribuídas nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcuito monofásico.

Tipo de Análise	$F_{\text{rad-dist}} [\text{N/mm}] - \text{EI}$	$F_{\text{rad-dist}} [\text{N/mm}] - \text{EE}$
FEMM	0,7705	0,7618
Metodologia Analítica	0,7844	0,7839

Fonte: Autor.

A Tabela 3.21 apresenta os valores de força radial total para cada enrolamento.

Tabela 3.21 - Forças radiais totais nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcuito monofásico.

Tipo de Análise	$F_r [\text{N}] - \text{EI}$	$F_r [\text{N}] - \text{EE}$
FEMM	$14,201 \times 10^3$	$20,671 \times 10^3$
Metodologia Analítica	$15,695 \times 10^3$	$23,000 \times 10^3$

Fonte: Autor.

Por fim, a Tabela 3.17 apresenta o estresse radial médio para cada enrolamento sob a condição de curto-círcuito monofásico.

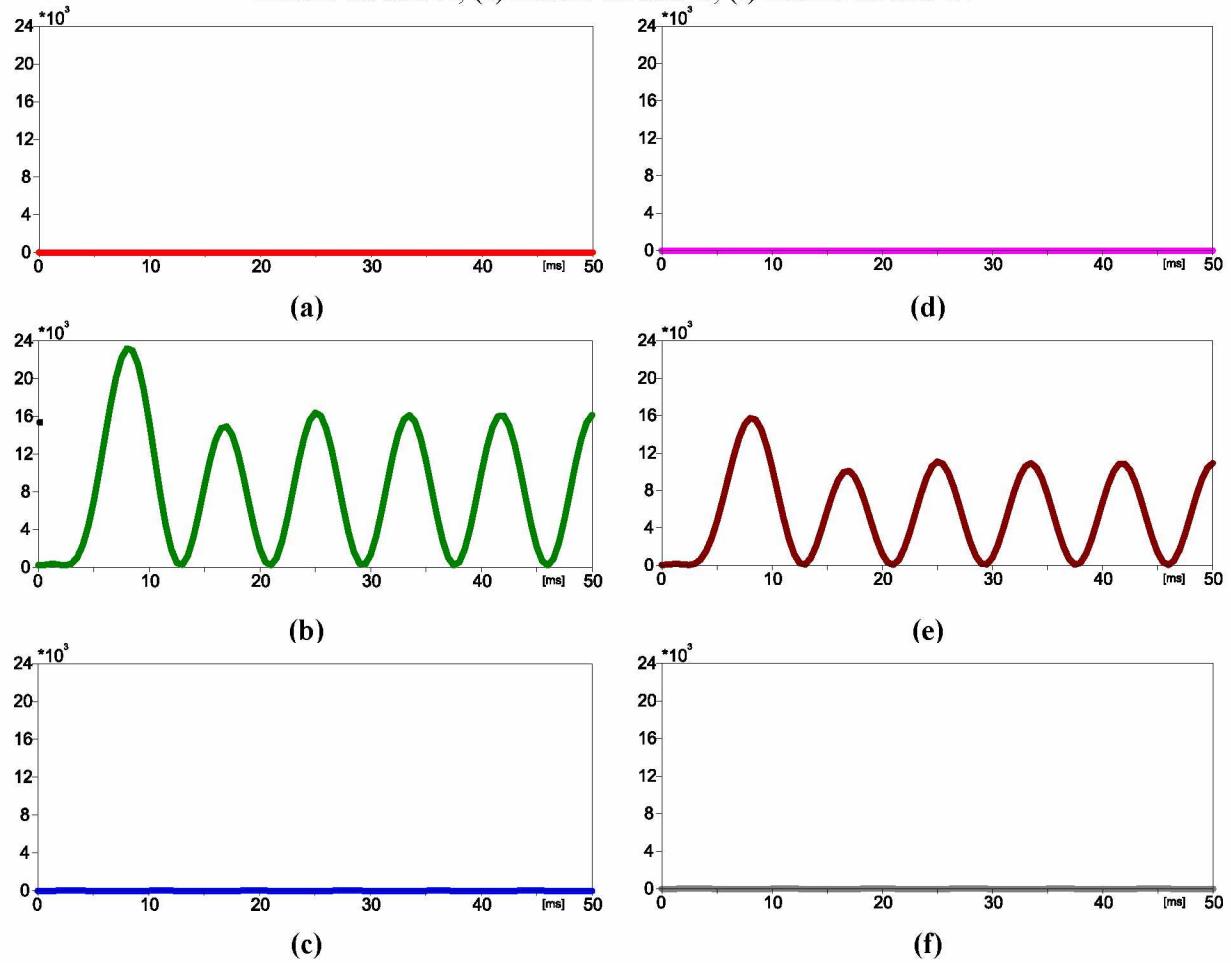
Tabela 3.22 - Estresses radiais médios nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcuito monofásico.

Tipo de Análise	$\sigma_{r-\text{médio}} [\text{N/mm}^2] - \text{EI}$	$\sigma_{r-\text{médio}} [\text{N/mm}^2] - \text{EE}$
FEMM	2,3603	3,4220
Metodologia Analítica	2,402	3,521

Fonte: Autor.

A Figura 3.37 apresenta as forças radiais de tração e compressão em função do tempo oriundas das correntes de curto-círcuito monofásico. Para a referida ocorrência, nota-se que apenas os enrolamentos da fase B serão solicitados mecanicamente por elevadas forças eletromecânicas, tendo em vista que nas fases A e C as correntes são as de carga.

Figura 3.37 - Forças radiais de tração e compressão em função do tempo advindas de curtos monofásicos no enrolamento: (a) externo da fase A; (b) externo da fase B; (c) externo da fase C; (d) interno da fase A; (e) interno da fase B; (f) interno da fase C.

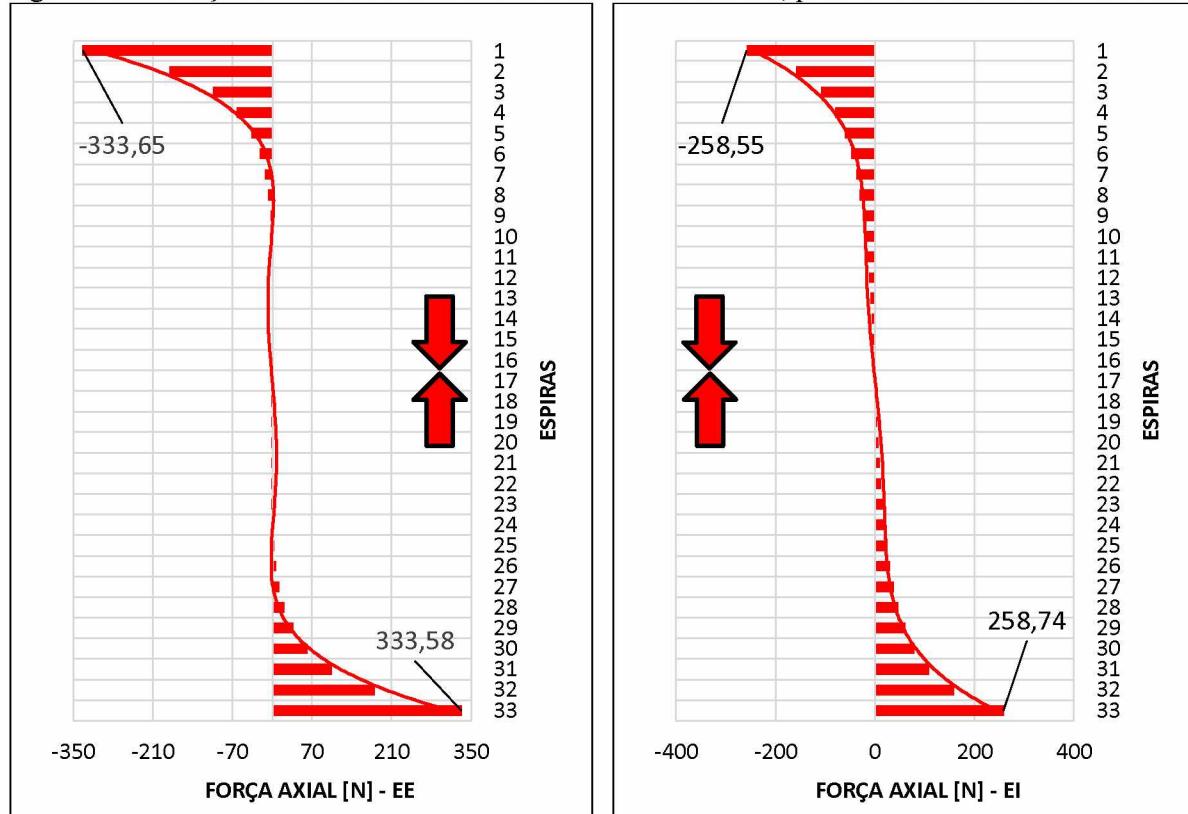


Fonte: Autor.

3.3.5.2 Forças Axiais para Curtos-Circuitos Monofásicos

Sob enfoque das forças axiais para o caso de curtos-circuitos monofásicos, a Figura 3.38 apresenta a força axial distribuída por espira do enrolamento externo e interno.

Figura 3.38 - Força axial distribuída total em ambos enrolamentos, para curtos-circuitos monofásicos.



Fonte: Autor.

Da mesma forma, é possível ainda observar a existência de forças axiais elevadas nas extremidades dos enrolamentos. Fazendo um paralelo com os valores obtidos pela metodologia analítica, a Tabela 3.23 apresenta os valores encontrados para a força axial nas extremidades de ambos enrolamentos para a condição de curtos monofásicos.

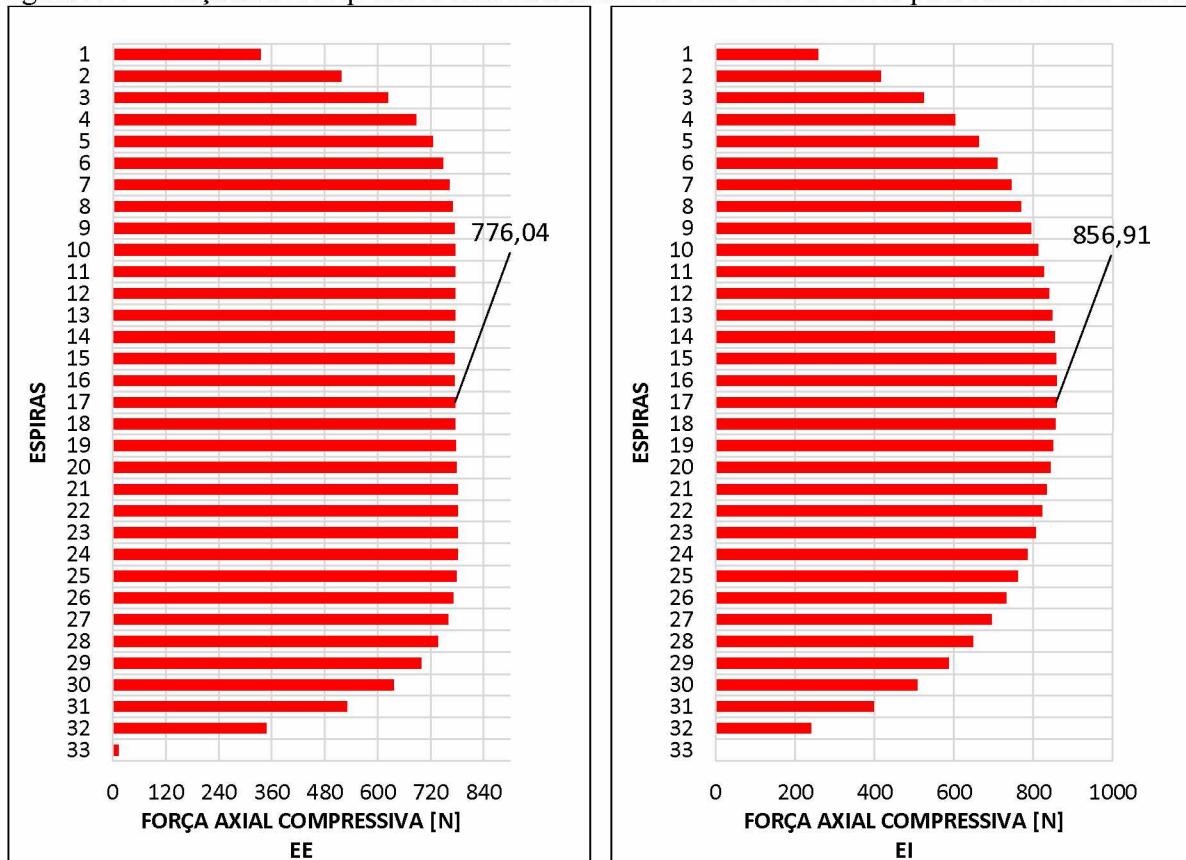
Tabela 3.23 - Força axial nas extremidades dos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcito monofásico.

Tipo de Análise	$F_a [N] - EI$	$F_a [N] - EE$
FEMM	$0,259 \times 10^3$	$0,334 \times 10^3$
Metodologia Analítica	$0,3807 \times 10^3$	$0,3805 \times 10^3$

Fonte: Autor.

Ao realizar-se a soma das forças axiais ao longo do enrolamento, observa-se novamente a tendência desse valor para zero. Todavia, como nos outros casos é observado um valor elevado para a força axial compressiva na altura média dos enrolamentos, conforme vislumbra-se na Figura 3.39.

Figura 3.39 - Força axial compressiva total na altura média dos enrolamentos para curtos monofásicos.



Fonte: Autor.

A Tabela 3.24, por sua vez, apresenta os valores das forças axiais compressivas totais em ambos enrolamentos e da força compressiva total, quando em situação de curto-círcuito monofásico, em adição aos valores estimados analiticamente pelas definições de Waters (1966).

Tabela 3.24 - Força axial compressiva total nos enrolamentos externo e interno para condições de curto-círcuito monofásico.

Tipo de Análise	F_c [N] - EI	F_c [N] - EE	F_{cT} [N]
FEMM	$1,713 \times 10^3$	$1,552 \times 10^3$	$3,266 \times 10^3$
Metodologia Analítica	$1,231 \times 10^3$	$2,462 \times 10^3$	$3,693 \times 10^3$

Fonte: Autor.

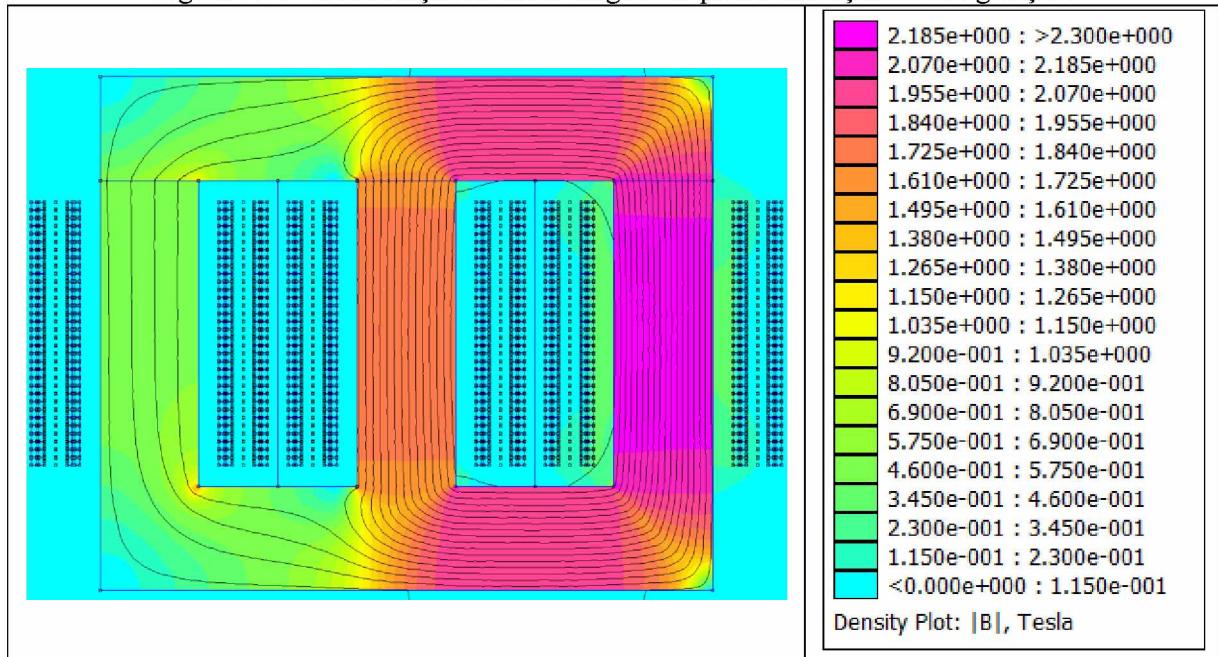
Nota-se para as forças axiais as mesmas discrepâncias observadas nos casos anteriormente apresentados. As justificativas feitas anteriormente são aplicáveis também para esse caso. Para a força axial compressiva total observa-se, ainda, uma boa aproximação entre os resultados o que novamente atesta que a proposta aqui realizada para cálculos analíticos dessa força é adequada.

3.3.6 Transformador Trifásico de 15 kVA sob Energização

As correntes nas três fases do transformador foram obtidas e suas formas de onda foram elencadas no Capítulo II. Constatou-se que no primeiro pico a magnitude da corrente da fase C equivaleu a 948 [A], salientando-se que esse valor foi obtido com o chaveamento no instante em que a tensão da fase C estava com valor próximo de zero.

Mediante a incorporação das correntes de energização no FEMM, obteve-se a distribuição de fluxo magnético do transformador, a qual é apresentada na Figura 3.40.

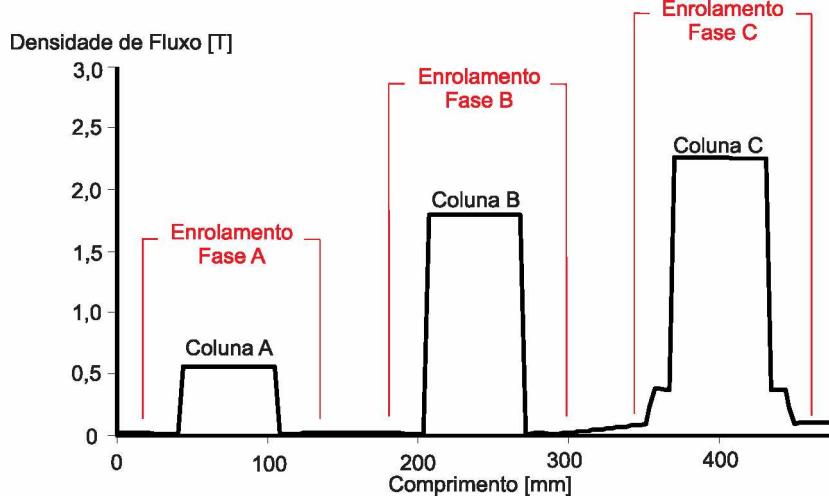
Figura 3.40 - Distribuição de fluxo magnético para a condição de energização.



Fonte: Autor.

A Figura 3.40 permite constatar que, conforme esperado, o nível de saturação do núcleo do transformador é bem maior do que os encontrados nos eventos outrora estudados. Também se percebe a existência de algumas linhas de fluxo de dispersão, todavia, com um valor bem menor de fluxo de dispersão entre os enrolamentos. Por meio da distribuição de fluxo magnético ao longo do transformador, mostrada na Figura 3.41, é possível confirmar tais constatações.

Figura 3.41 - Fluxo nas colunas e nas regiões entre enrolamentos de cada fase para a energização.



Fonte: Autor.

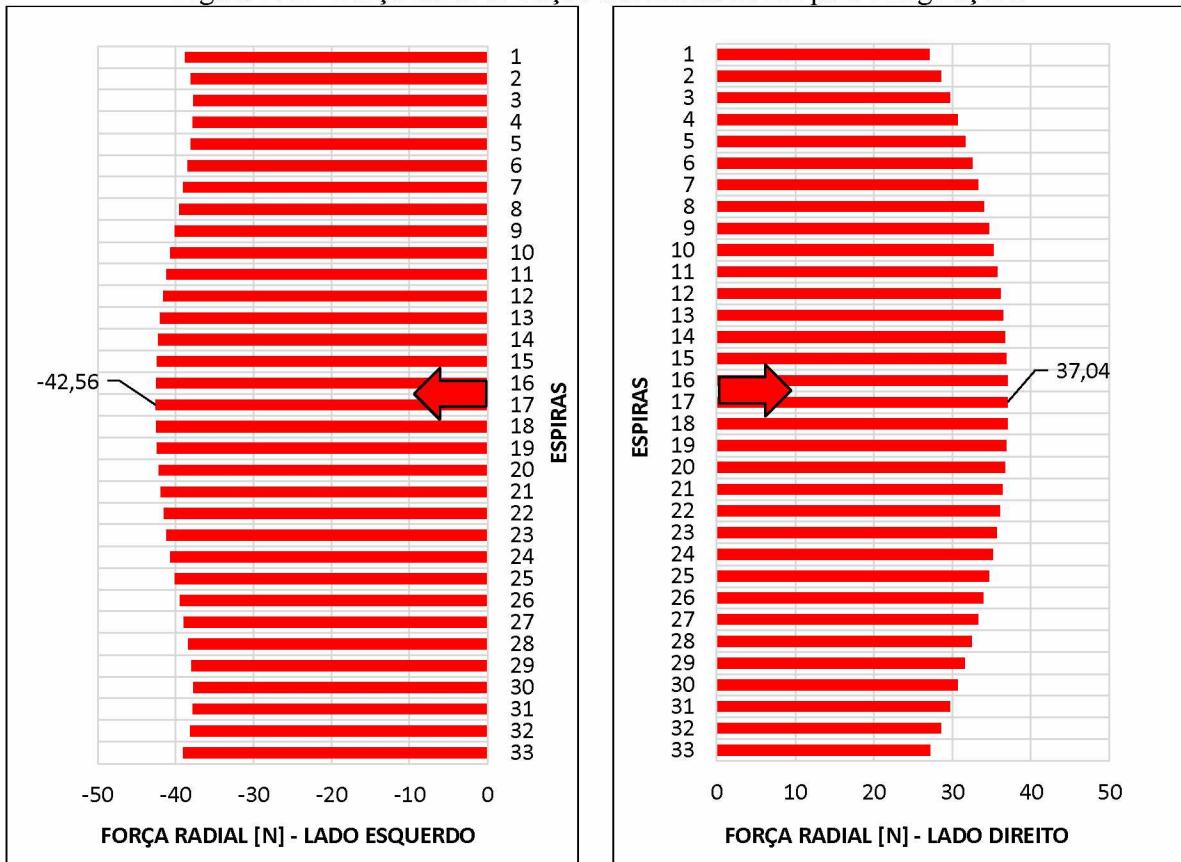
De acordo com as figuras apresentadas, o fluxo na coluna C equivale a aproximadamente 2,2647 [T], comprovando, portanto, altos níveis de saturação para as condições de energização. No tocante dos fluxos de dispersão, observa-se aproximadamente 0,3869 [T] nos enrolamentos da fase C. Deve-se ressaltar que, nesse caso em específico, o fluxo dispersão não está presente entre os enrolamentos, mas entre o enrolamento energizado (interno) e o núcleo, tendo em vista que o enrolamento externo não é percorrido por nenhuma corrente.

No que segue, são apresentados os resultados alcançados por meio das simulações computacionais referentes às forças radiais e axiais e seus consequentes esforços.

3.3.6.1 Forças Radiais para Energizações

A Figura 3.42 mostra a força radial distribuída por espira ao longo do enrolamento interno, ao lado direito e esquerdo do núcleo para a condição de energização. Deve-se salientar que para essa condição, inexistem forças no enrolamento externo, posto que inexistem correntes passantes pelos enrolamentos – transformador energizado a vazio.

Figura 3.42 - Força radial de tração distribuída no EE para energizações.



Fonte: Autor.

É naturalmente observado que essa condição operacional não implica em grandes forças radiais nos enrolamentos do transformador, porém, deve-se destacar que em alguns transformadores o número de energizações por dia é elevado, fazendo com que as energizações contribuam significativamente ao dano cumulativo dos enrolamentos, não tanto por sua severidade, mas pela grande quantidade de ocorrência.

A Tabela 3.25 apresenta os valores de força radial distribuída comparados com os estimados no Capítulo II.

Tabela 3.25 - Forças radiais distribuídas no enrolamento interno para condições energização.

Tipo de Análise	$F_{rad-dist}$ [N/mm] - EI
FEMM	0,1313
Metodologia Analítica	0,2223

Fonte: Autor.

A Tabela 3.26 apresenta os valores de força radial total para cada enrolamento. Apresenta-se também os valores encontrados na metodologia analítica.

Tabela 3.26 - Forças radiais totais nos enrolamentos externo e interno para condições de energização.

Tipo de Análise	F_r [N] - EI
FEMM	$2,644 \times 10^3$
Metodologia Analítica	$4,465 \times 10^3$

Fonte: Autor.

Por fim, a Tabela 3.27 apresenta o estresse radial médio para cada enrolamento sob a condição de energização.

Tabela 3.27 - Estresses radiais médios nos enrolamentos externo e interno para condições de energização.

Tipo de Análise	$\sigma_{r-\text{médio}}$ [N/mm ²] - EI
FEMM	0,4022
Metodologia Analítica	0,6837

Fonte: Autor.

Nota-se no caso das energizações que, para as forças radiais, as duas metodologias apontam para resultados um pouco mais distantes do que os até então obtidos. Primeiramente, deve-se salientar que a metodologia analítica foi elaborada, principalmente por Waters (1966), para curtos-circuitos trifásicos. Nesse sentido, devido à complexidade no comportamento magnético nesta situação, isto é, à saturação magnética associada às energizações, as estimativas analíticas podem não apresentar resultados tão exatos.

Deve-se salientar ainda que a supra posta saturação magnética, logicamente, não é vislumbrada em nenhum dos casos anteriormente investigados. Dessa forma, a limitação da metodologia analítica nesses casos tornou-se maior. Por conseguinte, devido ao fato de a modelagem, baseada em elementos finitos, considerar características geométrica e magnética do transformador de forma mais fidedigna, os resultados obtidos tornam-se mais exatos.

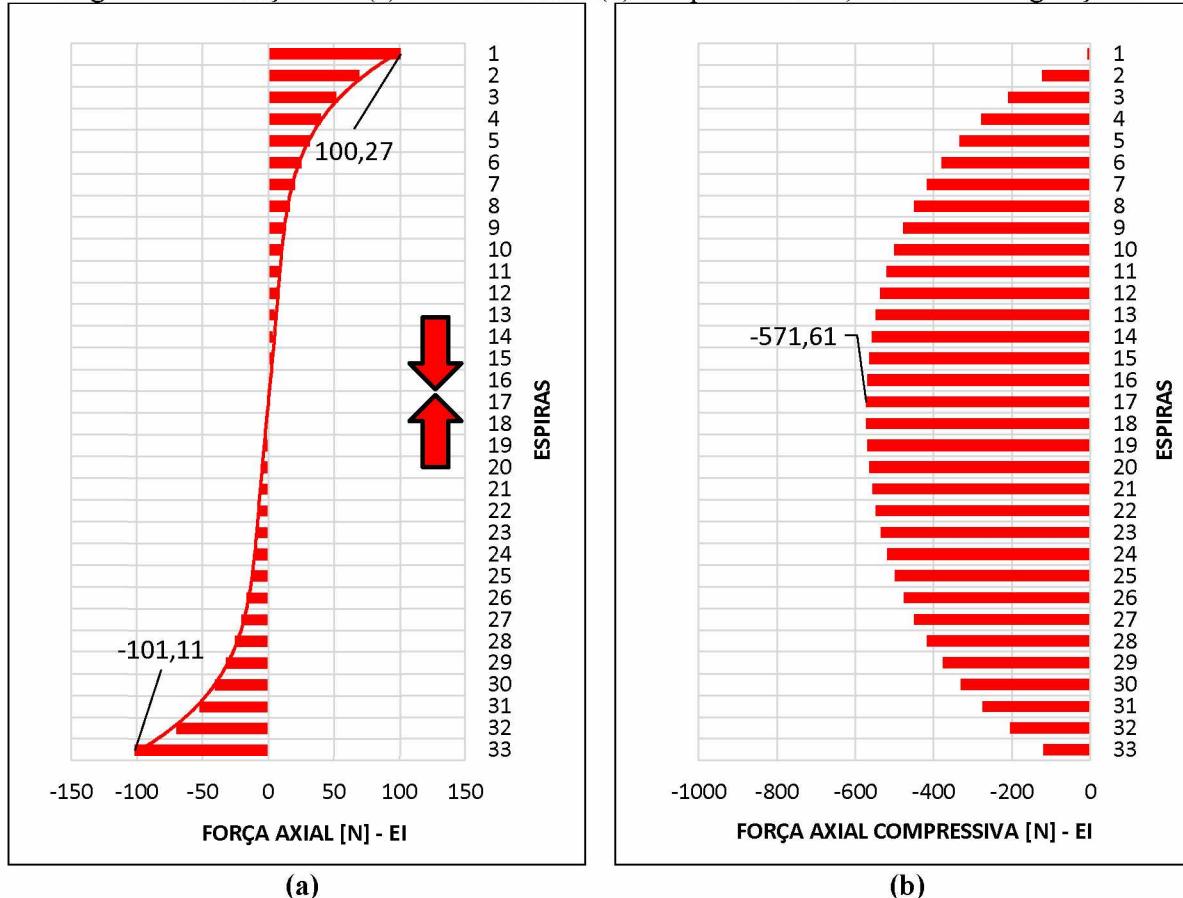
3.3.6.2 Forças Axiais para Energizações

Sob a perspectiva das forças axiais oriundas das correntes de energização, em primeiro momento a Figura 3.43a apresenta a força axial distribuída por espira do enrolamento interno onde constata-se, da mesma forma que para os demais eventos analisados, uma simetria no gráfico fazendo com que a soma das forças axiais tenda a zero, conforme Figura 3.43b. Em

contrapartida, observa-se, ainda, a existência de uma força compressiva na altura média dos enrolamentos.

Da mesma forma que para as forças radiais, inexistem forças axiais no enrolamento externo, tendo em vista que o transformador foi energizado a vazio pelo enrolamento interno.

Figura 3.43 - Força axial (a) distribuída total (b) compressiva total, no EI sob energizações.



Fonte: Autor.

No que tange às forças presentes nas extremidades dos enrolamentos, a Tabela 3.28 abrange os valores encontrados pelas simulações computacionais e aqueles obtidos pela metodologia analítica.

Tabela 3.28 - Força axial nas extremidades dos enrolamentos externo e interno para condições de energização.

Tipo de Análise	F_a [N] - EI
FEMM	$0,101 \times 10^3$
Metodologia Analítica	$0,108 \times 10^3$

Fonte: Autor.

A Tabela 3.29, por sua vez, apresenta os resultados das forças axiais compressivas totais, que nesse caso, é incidente integralmente no enrolamento interno – enrolamento energizado. Constatase para o caso das energizações que a expressão analítica proposta para obter valores da força compressiva total ainda é coerente.

Tabela 3.29 - Força axial compressiva total no enrolamento interno para condições de energização.

Tipo de Análise	F_c [N] - EI	F_{cT} [N]
FEMM	$1,143 \times 10^3$	$1,143 \times 10^3$
Metodologia Analítica	$1,051 \times 10^3$	$1,051 \times 10^3$

Fonte: Autor.

3.3.7 Comparativo dos Esforços Eletromecânicos por meio do Conceito de Distância Euclidiana

Em conformidade com os resultados apresentados nos itens anteriores, este item visa expor uma análise comparativa entre os eventos ora analisados com vista ao conceito de distância de Euclides.

Da mesma forma que fora feito no Capítulo II, normalizam-se os valores das forças radiais para a construção das matrizes de distâncias Euclidianas. Novamente, é determinado o estresse radial máximo ($\sigma_{rmáx}$) apurado entre os eventos. Partindo disso, através da Equação 2.27 são encontrados os valores normalizados das distâncias Euclidianas percentuais entre estresses radiais $\sigma_{r\alpha}$ e $\sigma_{r\beta}$, sendo α e β eventos quaisquer. Sob esse viés, a Tabela 3.30 engloba essas distâncias relacionadas aos estresses radiais ocorrentes no EE (enrolamento externo), enquanto que a Tabela 3.31 comprehende os resultados referentes aos estresses radiais ocorrentes no EI (enrolamento interno).

Tabela 3.30 - Comparativo de estresses radiais no enrolamento externo por meio da distância Euclidiana, baseado no MEF.

Distância Euclidiana – Estresse Radial Médio (EE)					
$\sigma_{r3\phi}$ (%)	$\sigma_{r2\phi}$ (%)	$\sigma_{r2\phi T}$ (%)	$\sigma_{r\phi T}$ (%)	$\sigma_{rinrush}$ (%)	MAX (%)
$\sigma_{r3\phi}$ (%)	18,41	31,16	35,10	–	0,00
$\sigma_{r2\phi}$ (%)	18,41	12,76	16,70	–	18,41
$\sigma_{r2\phi T}$ (%)	31,16	12,76	3,94	–	31,16
$\sigma_{r\phi T}$ (%)	35,10	16,70	3,94	–	35,10
$\sigma_{rinrush}$ (%)	–	–	–	–	–
MAX (%)	0,00	18,41	31,16	35,10	–

Fonte: Autor.

Tabela 3.31 - Comparativo de estresses radiais no enrolamento interno por meio da distância Euclidiana.

Distância Euclidiana – Estresse Radial Médio (EI)					
$\sigma_{r3\phi}$ (%)	$\sigma_{r2\phi}$ (%)	$\sigma_{r2\phi T}$ (%)	$\sigma_{r\phi T}$ (%)	$\sigma_{rinrush}$ (%)	MAX (%)
$\sigma_{r3\phi}$ (%)	18,42	31,00	34,69	87,01	0,00
$\sigma_{r2\phi}$ (%)	18,42	12,58	16,26	56,15	22,28
$\sigma_{r2\phi T}$ (%)	31,00	12,58	3,69	47,18	31,25
$\sigma_{r\phi T}$ (%)	34,69	16,26	3,69	44,15	34,28
$\sigma_{rinrush}$ (%)	88,87	70,45	57,87	54,18	88,87
MAX (%)	0,00	18,42	31,00	34,69	88,87

Fonte: Autor.

As constatações adquiridas das Tabelas 3.30 e 3.31 são semelhantes com as adquiridas no Capítulo II. Contudo, do fato que as distâncias Euclidianas obtidas neste capítulo serem baseadas no MEF, elas possuem maior fidedignidade. Nessas comparações, é constatado que a maior distância para valores de estresse máximo é advinda de energizações, sendo $d(\sigma_{rinrush}, \sigma_{rmáx}) = 88,87\%$ para o EI. Salienta-se novamente que não se compreendem distâncias Euclidianas associadas às energizações para o EE, tendo em vista que o transformador é energizado a vazio pelo EI.

Por meio de comparações embasadas nas Tabelas 3.30 e 3.31 verifica-se que os estresses máximos tanto para o EE quanto para o EI, são advindos das faltas simétricas – curtos trifásicos. Contudo, novamente observa-se que as distâncias Euclidianas entre faltas simétricas e assimétricas não são elevadas. Dessa forma, a alta incidência das faltas assimétricas aliada às suas severidades não desprezíveis, permite constatar que tais faltas contribuem substancialmente ao acúmulo de dano nos enrolamentos do transformador.

No que se refere às forças axiais, a Tabela 3.32 elencam-se as distâncias Euclidianas percentuais para as forças axiais compressivas totais (F_{cT}).

Tabela 3.32 - Comparativo de forças compressivas totais por distância Euclidiana.

Distância Euclidiana – Força Compressiva Total					
$F_{cT3\phi}$ (%)	$F_{cT2\phi}$ (%)	$F_{cT2\phi T}$ (%)	$F_{cT\phi T}$ (%)	$F_{cTinrush}$ (%)	MAX (%)
$F_{cT3\phi}$ (%)	19,14	33,73	40,57	79,20	0,00
$F_{cT2\phi}$ (%)	19,14	14,59	21,43	60,06	19,14
$F_{cT2\phi T}$ (%)	33,73	14,59	6,84	45,47	33,73
$F_{cT\phi T}$ (%)	40,57	21,43	6,84	38,63	40,57
$F_{cTinrush}$ (%)	79,20	60,06	45,47	38,63	79,20
MAX (%)	0,00	19,14	33,73	40,57	79,20

Fonte: Autor.

Por meio das matrizes de distâncias Euclidianas apresentadas anteriormente e das apresentadas no Capítulo II, verifica-se que poucas foram as diferenças entre as distâncias percentuais.

3.3.8 Transformador Trifásico de 15 kVA com Desalinhamento entre Enrolamentos Externo e Interno

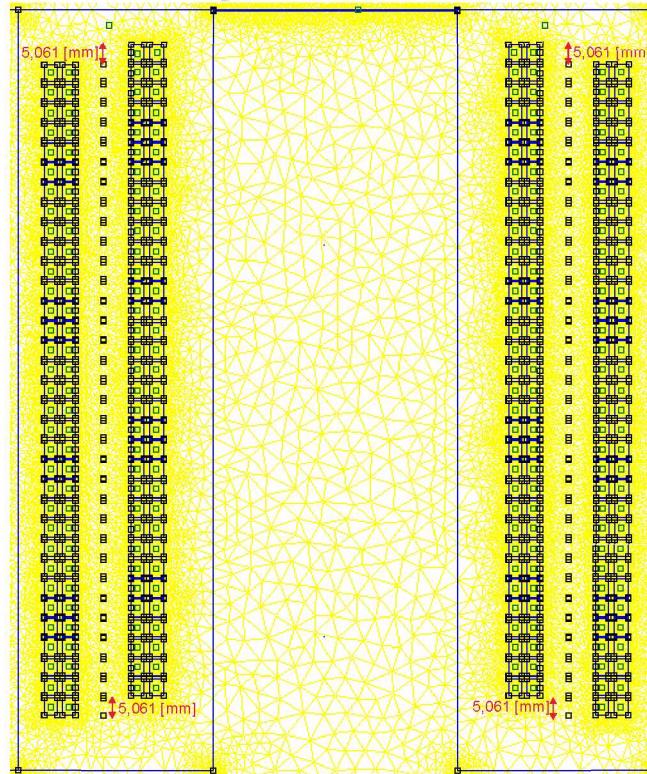
Após diversas constatações e comparações no que tange aos esforços eletromecânicos advindos de eventualidades variadas, esta seção tem por objetivo apresentar o comportamento dos esforços eletromecânicos quando o transformador é não ideal, no sentido de possuir um certo desalinhamento entre enrolamentos externo e interno.

Existe uma complexidade envolvida no projeto e fabricação de transformadores, entendendo-se ainda que a tecnologia empregada nesses processos é ascendente. Contudo, em sua montagem, mais especificamente ao enrolar as espiras, é possível que haja um desalinhamento entre os enrolamentos, mesmo que milimétrico. Além da própria fabricação, o transporte dos transformadores que é dotado de complexidade (MACHRY, 2005), é um potencial causador desses deslocamentos axiais (FESER et al., 2000).

Diante dessa motivação, esta subseção tem por objetivo apresentar os efeitos desse desalinhamento no que se refere às forças eletromecânicas e seus esforços nos enrolamentos dos transformadores. Ver-se-á que essa condição implica em mudanças na distribuição de fluxo magnético que, por sua vez, causa algumas mudanças significativas, principalmente, nas forças axiais. Essas variações serão observadas para faltas simétricas e assimétricas.

Para os estudos aqui delineados, da mesma forma que fora realizado em Rosentino (2010), provoca-se um desalinhamento $w = 5,061$ [mm] entre os enrolamentos da fase B, que equivale à espessura axial do condutor adicionada à espessura da isolação entre espiras. Essa é uma condição de contorno adotada para representar esse fenômeno. A Figura 3.44 permite visualizar o deslocamento implementado nos modelos.

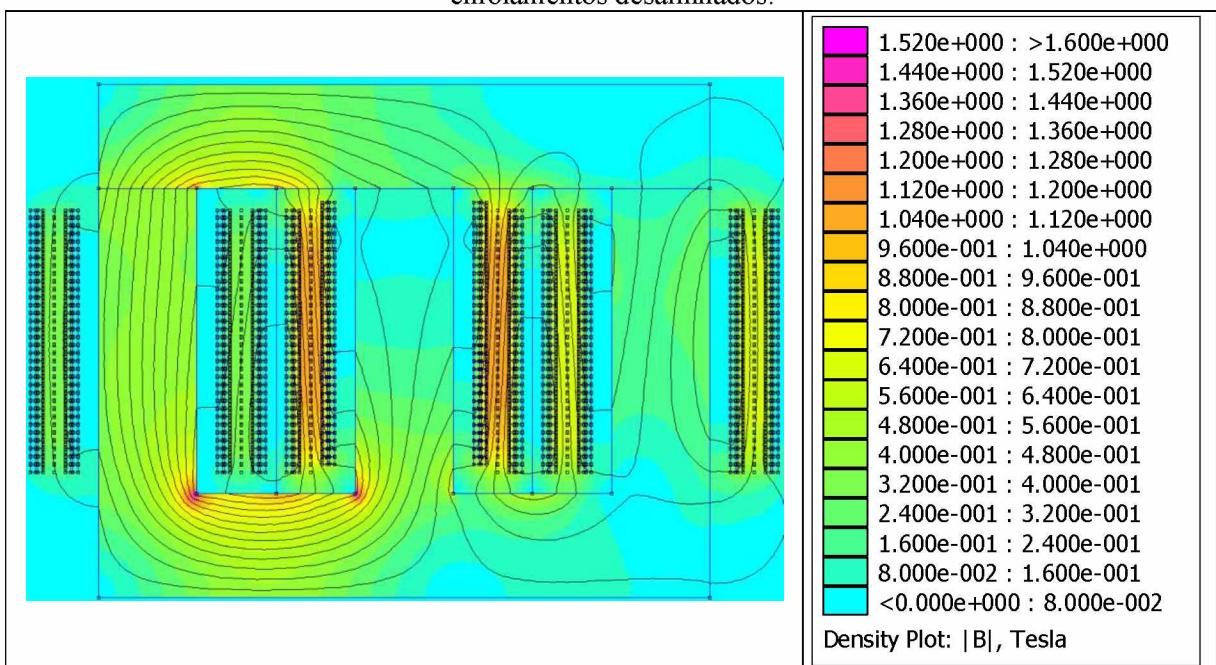
Figura 3.44 - Desalinhamento imposto entre enrolamento externo e interno da fase B.



Fonte: Autor.

Pelo desalinhamento imposto e da inserção das correntes de curto-círcuito trifásico no FEMM, é obtida uma nova distribuição de fluxo magnético no interior do transformador, visualizada na Figura 3.45. Pode-se observar que as magnitudes associadas à essa nova condição pouco diferem das apresentadas anteriormente para o caso ideal. Não obstante, é observado uma maior presença de linhas de fluxo no sentido radial na parte inferior dos enrolamentos da fase B. Diante disso, com embasamento no que foi exposto no Capítulo II, é esperada uma mudança no comportamento das forças axiais.

Figura 3.45 - Distribuição de fluxo magnético para a condição de curto-círcuito trifásico, com enrolamentos desalinhados.



Fonte: Autor.

Pode-se observar uma mudança na distribuição de fluxo magnético no interior do transformador, onde nota-se uma maior existência de linhas radiais de fluxo. Desta forma, é esperado uma diferença nas forças axiais para essa nova situação.

As Figuras 3.46 e 3.47 mostram, respectivamente, o comportamento da força radial de tração no enrolamento externo e de compressão no enrolamento interno. Em ambas as figuras, apresenta-se também o comportamento obtido para o caso onde os enrolamentos estão idealmente alinhados entre si. Apesar de, numericamente, o desalinhamento não provocar mudanças significativas nas forças radiais, verifica-se pelas figuras uma leve mudança comportamental nas forças radiais do enrolamento externo.

Figura 3.46 - Força radial de tração distribuída no EE - Desalinhamento vs Ideal.

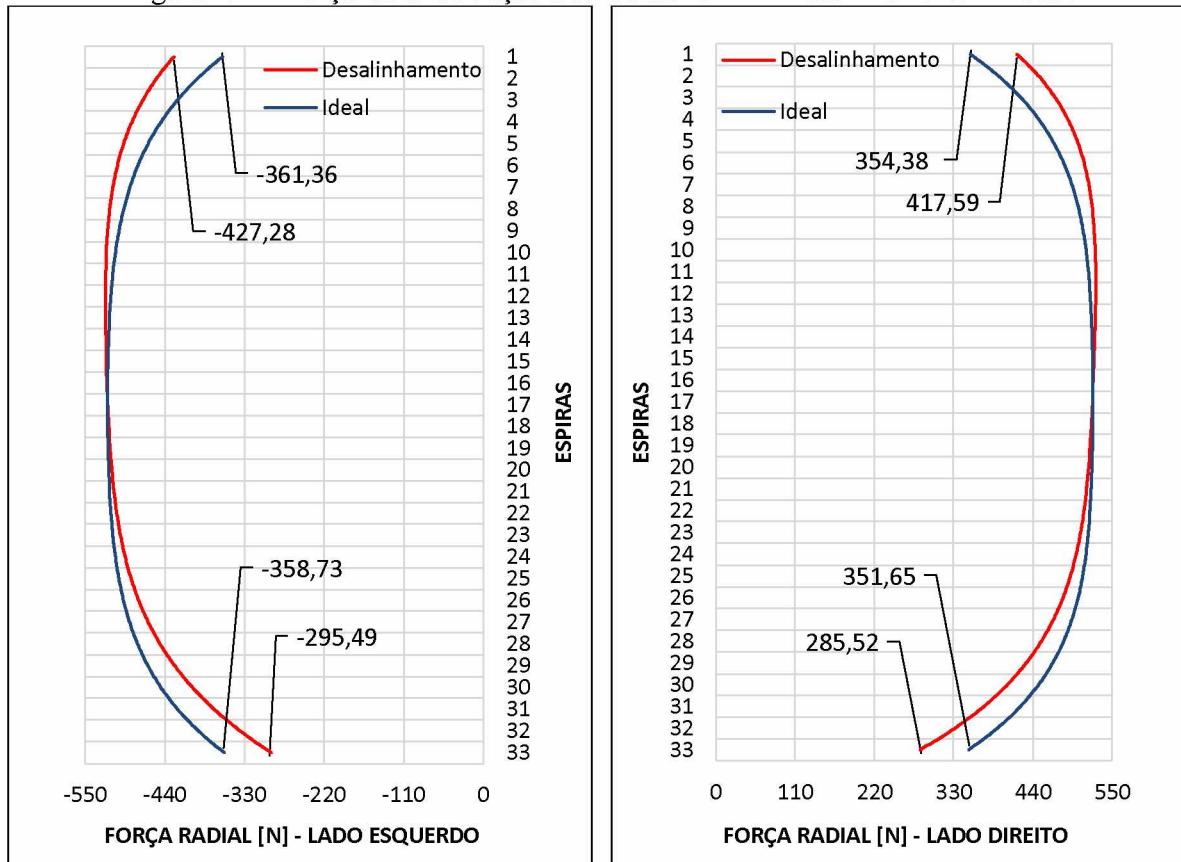
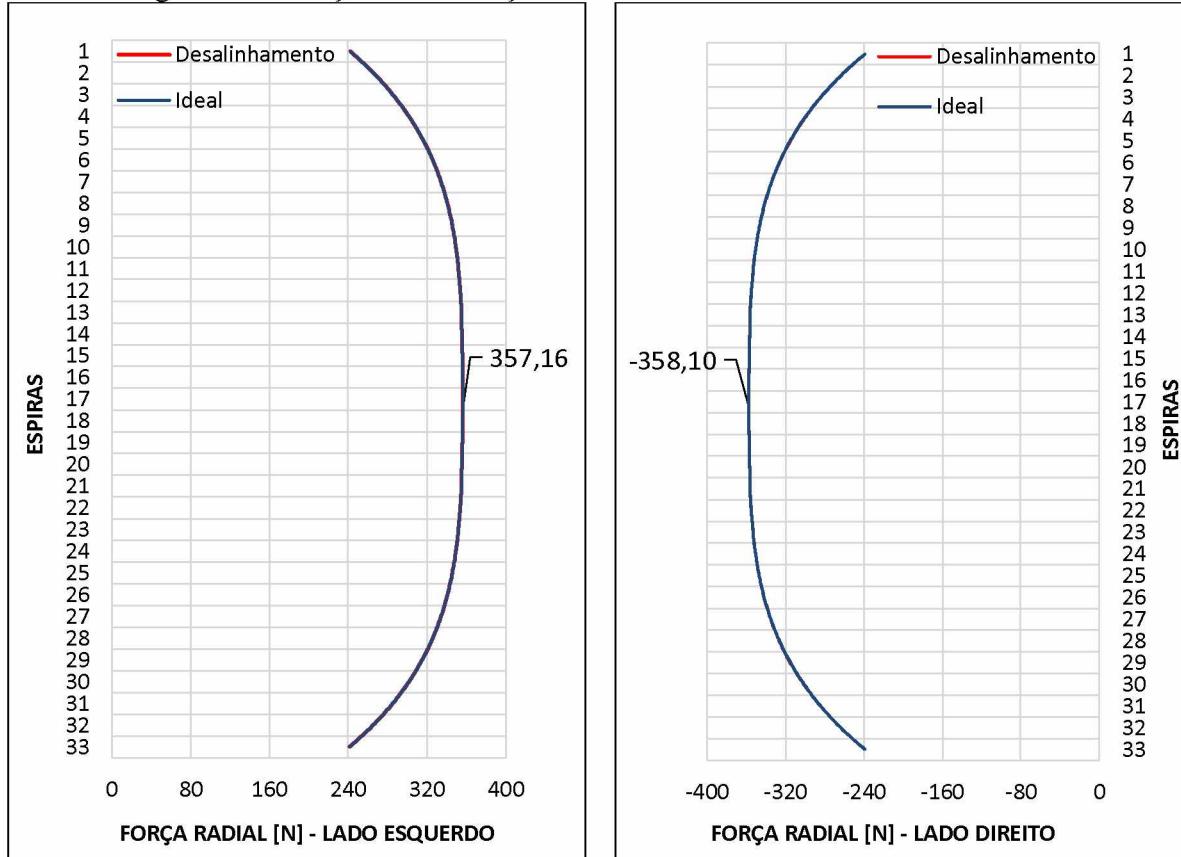


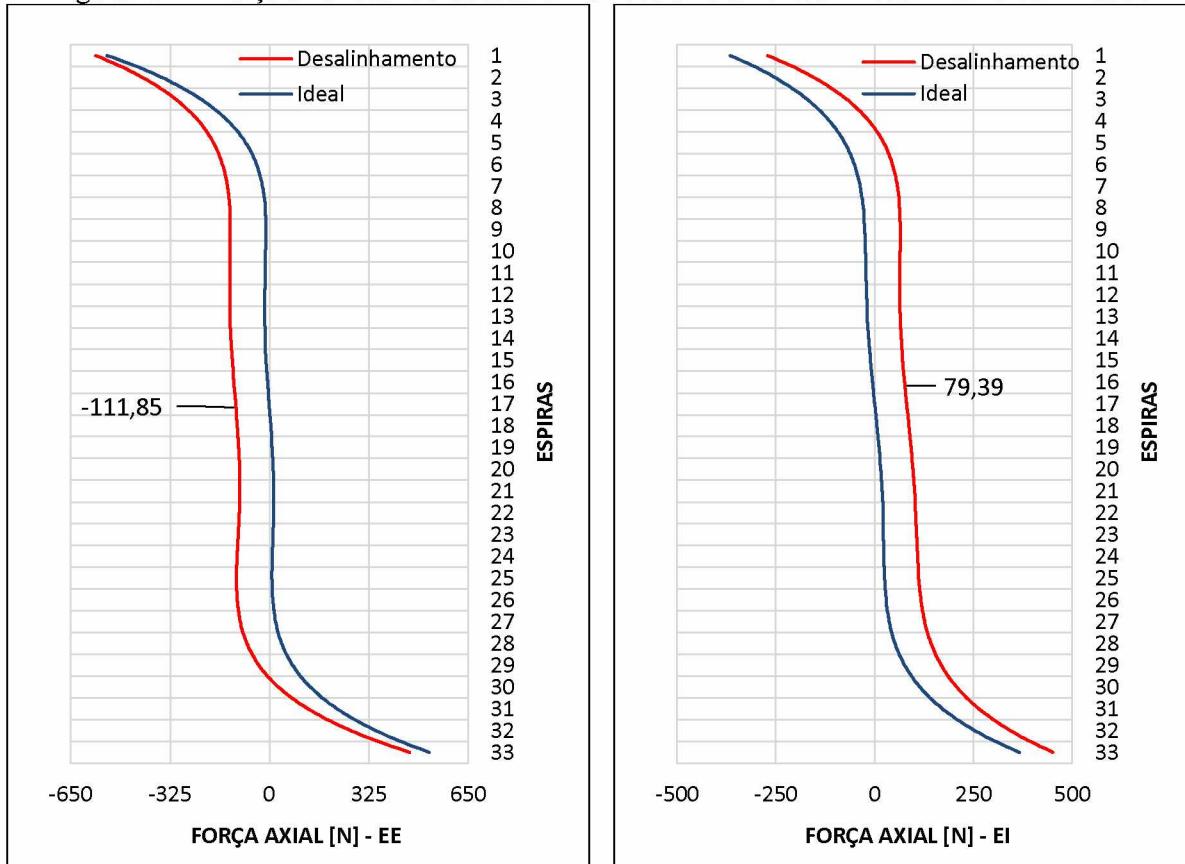
Figura 3.47 - Força radial de tração distribuída no EI - Desalinhamento vs Ideal.



Fonte: Autor.

Sob a perspectiva das forças axiais, apresenta-se na Figura 3.48 a força axial distribuída total em ambos os enrolamentos. Em contraste, é apresentada a força axial distribuída total para o caso onde os enrolamentos estão alinhados entre si. Averíguase que as maiores forças axiais distribuídas ainda continuam nas extremidades dos enrolamentos. Todavia, para o EE percebe-se, agora, que a maior parte das forças é negativa (e não nula). Por outro lado, para o EI percebe-se que a maior parte das forças é positiva (e não nula). Dessa forma, essa configuração de forças dá procedência a uma força resultante, fazendo com que o desalinhamento tenda a aumentar na presença de elevadas correntes, tendo em vista que, no EE há forças positivas, enquanto que EI há forças negativas.

Figura 3.48 - Força axial distribuída total em ambos enrolamentos - Desalinhamento vs Ideal.

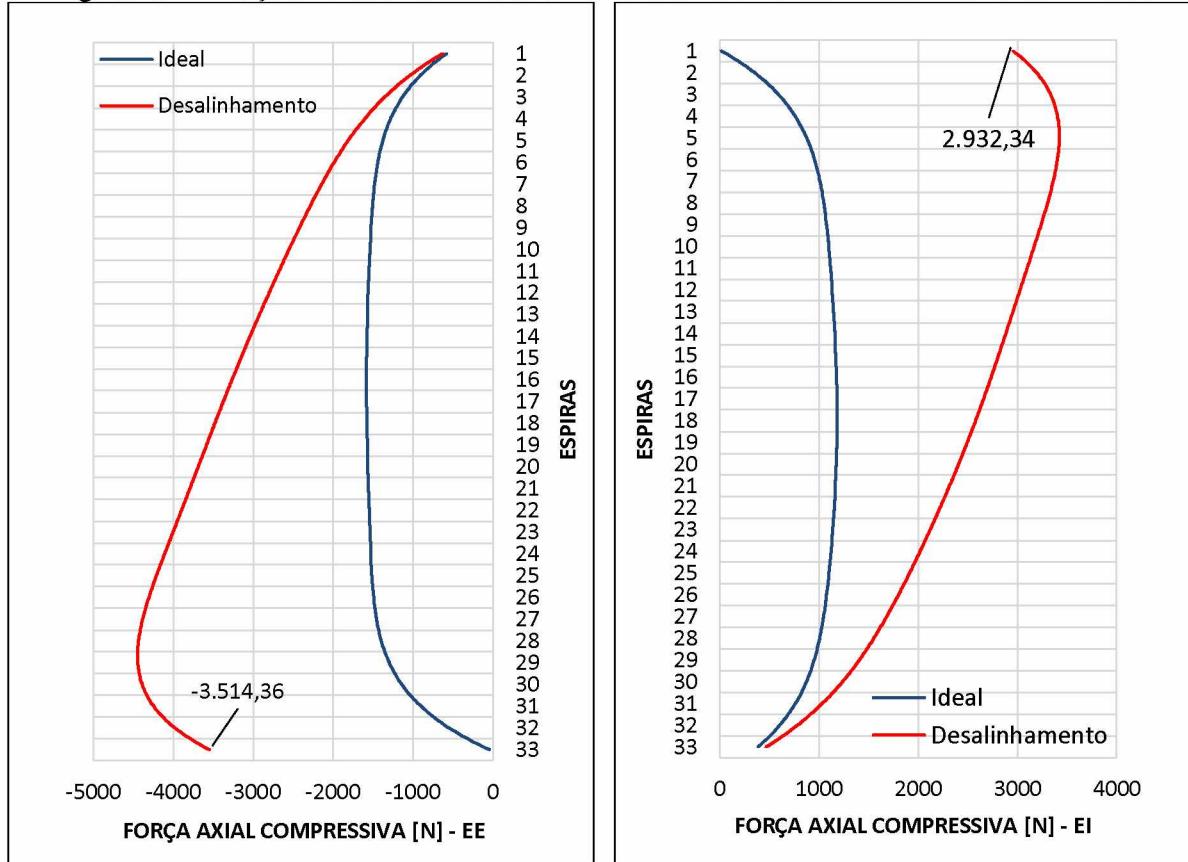


Fonte: Autor.

Objetivando evidenciar o que foi exposto, a Figura 3.49 apresenta a soma das forças ao longo dos enrolamentos, onde chega-se em um elevado valor positivo na primeira espira do enrolamento interno e por outro lado, um elevado valor negativo na última espira do enrolamento externo. É factível salientar que esses esforços eram praticamente nulos no caso onde os enrolamentos eram alinhados, sendo que, para observar a diferença comportamental entre os casos, a Figura 3.49 apresenta também a força no caso ideal de alinhamento. Conforme

Rosentino (2010) constatara, essas análises trazem alertas no que tange ao projeto e fabricação do equipamento, na tentativa de manter os enrolamentos alinhados entre si.

Figura 3.49 - Força axial acumulada total em ambos enrolamentos - Desalinhamento vs Ideal.

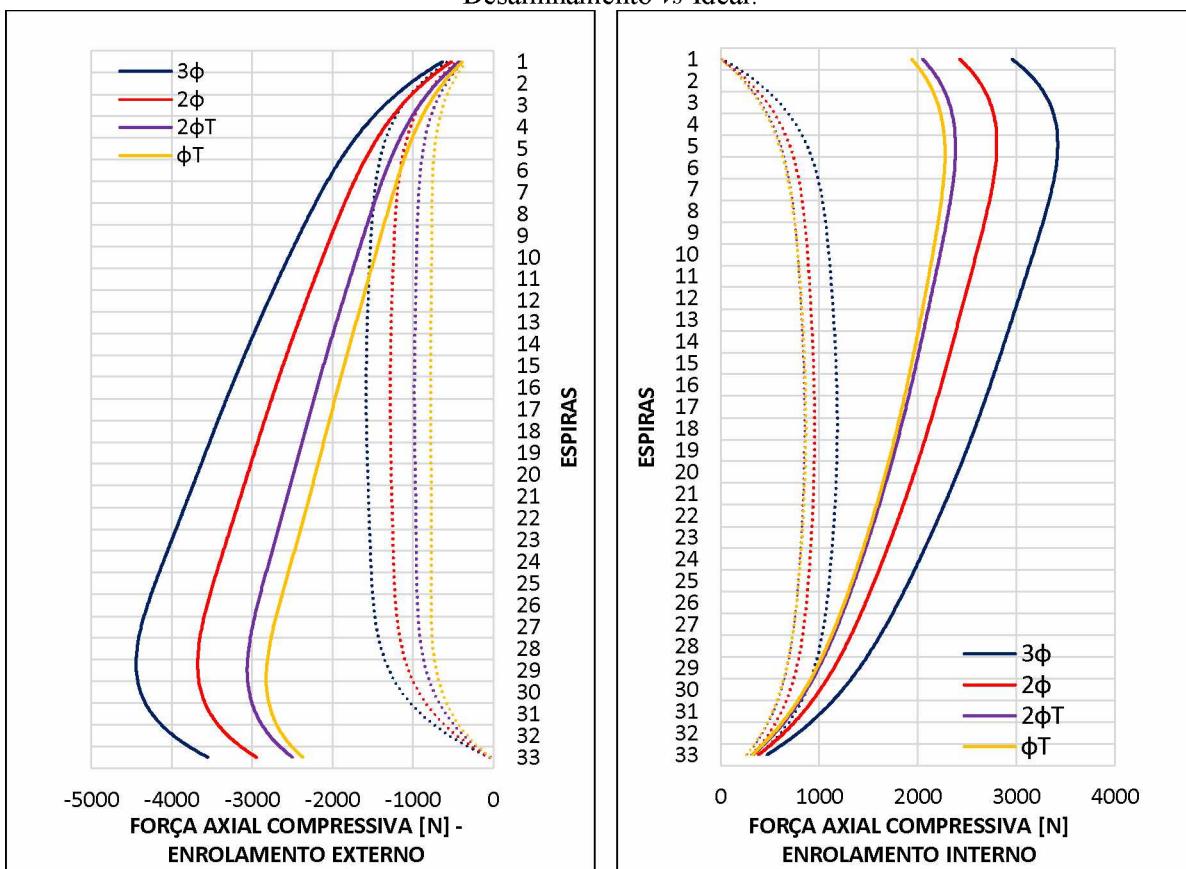


Fonte: Autor.

Contudo, conforme apresentado, a alta incidência de faltas assimétricas faz com que as investigações não devam se limitar às faltas simétricas. Nesse sentido, conclui-se também no presente trabalho que as forças radiais pouco se alteram, no que se refere às magnitudes para os demais casos. Para as forças axiais, assim como nos curtos trifásicos, é observado que o desalinhamento tende a aumentar. Isto posto, deve-se salientar que, apesar das magnitudes serem inferiores, devido à maior incidência das faltas assimétricas, maiores contribuições na tendência de aumento do desalinhamento entre enrolamentos podem ser feitas pelas faltas assimétricas.

Nessa conjuntura, a Figura 3.50 apresenta a soma das forças axiais ao longo do enrolamento, no caso das faltas simétricas e assimétricas no intuito de comprovar que a tendência de aumento do desalinhamento ocorre também para esses casos. Para essa comprovação, também se apresentam nessa figura os resultados que outrora foram obtidos, quando os enrolamentos eram idealmente alinhados.

Figura 3.50 - Força axial acumulada total em ambos enrolamentos, sob faltas simétricas e assimétricas
- Desalinhamento vs Ideal.



Fonte: Autor.

Essa constatação consubstancia as afirmações realizadas por Najdenkoski e Manov (1998), Salon et al. (2000) e Rosentino (2010). Isto é, o desalinhamento entre os enrolamentos influencia na distribuição de linhas de fluxo de dispersão e, por conseguinte, de forma bem intensa no comportamento das forças axiais que tendem a aumentar o desalinhamento inicial.

A avaliação antes realizada pelos autores supracitados para curtos-circuitos trifásicos é consubstanciada por esta pesquisa por meio de estudos que envolvem, também, faltas assimétricas. Dessa forma, essas constatações reforçam o alerta que fora feito por Rosentino (2010) referente ao projeto e concepção do equipamento, onde deve-se, dentro do possível, manter os enrolamentos alinhados entre si.

3.3.9 Aterramento por Resistência do Neutro de Transformadores e Implicações nos Esforços Eletromecânicos

Em sistemas com o neutro aterrado, naqueles que são aterrados solidamente, é possível observar reduções no nível de sobretensões transitórias, melhorias na proteção contra descargas atmosféricas, simplificações na localização do ponto de falta e melhorias nos sistemas de

proteção em termos de coordenação e seletividade. Todavia, possuem uma elevada corrente de curto-círcuito fase-terra. Por outro lado, o aterramento de neutro de transformadores e geradores por intermédio de uma resistência de alto valor (RAV) ou baixo valor (RBV), possui objetivos, tais como: reduzir o valor de corrente de curto-círcuito para a terra, protegendo pessoas, equipamentos e instalações além de proporcionar níveis menores de tensões residuais na malha de aterramento, o que reduz de forma considerável, a probabilidade de ocorrência de tensão de toque e passo (PIMENTA, 2010; BERNARDI, 2015).

Diante desse contexto, esta subseção visa, tão somente, mostrar que os esforços eletromecânicos estão associados de forma indireta com a inserção, ou não, de uma resistência entre o neutro e o terra. Dessa forma, constatar-se-á que a inserção da resistência de aterramento é uma opção não somente para limitação das correntes de curtos monofásicos, mas também para a preservação da vida útil do transformador, tendo em vista que estes são os curtos mais incidentes no sistema elétrico de potência. Isto posto, vislumbra-se no conjunto de equações a seguir que a corrente é inversamente proporcional à resistência. Com isto, a força é inversamente proporcional ao quadrado do valor da resistência.

$$I \propto \frac{\Gamma}{R}$$
$$F \propto \Gamma_1 \cdot I^2 \Rightarrow F \propto \Gamma_1 \cdot \left(\frac{\Gamma}{R}\right)^2 = \frac{\Gamma_2}{R^2}$$

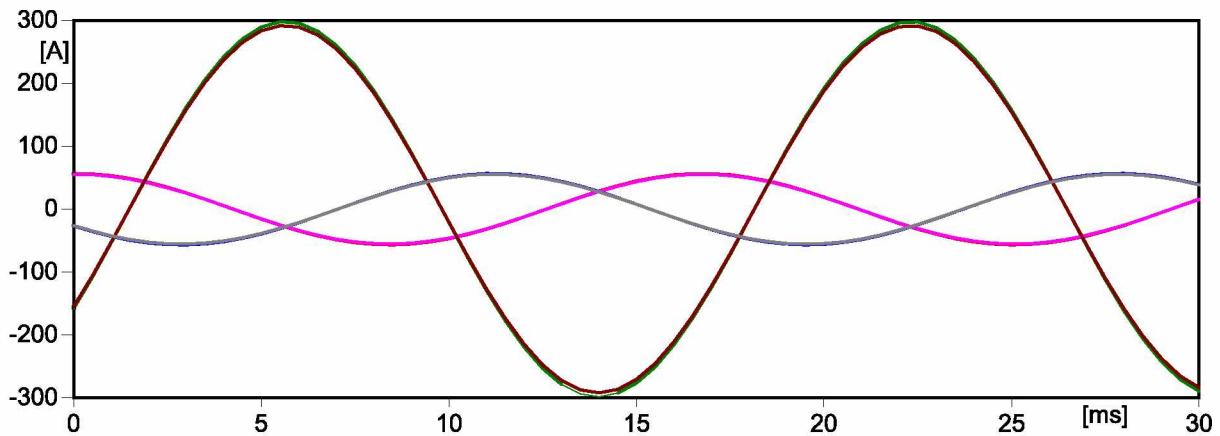
Em que:

Γ, Γ_1 e Γ_2 são valores constantes $\in \mathbb{R}$.

Para atestar as afirmações realizadas, de forma extremamente representativa, toma-se novamente como exemplo, o transformador de 15 kVA sob estudo. A especificação da resistência de aterramento, usualmente visa limitar a corrente de falta fase-terra em 20% ou menos em relação à corrente simétrica de curto-círcuito trifásico (PIMENTA, 2010). Dessa maneira, foi estimado um valor de resistência em torno de 0,055986 Ω que limita a corrente de pico de curto-círcuito monofásico em torno de 297,94 [A], conforme apresentado na Figura 3.51.

Salienta-se que o valor estimado é baixo quando comparado com valores recomendados em COPEL (2013) ou CPFL (2008). Esse fato é compreensível, devido à tensão de operação do transformador sob estudo ser baixa. Todavia, o objetivo aqui é tão somente atrair atenção para as questões mencionadas.

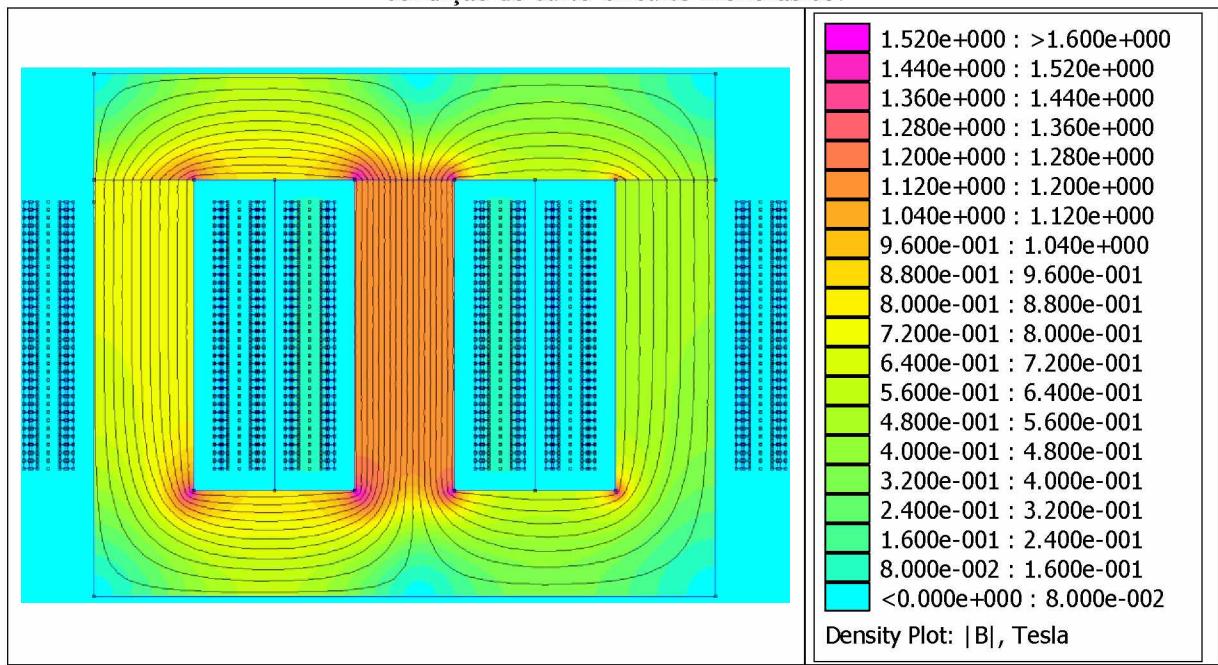
Figura 3.51 - Correntes elétricas para curto-círcuito monofásico na presença de resistência de aterramento no neutro do transformador.



Fonte: Autor.

A partir do modelo implementado no FEMM e inserção das correntes para a nova situação, uma nova característica de distribuição de fluxo magnético é obtida e apresentada na Figura 3.52. Essa característica aproxima-se bastante da obtida em condições nominais, isto é, pouco se observa fluxo de dispersão entre os enrolamentos e a maior parte do fluxo magnético concentra-se no núcleo ferromagnético.

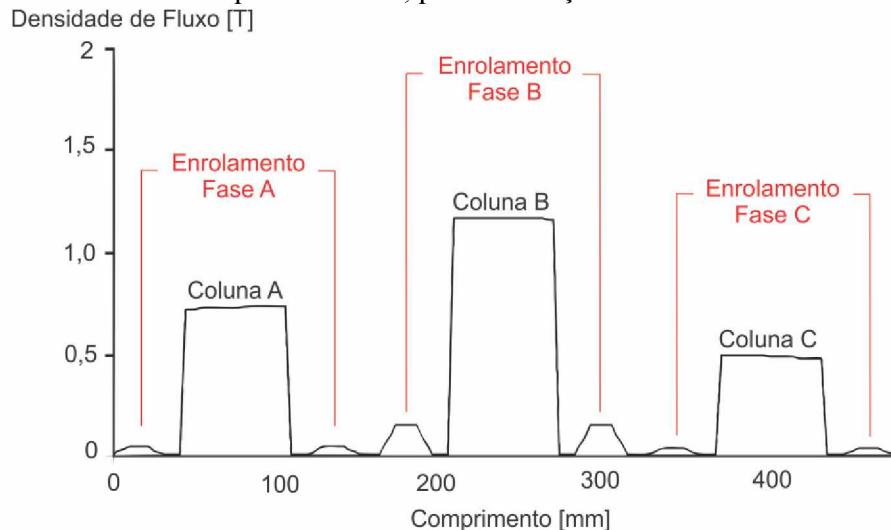
Figura 3.52 - Distribuição de fluxo magnético do transformador aterrado por resistência, para a condição de curto-círcuito monofásico.



Fonte: Autor.

A Figura 3.53 mostra a distribuição de fluxo magnético ao longo do transformador, dando consistência às afirmações realizadas anteriormente. Em observância à Figura 3.34, evidencia-se a redução significativa do fluxo de dispersão existente entre os enrolamentos.

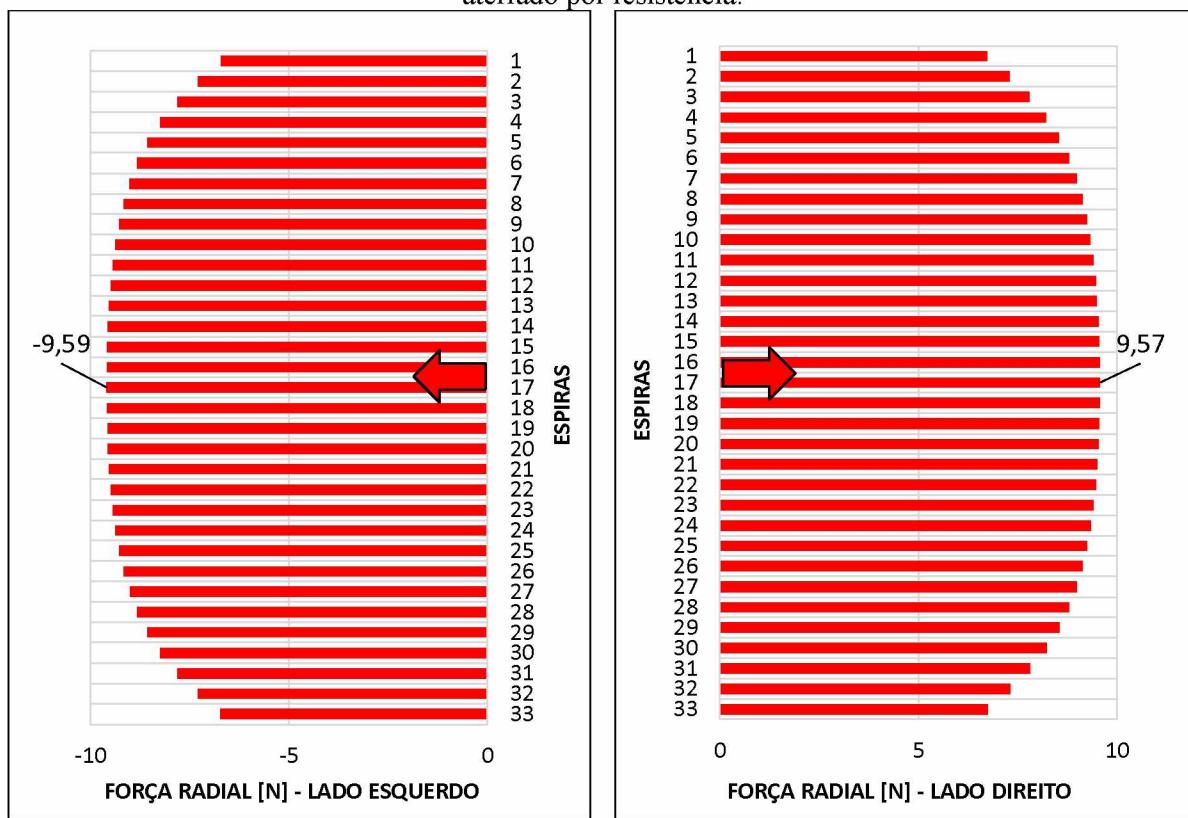
Figura 3.53 - Densidade de fluxo nas colunas e nas regiões entre enrolamentos de cada fase do transformador aterrado por resistência, para a condição de curto-círcuito monofásico.



Fonte: Autor.

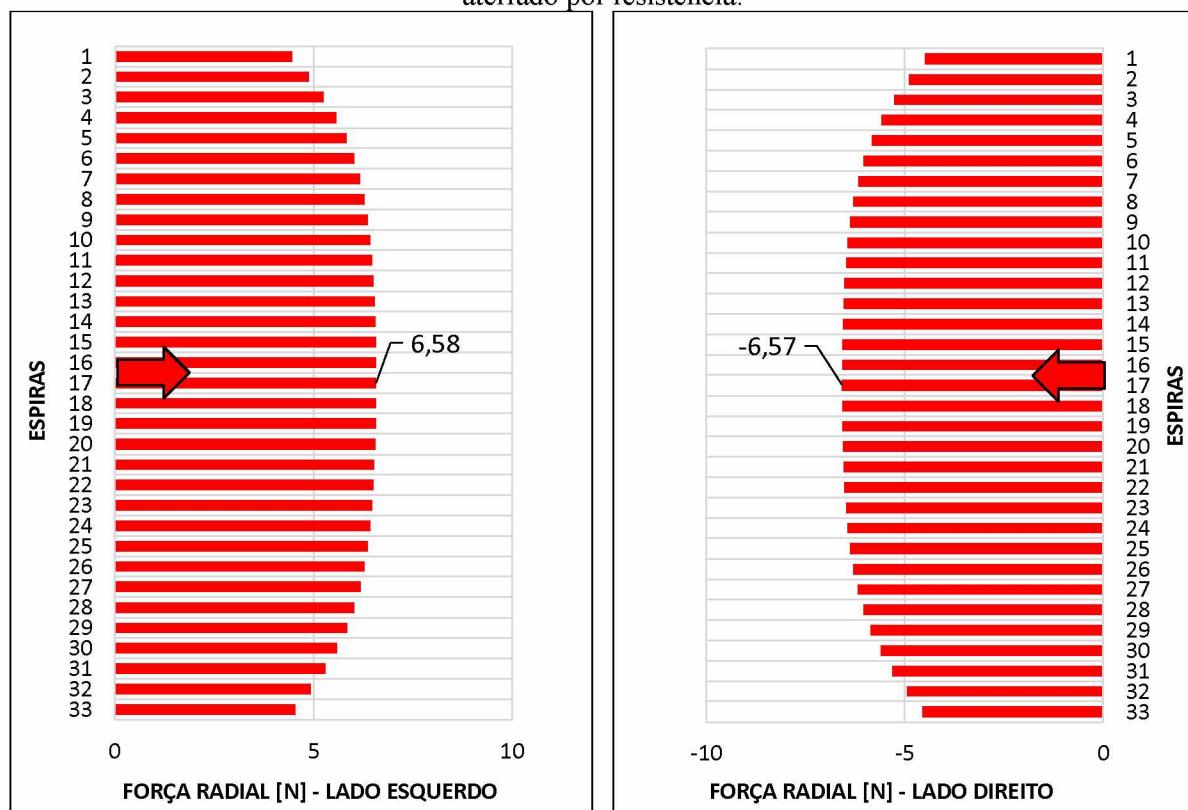
Evidentemente, aliado ao fato de que as correntes tomaram proporções bem menores, a diminuição do fluxo de dispersão faz com que o decrescimento substancial das forças associadas aos curtos fase-terra seja um fato. Nesse viés, apresenta-se nas Figuras 3.54 e 3.55 a força radial para ambos enrolamentos sob essa nova condição operativa. Nota-se que, diferentemente de quando não se havia a resistência de aterrramento, as forças eletromecânicas associadas são praticamente desprezíveis, fato esse também observado para forças axiais por meio da Figura 3.56.

Figura 3.54 - Força radial de tração distribuída no EE para curtos monofásicos, com transformador aterrado por resistência.



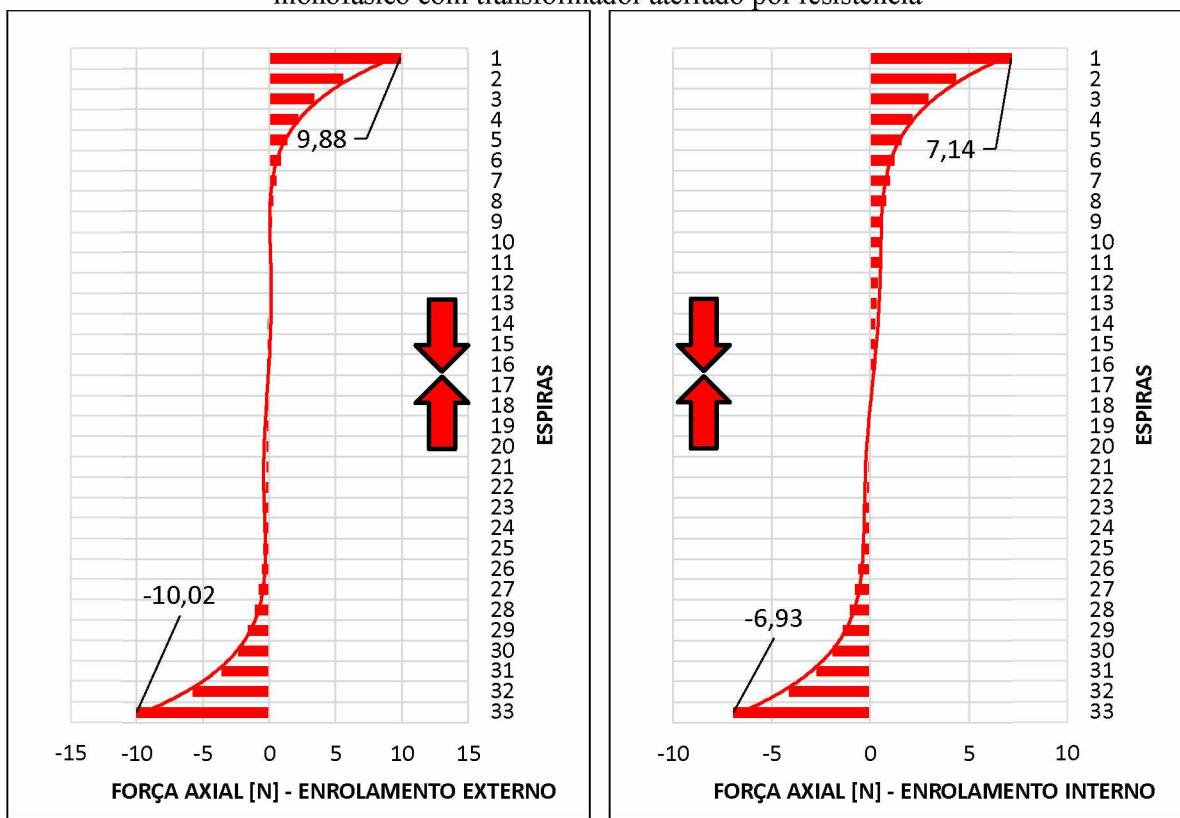
Fonte: Autor.

Figura 3.55 - Força radial de tração distribuída no EI para curtos monofásicos, com transformador aterrado por resistência.



Fonte: Autor.

Figura 3.56 - Força axial distribuída total em ambos enrolamentos, para condições de curto-circuito monofásico com transformador aterrado por resistência



Fonte: Autor.

Diante do exposto, é verificado que a inserção de resistência de aterramento entre o neutro do transformador e o terra com o objetivo de limitar as correntes de curtos-circuitos fase-terra, implica de forma indireta, em uma diminuição descomedida das forças radiais e axiais. Pelo fato de que a inserção da resistência tem como objetivo diminuir a corrente de curto-circuito fase-terra, parece lógica a diminuição dos esforços eletromecânicos associados a algumas das faltas assimétricas, contudo, ressalta-se que esta vantagem não é objetivada na iniciativa tomada na inserção da resistência – essa iniciativa visa tão somente a redução de corrente.

Dessa forma, os esforços eletromecânicos para faltas fase-terra – mais ocorrentes – tornam-se praticamente desprezíveis. Por outro lado, o equacionamento apresentado no Capítulo II para faltas fase-fase-terra permite constatar que, quando na presença de uma resistência de aterramento entre o neutro e o terra, as magnitudes das correntes de falta também serão menores. Nesse sentido, é factível afirmar que a suportabilidade mecânica de transformadores que são aterrados por resistência decrescerá de forma bem mais lenta no decorrer de sua vida útil, tendo em vista que, em termos de dano cumulativo, pouco se computará os esforços advindos de faltas fase-terra e fase-fase-terra.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo objetivou apresentar as simulações computacionais utilizando o programa FEMM, baseando-se no MEF. Algumas aplicações e definições acerca do MEF foram delineadas.

Na sequência, foram elencadas as características elétricas, geométricas e magnéticas de um transformador trifásico de 15 kVA, o qual fora implementado no FEMM. Apesar de laboratorial, esse é um transformador portador de características típicas de um transformador de distribuição. Detalhamentos no que tange à modelagem do transformador no *software* foram expostos.

As simulações computacionais consideraram as condições operacionais de qualquer transformador alocado no sistema elétrico, tais como energizações e faltas simétricas e assimétricas. A priori, apresentou-se o comportamento do transformador frente às suas condições nominais, onde a característica de distribuição de fluxo magnético foi destacada no intuito de oferecer um referencial para as análises a posteriori. Constatou-se para esse caso que o fluxo magnético se concentra no material ferromagnético, quase inexistindo fluxo de dispersão e, por consequência, implicando em forças praticamente desprezíveis.

Frente às faltas simétricas – curtos-circuitos trifásicos – uma nova característica de distribuição de fluxo magnético foi obtida, percebendo-se uma grande concentração de fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos, que aliada com a elevada corrente de curto-circuito resultou em elevadas forças eletromagnéticas nos enrolamentos do transformador. Tendo em vista que o maior pico da corrente assimétrica de curto-círcito trifásico fora observado na fase B, os esforços eletromecânicos foram analisados somente nessa fase. Os resultados foram comparados com aqueles obtidos no Capítulo II, onde verificou-se boa proximidade para os esforços radiais. Maiores divergências foram encontradas para as forças axiais na extremidade do enrolamento interno e nas forças axiais compressivas em ambos os enrolamentos.

Fugindo à “regra” da literatura, em que as faltas assimétricas não são analisadas quando o assunto versa esforços eletromecânicos, este capítulo seguiu na direção de avaliar tais esforços. Verificou-se que, da mesma forma que para as faltas simétricas, existem acentuados fluxos de dispersão – apesar de características de distribuição de fluxo para todos os eventos – entre enrolamentos que, associados às elevadas correntes, implicam em forças radiais e axiais elevadas. Ressalta-se que os valores encontrados, nesse caso, são inferiores àqueles vislumbrados para faltas simétricas. Todavia, a grande incidência dessas faltas, aliada à sua

severidade não desprezível, faz com que elas venham a contribuir de forma significativa no acúmulo de dano aos enrolamentos do transformador.

O fato mencionado foi observado na aplicação do conceito de distâncias Euclidianas, onde encontram-se distâncias não muito elevadas das faltas assimétricas e simétricas. No que tange às energizações, observou-se uma distância percentual bem maior, o que não isenta a responsabilidade dessas nas falhas mecânicas dos transformadores, posto que em alguns casos, as energizações dos transformadores são frequentes.

Ainda acerca do emprego do conceito de distâncias Euclidianas, por meio dos resultados obtidos nos Capítulos II e III onde as distâncias percentuais foram próximas, essa estratégia caso seja bem-sucedida também para outros transformadores, pode ser utilizada para predição de esforços eletromecânicos advindos de faltas assimétricas em futuras tentativas de estimar a vida útil de transformadores de maneira quantitativa.

Verificou-se que a proposta da Equação 2.21 do Capítulo II para estimar forças compressivas totais em diferentes condições operacionais é coerente, haja visto que os valores obtidos pela expressão proposta foram próximos dos obtidos por meio do método dos elementos finitos no presente capítulo.

Por meio da suposição de um desalinhamento entre os enrolamentos externo e interno da fase B, verificou-se que as forças axiais totais produzidas nos enrolamentos foram opostas, fazendo com que o desalinhamento inicial tenda a aumentar quando na presença de quaisquer correntes transitórias de magnitude elevada. Essa mudança expressiva no comportamento das forças axiais é justificada pela mudança na característica da distribuição de fluxo, onde nota-se para esse novo caso um aumento nas linhas radiais de fluxo. Nesse sentido, foi evidenciado que uma maior atenção deve ser tomada pelos fabricantes na fase de projeto e concepção, bem como na logística de transporte no sentido de manter os enrolamentos o mais alinhado possível.

Por fim, mostrou-se a situação onde existe entre o neutro do transformador e o terra, uma resistência de aterramento. Verificou-se que para esses casos, a severidade das faltas fase-terra e fase-fase-terra, no que se refere aos esforços eletromecânicos, torna-se praticamente desprezível. Dessa forma, é factível afirmar que transformadores enquadrados nessa situação, ao longo de sua vida útil, terão uma diminuição de sua suportabilidade mecânica de forma mais branda, posto que essas faltas possuem uma incidência bastante elevada.

CAPÍTULO IV

ESTRATÉGIA PARA VERIFICAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE TRANSFORMADORES SOB A ÓTICA DA SUPORTABILIDADE MECÂNICA

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

APÓS os estudos apresentados, este capítulo expõe uma estratégia para a obtenção de um coeficiente de segurança para avaliação da confiabilidade de operação de um determinado transformador, sob a ótica mecânica, antes e depois de conectado ao sistema elétrica, contribuindo para previsões e prevenções de falhas inesperadas.

Foi visto, por meio dos capítulos anteriores, a potencialidade das faltas simétricas em ocasionar acúmulo de dano aos enrolamentos do transformador. Por meio do conceito de distância Euclidiana, constatou-se que as faltas assimétricas e energizações podem contribuir significativamente para o acúmulo de dano, visto que essas ocorrem com demasiada frequência. Nesse sentido, uma estratégia que permita analisar a suportabilidade mecânica de um transformador frente à um sistema elétrico dotado de um nível de curto-circuito específico, antes ou depois de seu alojamento, seria bem aceita.

É inegável a existência de metodologias para o diagnóstico de falhas que indicam, de alguma maneira, se os enrolamentos dos transformadores sofreram algum tipo de deformação/deslocamento. Salienta-se ainda que essas técnicas laboratoriais para avaliação da condição mecânica dos enrolamentos são extremamente importantes e, como exemplo, citam-se (CIGRE, 2002):

- Medição de capacitâncias do enrolamento;
- Medição de correntes de magnetização;
- Medição de impedância de curto-círcuito/reatância de dispersão;
- Medição pelo método de resposta em frequência das perdas adicionais (FRSL);
- Análise por impulso de baixa tensão (VLI);
- Medição de vibração do tanque;
- Análise de resposta em frequência (FRA).

Nesse contexto, tais técnicas de diagnóstico são extremamente importantes, haja vista que na avaliação das condições mecânicas dos enrolamentos, pode-se detectar deformações/deslocamentos que, em curto ou longo prazo, levam o transformador à falha. Dessa forma, é possível prever falhas nesses ativos e preparar-se para esses momentos.

Em contrapartida, muitos desses diagnósticos requerem que o transformador sob análise esteja fora de operação (*off-line*) e também demandam elevados custos financeiros (COSTA; COX, 2016). Em tratando-se do FRA, esse deve possuir, devido aos seus custos, uma elevada eficiência para a detecção ou não de algum problema no equipamento. Para tanto, uma forma de alcançar essa eficiência pode ser através do desenvolvimento de simulações computacionais que podem auxiliar no entendimento dos efeitos de parâmetros elétricos na resposta em frequência, permitindo avaliar a consistência entre valores medidos e previstos (PAULINO, 2010).

Tendo em vista que o FRA e as demais técnicas de diagnóstico visam tão somente detectar as falhas mecânicas, a obtenção de um coeficiente de margem de segurança aliado às técnicas supracitadas é extremamente funcional para verificar a confiabilidade de operação do equipamento sob o aspecto mecânico, antes mesmo de sua falha.

Salienta-se ainda que, na literatura, algumas investigações são realizadas no sentido de estimar a vida útil dos transformadores, no que tange às falhas mecânicas. Contudo, deve ser enfatizado que os estresses ocorrentes nos transformadores (elétrico, mecânico, térmico e químico) estão relacionados entre si, fazendo com que estimativas quantitativas precisas acerca da vida útil do transformador tornem-se algo extremamente complexo e incerto.

Diante do exposto, esse capítulo segue na direção de apresentar o coeficiente de margem de segurança e sua obtenção. A consistência desse coeficiente extraído de maneira analítica é alcançada por meio de comparações com resultados oriundos de simulações computacionais. Mostra-se ainda a aplicação dessa estratégia em um transformador alocado em um determinado

sistema elétrico que ao decorrer dos anos sofre alterações sistêmicas, implicando em mudanças no nível de curto-círcito.

4.2 DEFINIÇÃO DA MARGEM DE SEGURANÇA NA OPERAÇÃO DE TRANSFORMADORES

No Capítulo II foram definidas uma série de expressões para cálculos de forças e estresses eletromecânicos radiais e axiais. Com base nesse equacionamento é possível estimar um índice de segurança de operação do transformador. Para tal, leva-se em consideração os valores críticos fornecidos pelos fabricantes.

Os principais resultados obtidos nos Capítulos II e III referentes à força e estresse eletromecânico, foram os estresses médios radiais de tração e compressão ($\sigma_{r-\text{médio}}$), estresse médio para avaliação do efeito *buckling* ($\sigma_{\text{medio-buckling}}$), estresse relacionado ao efeito *bending* ($\sigma_{ax-bending}$) e as forças de compressão axial nos enrolamentos (F_{c-int} e F_{c-ext}).

Segundo a IEC 60076 (2000) os valores referidos não devem ultrapassar limites elencados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Limites críticos de forças e esforços eletromecânicos.

Estresse/Força	Limites
Estresse radial de tração e compressão	$\sigma_{r-\text{médio}} \leq f_c \cdot \sigma_{0,2}$
Estresse de efeito <i>buckling</i>	$\sigma_{\text{medio-buckling}} \leq 0,9 \cdot \sigma_{\text{crit-buckling}}$
Estresse de efeito <i>bending</i>	$\sigma_{ax-bending} \leq 0,9 \cdot \sigma_{0,2}$
Forças de compressão axial	$F_c \leq 0,8 \cdot F_{ax-crit}$

Fonte: IEC 60076 (2000).

Em que f_c é um valor constante e igual a 0,9 para estresses trativos, 0,35 para estresses compressivos em enrolamentos formados por condutores não ligados por resina e 0,60 para estresses compressivos em enrolamentos formados por condutores ligados por resina.

A partir dos limites supracitados, determina-se um coeficiente de margem de segurança, denotado por S_m , o qual pode ser estimado da seguinte forma (ROSENTINO; DELAIBA; PRÉVOST, 2017):

$$S_m = 100 - \left(\max \left\{ \frac{\sigma_{r-\text{médio}}}{f_c \cdot \sigma_{0,2}}; \frac{\sigma_{\text{medio-buckling}}}{0,9 \cdot \sigma_{\text{crit-buckling}}}; \frac{\sigma_{ax-bending}}{0,9 \cdot \sigma_{0,2}}; \frac{F_c}{0,8 \cdot F_{ax-crit}} \right\} \right) \cdot 100 [\%] \quad (4.1)$$

Nas condições definidas pelas parcelas P_1 (relacionada ao estresse radial médio), P_2 (relacionada ao fenômeno *buckling*), P_3 (relacionada ao fenômeno *bending*) e P_4 (relacionada às forças compressivas) da função máximo, o coeficiente apresentado expressa a diferença percentual entre o valor de um esforço individual ao seu valor crítico. Em contrapartida, S_m leva em conta a suportabilidade mecânica do transformador em resistir aos quatro tipo de esforços eletromecânicos, ao considerar a máxima diferença percentual dos quatro esforços para seus respectivos valores críticos.

Observa-se que para esforços nulos ou desprezíveis, o coeficiente tende ao seu valor máximo – $S_m \rightarrow 100\%$. Caso nenhum desses principais esforços e forças não excedam os seus valores críticos abarcados na Tabela 4.1, o transformador pode ser operado com certa margem de segurança, sendo que o coeficiente limitado em $0\% < S_m \leq 100\%$.

Em contrapartida, quando alguma das quatro parcelas excede seu respectivo limite crítico, o transformador corre riscos eminentes de sofrer danos estruturais mecânicos, sendo para esses casos, $S_m \leq 0\%$. Ademais, para esses casos onde o coeficiente torna-se negativo, o módulo desse coeficiente representa o quanto percentualmente foi ultrapassado em relação ao limite crítico.

Quanto menores forem os esforços, mais o coeficiente tenderá ao seu máximo – 100%. Em contrapartida, caso em algumas das parcelas apresentadas, o esforço calculado se aproxime dos valores críticos, o coeficiente de margem de segurança se afastará do máximo, proporcionando, portanto, um alerta para as condições mecânicas do transformador.

Sob outra perspectiva, deve-se salientar que na atualidade a IEC 60076:5 (2000) – em versão brasileira, tem-se a NBR 5356, parte 5 – propõe que seja realizado uma revisão de projeto para avaliação teórica da capacidade de um transformador de potência em suportar os efeitos dinâmicos devido a corrente de curto-circuito. Assim, é de responsabilidade do fabricante a maioria dos dados técnicos para tal revisão, tais como dados de projeto eletromagnético, medições eletromecânicas, especificações de material, desenhos etc.) como parte da documentação da tecnologia.

Dessa forma, durante a revisão de projeto deve-se verificar os resultados de forças e estresses, os quais podem ser confrontados, por exemplo, com os valores críticos definidos experimentalmente ou teoricamente pelos fabricantes. Todavia, muito embora a revisão de projeto seja extremamente importante, nota-se que geralmente, os compradores do equipamento, como por exemplo, as distribuidoras de energia elétrica, desconhecem esse procedimento. Além disso, a avaliação da suportabilidade mecânica não deve ser feita apenas na revisão de projeto durante a compra, mas durante a vida útil do equipamento no sistema

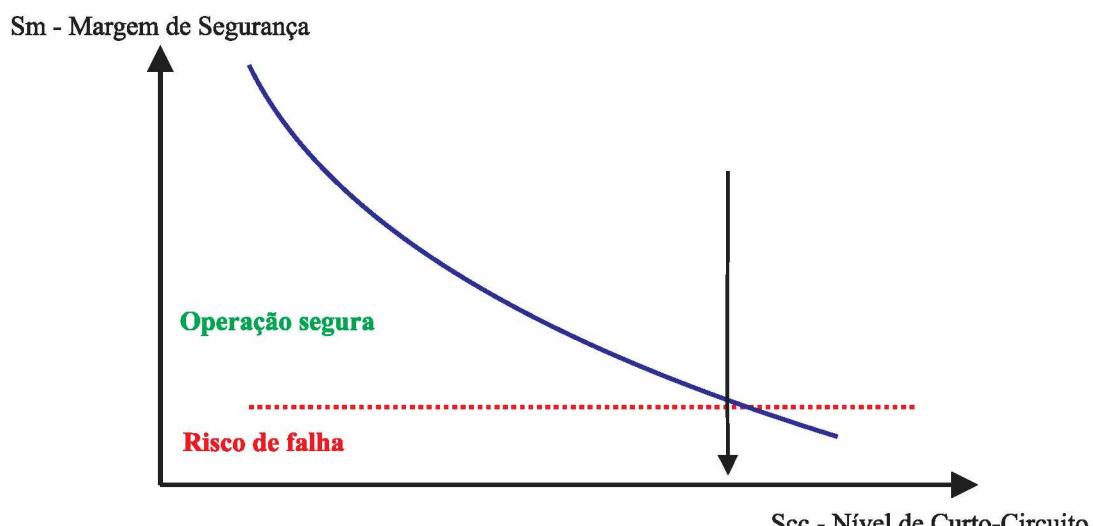
elétrico de potência que possui características dinâmicas.

Nesse contexto, acredita-se que a margem de segurança S_m exposta pode indicar, de forma sucinta, se um determinado transformador é ou não adequado, a partir de uma perspectiva de suportabilidade mecânica para uma aplicação específica em um dado sistema elétrico. Ademais, a simplicidade do procedimento de obtenção desse coeficiente torna acessível aos profissionais que podem não ter conhecimentos sobre os aspectos mecânicos utilizados no projeto do transformador pelos fabricantes. Salienta-se ainda que, essa margem de segurança permite análises acerca da suportabilidade mecânica em quatro situações distintas:

1. Revisão de projeto na fase de aquisição do equipamento:

Conforme supramencionado, nesta aplicação sob a perspectiva da suportabilidade mecânica, a adequação de um transformador a um determinado sistema elétrico é avaliada no momento de aquisição. Caso o transformador seja avaliado como impróprio, tem-se como possibilidade a redução do nível de curto-círcito (S_{cc}) no ponto de conexão do transformador. Conforme mostra a Figura 4.1, a capacidade do transformador em suportar novos curtos-circuitos (representada no gráfico por S_m) decresce a medida que o nível de curto-círcito, S_{cc} , evolui. Dessa forma, caso o S_{cc} possa ser reduzido no ponto de conexão – usando-se, por exemplo, um reator limitador de curto-círcito (RLCC) (CARDOSO; SILVA, 2014) – o coeficiente S_m dos transformadores ali alocados se elevará. A linha tracejada em vermelho significa um limite, onde a partir daquele ponto na curva $S_m = f(S_{cc})$, existir-se-á riscos mais eminentes de falhas mecânicas.

Figura 4.1 - Variações do S_m em função de S_{cc} .



Fonte: Rosentino, Delaiba e Prévost (2016).

2. Revisão durante vida útil do transformador:

Algumas alterações na rede e, em particular, a adição de geração distribuída (GD), podem implicar em aumentos não esperados no S_{cc} (UQAILI et al., 2014). Em se tratando de subestações e/ou sistemas industriais, a adição de geradores de emergência ou até mesmo de transformadores em paralelo fazem com que esse nível de curto-círcito aumente. Nesse sentido, a estratégia para obtenção da margem de segurança de operação pode ser novamente aplicada para analisar a redução desse coeficiente a luz dos novos níveis de S_{cc} .

3. Contribuição para análises relacionadas à capacidade de hospedagem da GD:

O coeficiente de segurança de suportabilidade mecânica, S_m , pode também servir como métrica útil na definição da capacidade de hospedagem da rede. Dessa forma, S_m pode contribuir nessas análises quantificando o grau de que a suportabilidade mecânica dos transformadores, já em serviço em um sistema de energia, impõe limitações sobre a adição de GD no sistema.

4. Monitoramento *on-line* por meio da proteção dos transformadores:

A margem de segurança de suportabilidade mecânica apresentada também pode desempenhar um papel de melhoria nas técnicas de monitoramento de transformadores. Uma vez que S_m é função da corrente de curto-círcito assimétrica, a análise padronizada pode ser aplicada para se determinar a corrente de curto-círcito assimétrica máxima que pode fluir nos enrolamentos do transformador sem que esses sejam danificados. A partir do conhecimento dessa corrente, os relés podem ser programados para sinalizar ocorrências em que esses valores de corrente sejam excedidos.

Após a observação de que o transformador foi sujeito às correntes mecanicamente prejudiciais (ou correntes cujas magnitudes são próximas), pode-se analisar o transformador *off-line* por meio de técnicas como o FRA, para que o transformador permaneça seguro para operar. Apesar do fato em que essas elevadas correntes impliquem na diminuição gradativa da vida útil dos transformadores, técnicas como o FRA podem identificar as deformações nos enrolamentos antes que causem uma falha grave do transformador.

4.2.1 Etapas para Determinação da Margem de Segurança

A estratégia para a definição do coeficiente de margem de segurança da suportabilidade mecânica de transformadores segue as etapas:

1. Obtenção das variáveis necessárias para determinação das forças, estresses e seus limites, isto é, deve ser solicitado um conjunto de dados elétricos e mecânicos para essas estimativas. Para tanto, este trabalho apresentou no Capítulo II, uma relação padrão de dados;
2. Definição da máxima corrente assimétrica de curto-circuito, a qual o equipamento é submetido. Ressalta-se que, nem sempre, esta corrente será a corrente de curto-circuito trifásico;
3. Através das formulações descritas no Capítulo II, ou até mesmo de resultados advindos de simulações computacionais baseados no MEF como exposto no Capítulo III, deve-se obter os principais esforços eletromecânicos;
4. Calcula-se o coeficiente de margem de segurança, S_m , conforme apresentado na Equação 4.1;
5. Analisa-se o valor de S_m . Conforme anteriormente salientado, um valor baixo significa que algum dos esforços estão próximos de ultrapassar o valor permitido. Valores negativos significam que algum dos esforços ultrapassam os valores críticos e por fim, valores elevados significam que o transformador pode operar sem riscos de falhas mecânicas;
6. Por fim, caso S_m seja muito pequeno ou ainda, negativo, tem-se a possibilidade de reduzir os níveis de S_{cc} no ponto de conexão do transformador. Para tal, reatores com núcleo de ar podem ser inseridos, fazendo com que S_m seja elevado. Deve-se salientar que essa técnica já vem sendo utilizada para a análise de superação de equipamentos, como por exemplo, os disjuntores de alta tensão.

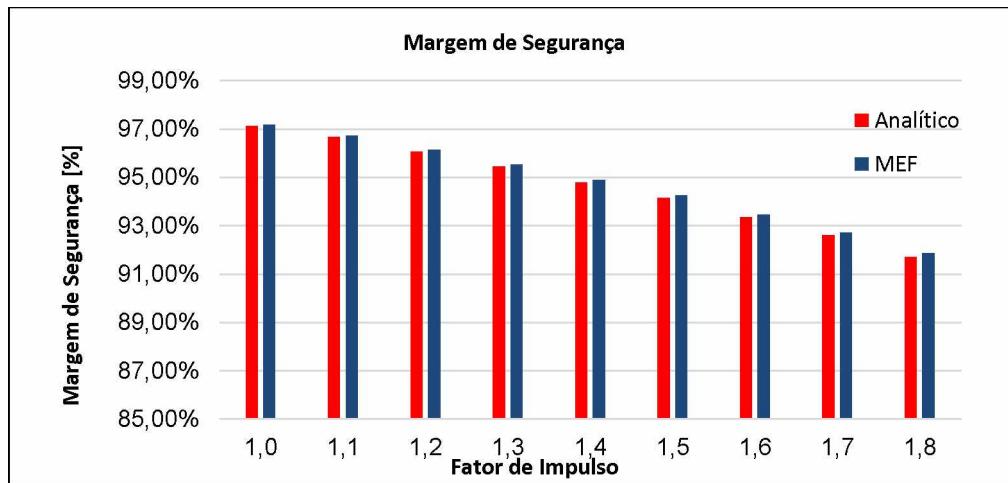
4.2.2 Coeficiente de Margem de Segurança em Transformador de 15 kVA: Obtenção Analítica e Computacional

Objetivando dar maior consistência à obtenção analítica do coeficiente de margem de segurança, este item reportar-se à aplicação da estratégia apresentada em um transformador de 15 kVA. Por meio dos equacionamentos apresentados no Capítulo II e da modelagem em elementos finitos desse transformador apresentada no Capítulo III, faz-se uma comparação dos coeficientes obtidos dessas duas maneiras com o intuito de legitimar a obtenção analítica, posto que essa é mais funcional.

Dessa forma, tomando-se como base a Equação 4.1, a Figura 4.2 engloba os coeficientes de margem de segurança para variações do fator de assimetria, f_i . Essa é uma forma de avaliar

as variações de S_m diante da robustez do sistema – quanto mais próximo de estações geradoras, maior a relação X/R , que por sua vez faz com que f_i seja maior (CORAND, 2001). Nesse sentido, o gráfico destaca, de forma indireta, a relação dos esforços com a robustez da rede.

Figura 4.2 - Margens de segurança em função do fator de impulso f_i .



Fonte: Autor.

A Figura 4.2 apresenta os valores de margem de segurança obtidos por meio da metodologia analítica e das simulações computacionais. Constatase uma grande proximidade entre os resultados obtidos. Outrossim, destaca-se que os resultados analíticos são ligeiramente mais conservadores. Deve-se salientar, todavia, que caso os coeficientes S_m fossem limitados pelas forças e esforços axiais, as diferenças entre as metodologias poderiam ser mais acentuadas, como as identificadas no Capítulo III.

Independentemente dos aumentos advindos dos fatores de impulso, nota-se que os coeficientes de margem de segurança ainda permanecem elevados.

Do fato que os valores críticos dos transformadores, de maneira geral, não variam tanto quanto a variação dos esforços, quanto maior a potência do transformador e/ou a corrente de curto-circuito, menor será a margem de segurança, sob o ponto de vista de suportabilidade mecânica.

4.2.3 Estudos de Caso em Transformador Trifásico de 5 MVA

No sentido de complementar os estudos referentes à margem de segurança, aplica-se a estratégia proposta em um transformador trifásico de 5 MVA. Para isso, a Tabela 4.2 apresenta as informações elétrica, geométrica e mecânica necessárias para estimar os esforços eletromecânicos e, consequentemente obter o coeficiente de margem segurança S_m .

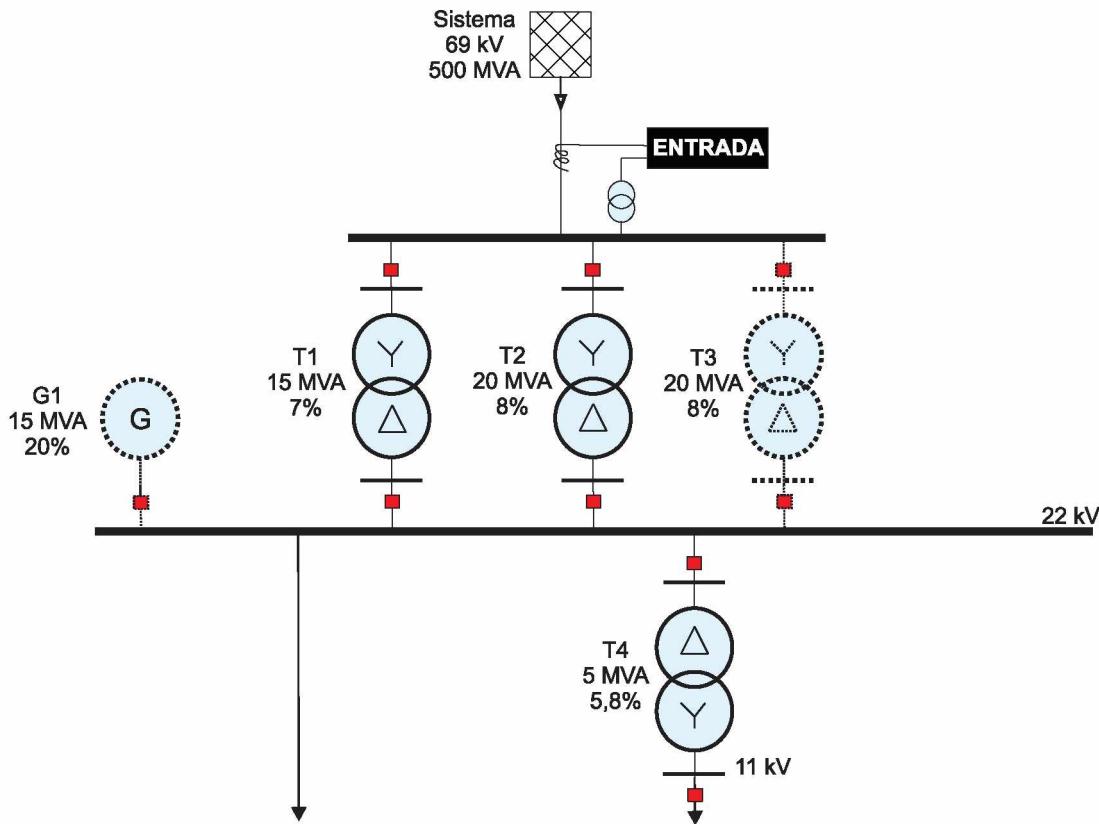
Adicionalmente, a Figura 4.3 mostra o diagrama unifilar de uma subestação hipotética, para os estudos subsequentes.

Tabela 4.2 - Dados técnicos do transformador trifásico de 5 MVA.

S_n [MVA]	5,0	
$Z\%$ [%]	5,8	
d_0 [m]	0,022	
U_l [kV]	Enrolamento externo	22
	Enrolamento interno	11
Tipo de ligação	Enrolamento externo	Delta
	Enrolamento interno	Estrela
Número de espiras	Enrolamento externo	800 (Disco)
	Enrolamento interno	231 (Camada)
d [m]	Enrolamento externo	0,051
	Enrolamento interno	0,033
h [m]	Enrolamento externo	1,2
	Enrolamento interno	1,2
D_m [m]	Enrolamento externo	0,59
	Enrolamento interno	0,466
Tipo do condutor	Enrolamento externo	MW
	Enrolamento interno	MW
b [m]	Enrolamento externo	$0,01143 \times 1$
	Enrolamento interno	$0,0089 \times 1$
e [m]	Enrolamento externo	$0,00254 \times 1$
	Enrolamento interno	$0,004826 \times 2$
w_b [m]	Enrolamento externo	0,00127
	Enrolamento interno	0,001016
E_c [N/mm ²]	Enrolamento externo	110354,0
	Enrolamento interno	110354,0
$\sigma_{máx}$ [N/mm ²]	Enrolamento externo	100,0
	Enrolamento interno	100,0
Espaçadores Radiais?	Enrolamento externo	Sim
	Enrolamento interno	Não
N_{radial}	Enrolamento externo	16,0
	Enrolamento interno	-
R_{radial} [m]	Enrolamento externo	0,051
	Enrolamento interno	-
Suportes Axiais?	Não	
Esp_{axial}	-	
L_{axial} [m]	-	
R_{axial}	-	

Fonte: Waters (1966).

Figura 4.3 - Sistema elétrico para estudo de caso.



Fonte: Autor.

Diante do sistema elétrico exposto, uma análise do coeficiente S_m é realizada diante dos seguintes estudos de caso:

Caso 1: Nível de curto-círcuito do sistema sofre aumentos gradativos:

Perante a demanda crescente por energia elétrica, o aumento da geração implica em aumentos dos níveis de curto-círcuito em todos os pontos do sistema elétrico. Nesse sentido, existem estudos de superação de equipamentos, principalmente em disjuntores no que tange à sua capacidade de interrupção. No presente trabalho, o nível de curto-círcuito é excursionado objetivando analisar o comportamento do coeficiente S_m do transformador de 5 MVA.

Caso 2: Adição de um terceiro transformador em paralelo para atendimento de demanda:

Visando atender a demanda de uma determinada planta, tem-se a possibilidade da adição de mais uma unidade transformadora na entrada. Por conseguinte, nessa situação o coeficiente S_m é analisado quando na presença de um transformador adicional em paralelo aos dois já existentes.

Caso 3: Adição de gerador no ponto de entrega do transformador:

Principalmente em sistemas industriais, a presença de geradores é bastante comum. Isto posto, o coeficiente S_m é observado quando na presença de um gerador na barra de 11 kV, para os vários níveis de curto-círcuito do item 1.

Caso 4: Adição de um terceiro transformador em paralelo para atendimento de demanda e adição de gerador no ponto de entrega:

Nessa situação, os itens 2 e 3 são analisados de forma simultânea. Isto é, as implicações da adição de um terceiro transformador em paralelo e de um gerador no coeficiente S_m são estudadas.

Tomando-se como base as situações apresentadas, as correntes de curto-círcito foram obtidas, para cada caso, com auxílio do *software* ANAFAS, do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Essas correntes assimétricas de curto-círcito trifásico são apresentadas na Tabela 4.3. Em sequência, apresenta-se a Tabela 4.4 que exibe os resultados para as parcelas que limitam o coeficiente S_m do transformador em estudo.

Tabela 4.3 - Correntes assimétricas de curto-círcito trifásico para os estudos de caso.

S_{cc} [MVA]	Caso 1		Caso 2		Caso 2		Caso 4	
	$I_{3\phi s}$ (AT)	$I_{3\phi s}$ (BT)						
100	1.648,996	5.712,291	1.690,883	5.857,39	2.170,003	7.516,856	2.196,164	7.607,479
200	2.091,227	7.244,479	2.165,594	7.501,583	2.400,157	8.314,133	2.450,421	8.488,506
300	2.293,751	7.945,787	2.389,134	8.276,204	2.520,819	8.732,373	2.587,102	8.962,239
400	2.410,886	8.351,808	2.519,202	8.726,518	2.595,185	8.989,731	2.672,491	9.258,036
500	2.487,016	8.615,021	2.604,151	9.021,042	2.645,449	9.164,358	2.730,985	9.460,155
600	2.540,366	8.800,34	2.664,114	9.228,762	2.681,897	9.290,365	2.773,312	9.607,29
700	2.579,754	8.936,529	2.708,646	9.382,77	2.709,381	9.385,824	2.805,646	9.719,041
800	2.610,176	9.041,661	2.743,037	9.502,412	2.730,985	9.460,41	2.883,833	9.806,864
900	2.628,841	9.106,828	2.770,52	9.597,108	2.748,327	9.520,486	2.851,353	9.877,631
1000	2.652,797	9.193,633	2.792,712	9.674,239	2.762,584	9.569,615	2.868,255	9.935,925
1500	2.714,818	9.404,152	2.862,229	9.915,051	2.807,409	9.724,896	2.921,457	10.120,23
2000	2.745,976	9.512,085	2.897,648	10.037,75	2.831,071	9.806,864	2.949,676	10.217,98
2500	2.765,082	9.578,525	2.919,547	10.113,86	2.845,621	9.857,776	2.967,165	10.278,56
3000	2.776,105	9.616,454	2.934,832	10.166,81	2.855,615	9.892,141	2.979,069	10.320,05
3500	2.787,421	9.655,656	2.945,413	10.204,74	2.862,817	9.917,088	2.987,741	10.349,84
4000	2.792,859	9.674,494	2.953,644	10.232,74	2.868,255	9.935,925	2.994,354	10.382,93
4500	2.798,444	9.694,349	2.960,404	10.255,14	2.872,517	9.950,944	2.999,498	10.390,57
5000	2.803,0	9.709,623	2.964,96	10.270,92	2.876,044	9.962,654	3.003,613	10.404,82

Fonte: Autor.

Tabela 4.4 - Resultados das parcelas que limitam o coeficiente S_m do transformador de 5 MVA nos estudos de caso.

S_{cc} [MVA]	Caso 1						Caso 2						Caso 3						Caso 4						
	P ₁		P ₃		P ₄		P ₁		P ₃		P ₄		P ₁		P ₃		P ₄		P ₁		P ₃		P ₄		
	EE	EI	EE	EI	EE	EI	EE	EI	EE	EI	EE	EI	EE	EI	EE	EI	EE	EI	EE	EI	EE	EI	EE	EI	EE
100	14,47	13,38	6,39	1	2,01	0,35	15,21	14,07	6,72	1	2,11	0,37	25,05	23,17	11,07	1	3,48	0,61	25,66	23,73	11,33	1	3,57	0,63	
200	23,27	21,52	10,28	1	3,23	0,57	24,95	23,08	11,02	1	3,47	0,61	30,65	28,35	13,54	1	4,26	0,75	31,95	29,55	14,11	1	4,44	0,78	
300	27,99	25,89	12,36	1	3,89	0,68	30,37	28,09	13,41	1	4,22	0,74	33,81	31,27	14,93	1	4,70	0,83	35,61	32,94	15,73	1	4,95	0,87	
400	30,92	28,60	13,66	1	4,30	0,76	33,76	31,23	14,91	1	4,69	0,83	35,83	33,14	15,83	1	4,98	0,88	38,00	35,15	16,78	1	5,28	0,93	
500	32,91	30,44	14,54	1	4,57	0,80	36,08	33,37	15,94	1	5,01	0,88	37,23	34,44	16,45	1	5,17	0,91	39,68	36,70	17,53	1	5,51	0,97	
600	34,33	31,76	15,17	1	4,77	0,84	37,76	34,93	16,68	1	5,25	0,92	38,27	35,39	16,90	1	5,32	0,94	40,92	37,85	18,07	1	5,69	1,00	
700	35,41	32,75	15,64	1	4,92	0,87	39,03	36,10	17,24	1	5,42	0,95	39,06	36,13	17,25	1	5,43	0,96	41,88	38,74	18,50	1	5,82	1,02	
800	36,25	33,52	16,01	1	5,04	0,89	40,03	37,03	17,68	1	5,56	0,98	39,68	36,70	17,53	1	5,51	0,97	44,25	39,44	19,54	1	6,15	1,04	
900	36,77	34,01	16,24	1	5,11	0,90	40,84	37,77	18,04	1	5,67	1,00	40,19	37,17	17,75	1	5,58	0,98	43,26	40,01	19,11	1	6,01	1,06	
1000	37,44	34,66	16,54	1	5,20	0,92	41,49	38,38	18,33	1	5,77	1,01	40,60	37,55	17,93	1	5,64	0,99	43,77	40,48	19,33	1	6,08	1,07	
1500	39,21	36,27	17,32	1	5,45	0,96	43,59	40,31	19,25	1	6,06	1,07	41,93	38,78	18,52	1	5,83	1,03	45,41	42,00	20,06	1	6,31	1,11	
2000	40,12	37,10	17,72	1	5,57	0,98	44,67	41,32	19,73	1	6,21	1,09	42,64	39,44	18,84	1	5,93	1,04	46,29	42,82	20,45	1	6,43	1,13	
2500	40,68	37,62	17,97	1	5,65	0,99	45,35	41,95	20,03	1	6,30	1,11	43,08	39,85	19,03	1	5,99	1,05	46,84	43,32	20,69	1	6,51	1,15	
3000	41,00	37,92	18,11	1	5,70	1,00	45,83	42,39	20,24	1	6,37	1,12	43,39	40,13	19,16	1	6,03	1,06	47,22	43,68	20,86	1	6,56	1,15	
3500	41,34	38,23	18,26	1	5,74	1,01	46,16	42,70	20,39	1	6,41	1,13	43,60	40,33	19,26	1	6,06	1,07	47,49	43,93	20,98	1	6,60	1,16	
4000	41,50	38,38	18,33	1	5,77	1,01	46,41	42,94	20,50	1	6,45	1,14	43,77	40,48	19,33	1	6,08	1,07	47,70	44,21	21,07	1	6,63	1,17	
4500	41,67	38,54	18,40	1	5,79	1,02	46,63	43,13	20,60	1	6,48	1,14	43,90	40,61	19,39	1	6,10	1,07	47,87	44,27	21,14	1	6,65	1,17	
5000	41,80	38,66	18,46	1	5,81	1,02	46,77	43,26	20,66	1	6,50	1,14	44,01	40,70	19,44	1	6,11	1,08	48,00	44,40	21,20	1	6,67	1,17	

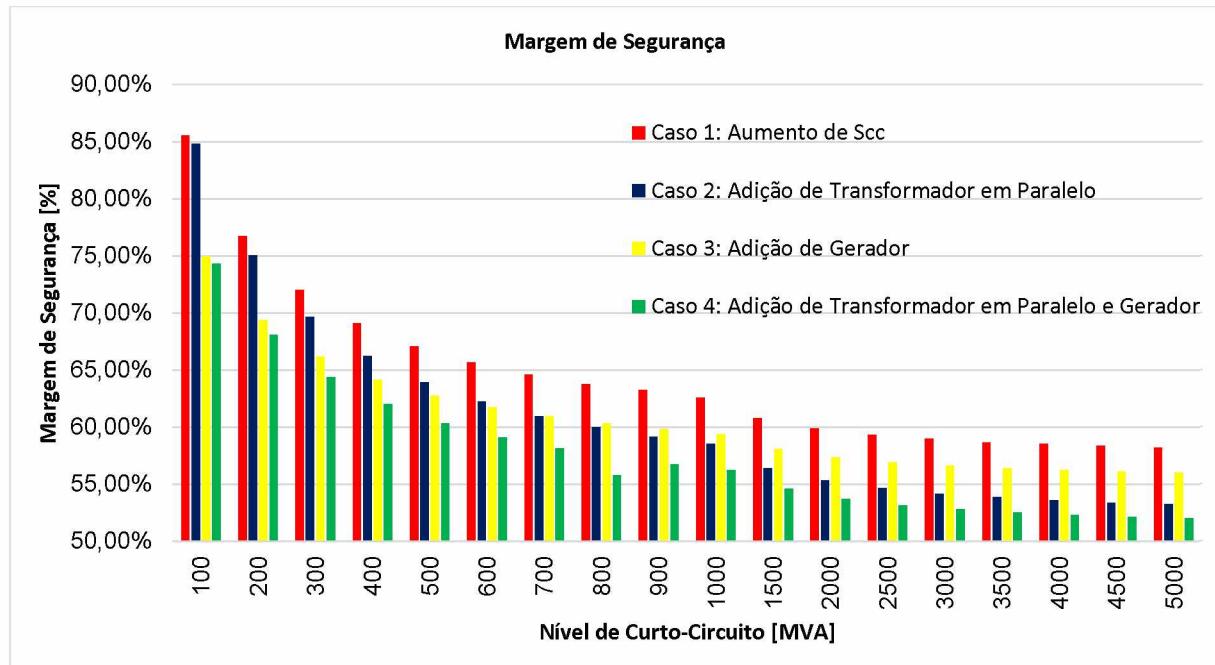
Fonte: Autor.

Por meio da Tabela 4.4 pode-se perceber que, em todos os casos, o coeficiente S_m é definido pela parcela P_1 – referente ao estresse radial médio. Constatou-se ainda que a definição de S_m por meio da parcela P_1 acontece no enrolamento externo do transformador de 5 MVA. No entanto, a definição do coeficiente vai depender das características geométricas do transformador, sendo impossível generalizar que sempre este fator será limitado pelos estresses radiais.

Para todos os estudos de caso, a parcela P_3 no enrolamento interno é unitária. Isso deve-se ao fato de que este enrolamento não conta com a presença de espaçadores radiais, inexistindo portanto a possibilidade de ocorrências relacionadas ao efeito *bending*.

No que se refere à parcela P_2 , ressalta-se que esta foi oculta na Tabela 4.4 haja vista que todos os valores são unitários, devido à inexistência de suportes axiais.

Figura 4.4 - Margem de segurança em função de algumas mudanças no sistema elétrico.



Fonte: Autor.

A figura indica o comportamento do coeficiente S_m frente aos incrementos do nível de curto-círcuito. Esse coeficiente tende a ser menor em sistemas mais robustos e em contrapartida, possui valores elevados quando o transformador está alocado em sistemas “fracos”.

Em se tratando de aumentos gradativos no nível de curto-círcuito, a Figura 4.4 permite análises no tocante a enquadrar o sistema elétrico apresentado anteriormente em um determinado nível de curto e, a partir disso, avaliar as variações de S_m para elevações de S_{cc} .

A inserção de mais um transformador em paralelo ocasionou uma diminuição na margem de segurança de operação para todos os níveis de S_{cc} analisados. Dessa mesma forma, verifica-se que a adição de um gerador na barra de 11 kV, por incrementar mais ainda o nível de curto-circuito, implica em diminuições no S_m . Adicionalmente, a inserção do transformador adicional em paralelo juntamente com a inserção do gerador implica em uma diminuição ainda mais acentuada nos valores de S_m .

Por meio das Figuras 4.4 e 4.2, percebe-se que transformadores de maior potência tendem a possuir valores de S_m inferiores àqueles de transformadores de menor potência – os esforços são significantemente maiores nesses transformadores. Além disso, os valores críticos não variam tanto quanto a variação dos esforços. Dessa forma, sob a perspectiva mecânica, os transformadores de maior potência são mais susceptíveis a uma falha devido aos esforços eletromecânicos.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da necessidade em avaliar a segurança na operação de transformadores sob a ótica mecânica, o presente capítulo apresenta uma estratégia para a determinação de um coeficiente de margem de segurança de um dado transformador sob a referida ótica.

Alguns dos principais resultados referentes às forças e estresses detalhados no Capítulo II são insumos para o equacionamento do coeficiente apresentado. Tomando-se como base a IEC 60076 (2000), os limites para cada tipo de estresse e força, foram apresentados. Dessa forma, fora apresentado o coeficiente de margem de segurança sob a perspectiva mecânica do transformador.

Quando o transformador está exposto a esforços nulos ou desprezíveis, o coeficiente tende ao seu valor máximo, ou seja, 100%. Em contrapartida, caso algum dos esforços ou forças ultrapassem os valores críticos, o coeficiente torna-se negativo, indicando, portanto, grande risco de falhas mecânicas. Para casos onde os esforços não são nulos, mas que não ultrapassam valores críticos, o coeficiente é positivo e pode expressar um alerta, ou não, para esforços que impliquem em alto valor de dano ao transformador, visto que o dano é cumulativo aos enrolamentos.

O coeficiente de margem de segurança supracitado pode servir como métrica para a adequação de transformadores em determinados níveis de curto-circuito na revisão de projeto na fase de aquisição, na avaliação da segurança de operação durante a vida útil do

transformador, em contribuições das análises referentes à capacidade de hospedagem e para monitoramento *on-line* dos transformadores, por intermédio da proteção desses equipamentos.

Apresentou-se por intermédio da aplicação da estratégia no transformador de 15 kVA que a metodologia analítica implica na obtenção de coeficientes mais conservadores do que àquelas obtidos por meio de simulações computacionais. Todavia, fora obtido boa proximidade entre os resultados o que viabiliza a aplicação analítica das formulações apresentadas, visto que essa é mais funcional e rápida, não demandando conhecimentos muito específicos acerca de simulações computacionais.

O estudo de caso no transformador de 5 MVA inserido em um determinado sistema elétrico permitiu análises no tocante às variações do coeficiente de margem de segurança à medida que o sistema elétrico sofre alterações. Os incrementos no nível de curto-círcuito, inserção de transformadores em paralelo e até mesmo, de geradores fazem com que a margem de segurança seja atenuada. Dessa forma, as avaliações por meio do referido coeficiente, fornecem subsídios para análises de capacidade de hospedagem e das condições necessárias para a expansão do sistema no que tange à suportabilidade mecânica do transformador.

Deve-se salientar que os valores críticos dos transformadores, via de regra, não aumentam tanto quanto o aumento dos esforços na medida que a potência do transformador e/ou a corrente de curto-círcuito torna-se maior. À vista disso, quanto maior a potência do transformador e a corrente de curto-círcuito, menor será a margem de segurança sob a ótica da suportabilidade mecânica.

A diminuição do nível de curto-círcuito com reatores a núcleo de ar, por exemplo, é uma solução para o aumento da margem de segurança na operação de transformadores. Sob outra perspectiva, pelo lado dos fabricantes, o emprego de materiais com limites críticos mais elevados implica em maior suportabilidade mecânica dos equipamentos e, por conseguinte, também no aumento do coeficiente S_m .

Por fim, deve-se esclarecer que a presente estratégia é útil na observação da segurança de operação de um determinado transformador em um determinado sistema elétrico. Contudo, uma boa margem de segurança, por si só, não fornece garantias de que esse transformador, em sua vida útil, não venha a falhar mecanicamente. Esse fato é justificado à luz da existência do dano cumulativo, isto é, por mais que um determinado estresse em primeira vista não seja prejudicial aos enrolamentos, a sua elevada frequência pode implicar no acúmulo de dano ao enrolamento, levando à longo prazo, à falha.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

NAS conclusões finais apresentadas no término de cada capítulo, as análises e observações pertinentes foram sintetizadas. Todavia, apresenta-se na sequência um compêndio final dos resultados alcançados e das contribuições oferecidas por este trabalho.

Num primeiro momento, o Capítulo I apresentou uma breve contextualização do tema em foco nesta dissertação. Esta salientou a importância vital do transformador, como intermediador entre pontos de geração e carga, sendo, portanto, indispensável no sistema elétrico.

Ainda nesse capítulo, apresentou-se por meio de gráficos que a taxa de falhas de transformadores é crescente. Por outro lado, pôde-se observar que parte massiva falhas nesses equipamentos possui origens mecânicas, o que motiva novas investigações relacionadas à esta temática.

Enfatiza-se nesse capítulo a inexistência de pesquisas na literatura que abordem o comportamento dos esforços eletromecânicos em transformadores quando submetidos aos curtos-circuitos assimétricos. Apesar de, via de regra, esses serem menos severos que os curtos-circuitos trifásicos, mostra-se que possuem uma incidência demasiadamente superior à dos trifásicos, motivando, portanto, os estudos aqui apresentados.

Este capítulo trouxe um estado da arte, onde foram sintetizadas as principais referências visando contextualizar e consubstanciar os assuntos delineados nesta pesquisa. Por fim, os objetivos, contribuições e estrutura desta dissertação são apontados.

Num segundo momento, os estudos avançaram no sentido de apresentar uma breve definição das forças eletromecânicas atuantes nos enrolamentos dos transformadores de uma

forma genérica, onde estimativas de forças podem ser realizadas para quaisquer correntes. Foi visto que estas forças eletromecânicas são advindas da interação da densidade de corrente com a de fluxo magnético de dispersão; dando origem às forças axiais e radiais.

Neste interim, algumas considerações acerca das correntes que originam os esforços eletromecânicos mais elevados – de energizações, faltas simétricas e assimétricas – foram feitas. Em sequência, as falhas mecânicas causadas por forças radiais e axiais foram bem descritas. Deve-se salientar que uma metodologia analítica fora também apresentada para estimar forças e estresses, bem como seus respectivos valores críticos.

Ainda nesse capítulo, a metodologia descrita foi exemplificada em um transformador trifásico de 15 kVA, sendo que as análises contemplaram este transformador frente às energizações e às faltas simétricas e assimétricas. Foi visto que os estresses máximos observados advieram das faltas simétricas – como esperado, tendo em vista que, neste caso, as correntes de curto-círcuito trifásico eram mais intensas. No entanto, por meio do emprego do conceito de distância Euclidiana, percebeu-se um distanciamento não tão grande no que tange à severidade dos estresses advindos de faltas assimétricas, em relação aos de faltas simétricas.

Por fim, apresentou-se no Capítulo II um sistema elétrico específico, onde novamente aplicou-se a metodologia analítica para a obtenção dos esforços eletromecânicos no transformador. Nesse caso, fora considerado o nível de curto-círcuito observado no ponto de entrega da Universidade Federal de Uberlândia, tão somente para exemplificar que ao considerar de forma exata o nível de curto-círcuito, os esforços eletromecânicos são inferiores àqueles estimados considerando apenas a impedância do transformador como agente limitador da corrente de curto.

Na presença de todas as características elétrica, geométrica e mecânica de um transformador de 15 kVA, o mesmo foi utilizado nas análises realizadas no Capítulo III. A modelagem em questão foi realizada no FEMM, baseando-se no método dos elementos finitos. Dessa forma, tornou-se possível os estudos cerceados em esforços eletromecânicos nas diversas condições operacionais já mencionadas. O *software* em questão é um programa livre que proporciona as ferramentas necessárias para os estudos pertencentes a este trabalho. Por outro lado, como o mesmo não permite a conexão de circuitos elétricos externos, os valores das correntes elétricas foram obtidos com auxílio do programa ATP e no caso das correntes de *inrush*, de ensaios experimentais.

Nas modelagens realizadas, os enrolamentos do transformador foram modelados como sendo espira por espira e camada por camada. Conforme relatado por Barra, Rosentino e Delaiba (2016), este tipo de modelagem proporciona uma maior exatidão e maiores

possibilidades de análises devido ao maior detalhamento, quando comparadas com modelagens que consideram o enrolamento como um único condutor, ou um único condutor por camada.

Após a caracterização do transformador estudado e da apresentação de alguns detalhes referentes à sua modelagem, apresentou-se a condição em que o equipamento opera em suas condições nominais. Após a exposição das correntes elétricas, o instante de tempo onde a corrente da fase B atinge seu pico foi analisado, mostrando-se, portanto, primeiramente a característica magnética do transformador. Nessa condição, por meio das figuras que apresentam a distribuição de fluxo magnético no interior e ao longo do transformador, nota-se que o fluxo é praticamente confinado no material ferromagnético do núcleo. Outrossim, nota-se que a magnitude da densidade magnética obtida pelas simulações é coerente com a apresentada pelos fabricantes. Pôde-se observar que o fluxo de dispersão existente entre os enrolamentos possui um valor muito reduzido, o que implica em forças eletromecânicas reduzidas.

Em se tratando dos curtos-circuitos trifásicos, o instante de tempo avaliado foi aquele onde observou-se o pico da corrente de curto-circuito assimétrica. Uma nova característica da distribuição de fluxo magnético no interior e ao longo do transformador foi apresentada. Diferentemente da situação anterior, constatou-se que a magnitude do fluxo de dispersão entre os enrolamentos foi superior à densidade existente nas colunas do transformador. No caso específico da fase B, por exemplo, observou-se o valor de 1,1 [T] de fluxo de dispersão, enquanto que a densidade na coluna era aproximadamente nula.

Por meio da extração das forças, pôde-se observar que as maiores forças radiais se encontram no ponto médio dos enrolamentos e que, nos enrolamentos internos as forças radiais são trativas enquanto que nos externos são compressivas. No que tange às forças axiais, constatou-se que seus valores máximos são observados nas extremidades dos enrolamentos, provocando um efeito de compressão axial em ambos enrolamentos.

Da mesma forma que fora feito para os curtos trifásicos, no caso onde o transformador é submetido aos curtos bifásicos, o instante de tempo analisado é aquele em que a corrente elétrica na fase B atinge o valor de pico. Nesta ocasião, pôde-se notar um comportamento no que se refere à distribuição de fluxo magnético no interior ao longo do transformador, um tanto quanto semelhante ao observado no caso dos curtos-circuitos trifásicos. Contudo, este caso apresenta a magnitude do fluxo de dispersão entre enrolamentos ligeiramente inferior ao encontrado anteriormente. Além do mais, a densidade observada nas colunas é ligeiramente superior. Os efeitos de compressão e tração, bem como o comportamento dos máximos valores de força – radial e axial – se mantiveram inalterados.

Nos curtos-circuitos bifásicos que envolvem o terra, percebeu-se, ainda, a existência de um elevado fluxo de dispersão entre os enrolamentos. Contudo, a magnitude deste fluxo de dispersão foi inferior aos eventos apresentados anteriormente. Não obstante, percebeu-se altos valores nas forças e estresses eletromecânicos para a referida situação.

Por último, tratando-se de curtos-circuitos, foi apresentado os desdobramentos do curto-circuito fase-terra. Nesse caso, por meio da distribuição de fluxo no interior e ao longo do transformador, observaram-se os menores valores de fluxo de dispersão entre todos os curtos-circuitos. Todavia, os valores das forças e estresses ainda são consideráveis quando comparados, por exemplo, com as condições operacionais nominais do transformador.

Nas energizações, por meio de ensaios experimentais anteriores, as correntes nas três fases foram obtidas em uma situação desfavorável de chaveamento – momento em que a onda de tensão passa próxima de zero. Dessa forma, o instante de tempo analisado foi o que implicou o maior pico de corrente, observado na fase C do transformador. De forma totalmente diferente às apresentadas até então, no caso das energizações, têm-se uma saturação do núcleo. Percebeu-se, também, a existência de algumas linhas de fluxo de dispersão, contudo, com valores inferiores. No que se refere aos esforços, pôde-se observar um valor bem inferior aos observados nas faltas simétricas e assimétricas. Entretanto, deve-se salientar que em algumas aplicações específicas a ocorrência de energização é frequente. Nessas situações, a severidade não desprezível aliada com a grande ocorrência das energizações, faz com que essas contribuam de forma significativa no acúmulo de dano aos enrolamentos do transformador.

Os resultados obtidos por meio das simulações computacionais no Capítulo III foram apresentados juntamente aos obtidos de maneira analítica em consonância com o Capítulo II. Em se tratando das faltas simétricas e assimétricas, para as forças e esforços radiais, foi verificado uma boa proximidade entre os resultados. Todavia, algumas divergências foram constatadas para as forças axiais na extremidade do enrolamento interno e nas forças axiais compressivas em ambos os enrolamentos, devido a não uniformidade do fluxo de dispersão nas extremidades dos enrolamentos.

Para as energizações, observou-se um distanciamento maior nos resultados apresentados pelas metodologias nas forças radiais. Salienta-se que a metodologia analítica, de certa forma, foi elaborada para curtos-circuitos trifásicos. Nesse sentido, devido à complexidade no comportamento magnético obtida no caso das energizações, as estimativas analíticas podem não apresentar resultados tão exatos. Para essas situações, devido ao fato de a modelagem baseada em elementos finitos considerar características geométrica e magnética do transformador de forma mais fidedigna, acredita-se que esses resultados são mais exatos.

Ainda no Capítulo III, o conceito de distância Euclidiana foi novamente empregado visando atestar que, de fato, a severidade observada nas faltas assimétricas não é tão distante das observadas nas faltas simétricas. Dessa forma, conforme já discutido, a elevada incidência das faltas assimétricas e ocorrência de energizações fazem com que essas possam contribuir tanto quanto, ou até mais, as faltas simétricas ao dano cumulativo nos enrolamentos dos transformadores.

Nesse entremeio, apresentou-se os desdobramentos de um desalinhamento entre enrolamentos externo e interno. Devido à uma mudança na distribuição de fluxo magnético no interior do transformador, notou-se uma diferença comportamental nas forças radiais distribuídas dos enrolamentos. Contudo, não fora vislumbrado mudanças significativas nas forças radiais totais. Não obstante, percebeu-se que para o EI que, maior parte das forças eram negativas (e não nulas, como outrora) e para o EE que maior parte das forças eram positivos (e não nulas, como outrora). Dessa forma, contemplou-se que as faltas simétricas e assimétricas, que a nova configuração de forças dá procedência a uma força resultante, fazendo com que o desalinhamento tenda a aumentar na presença de correntes elevadas.

Em seguida, uma análise no sentido de avaliar os desdobramentos do aterramento por resistência dos transformadores foi exposta. Foi possível observar que ao inserir uma resistência entre o neutro do transformador e o terra, os esforços eletromecânicos para as faltas fase-terra tornam-se, praticamente, desprezíveis. Por conseguinte, atesta-se que em transformadores aterrados por resistência, as faltas fase-terra – mais ocorrentes – pouco contribuirão ao dano cumulativo dos enrolamentos.

Ulteriormente à apresentação de várias análises relacionadas às forças e estresses eletromecânicos, o Capítulo IV voltou-se para a apresentação de um coeficiente de margem de segurança que visa avaliar a confiabilidade de operação de um determinado transformador, sob a ótica da suportabilidade mecânica. À luz dos limites críticos de forças e esforços ocorrentes em transformadores, a formulação desse coeficiente foi apresentada e discutida.

Tendo em vista que a obtenção desse coeficiente de maneira analítica pode ser mais prática e ágil, com os resultados advindos de simulações computacionais obtidos no Capítulo III e com os obtidos de maneira analítica no Capítulo II, os coeficientes foram estimados para variações do fator de impulso, para o transformador de 15 kVA. Pôde-se constatar que apesar de um pouco mais conservador, a extração analítica do coeficiente apresenta resultados semelhantes quando comparados com os obtidos por simulações computacionais – mais exatos.

Por fim, o Capítulo IV apresenta alguns estudos de caso para um transformador trifásico de 5 MVA. O coeficiente de margem de segurança foi estimado para algumas mudanças

sistêmicas – aumentos no nível de curto-circuito por meio do próprio sistema externo, por meio da adição de geradores ou transformadores em paralelo na entrada. Conforme era esperado, foi visto que os incrementos no nível de curto-circuito no ponto de conexão do transformador, fazem com que a margem de segurança seja atenuada.

Nesse contexto, avaliações embasadas no coeficiente de segurança apresentado podem fornecer subsídios para análises na revisão do projeto na fase de aquisição do equipamento, na revisão durante sua vida útil, na contribuição para análises relacionadas à capacidade de hospedagem e até mesmo no monitoramento por meio da proteção.

Por fim, percebeu-se por meio da aplicação da estratégia nos transformadores de 15 kVA e 5 MVA que os valores críticos não aumentam tanto quanto o aumento dos esforços na medida que a potência do transformador se torna maior. Isto é, quanto maior a potência do transformador e, consequentemente, a corrente de curto-circuito, menor será a margem de segurança sob a ótica da suportabilidade mecânica. Nesse contexto, o referido coeficiente apresenta-se também como métrica para a adequação de transformadores de acordo com cada aplicação.

Diante de todo o exposto, acredita-se que o presente trabalho acrescenta informações relevantes à temática ora abordada. Todavia, trabalhos futuros, certamente, serão desenvolvidos visando preencher de forma gradativa as lacunas existentes, tendo em vista a relevância e o vasto campo investigativo. Dentre alguns tópicos relevantes, apresentam-se as seguintes sugestões para aprofundamento:

- Estudos experimentais para avaliar estresses eletromecânicos em transformadores, comparando-se os valores medidos com os obtidos computacionalmente e analiticamente;
- Estudos em transformadores reais e de elevada potência que contenham um histórico ao longo de sua vida útil da quantidade de curtos-circuitos enfrentados;
- Proposição de uma nova metodologia que estime a quantidade de curtos-circuitos simétricos e assimétricos suportáveis por um transformador. Na literatura, encontra-se poucas metodologias, que até então levam em conta apenas os curtos trifásicos, mas que, todavia, não oferecem valores próximos;
- Estudos em transformadores de mesma potência, mas com características geométrica e mecânica diferentes – diferentes fabricantes;
- Correlacionar o coeficiente de margem de segurança, de alguma maneira, com um fator multiplicativo da vida útil dos transformadores (atrelada com outros estresses, como exemplo os térmicos e dielétricos);

- Estudos em autotransformadores, transformadores de três enrolamentos e em bancos monofásicos;
- Análises de predição de forças e estresses eletromecânicos por meio das distâncias Euclidianas obtidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB, **Transformer Handbook**. Geneva: Copyright IEC, ABB, 2004.

ADLY, A. A. Computation of Inrush Current Forces on Transformer Windings. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 37, n. 4, p. 2855-2857, 2001.

APOLÔNIO, R. **Modelagem e Chaveamento Controlado de Transformadores: Análise Computacional e Validação Experimental**. 2004. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.

AGUIAR, E. R. **Análise de Resposta em Frequência Aplicada em Transformadores de Potência**. 2007. 96 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

ARAUJO, J. F.; COSTA, E. G.; ANDRADE, F. L. M.; GERMANDO, A. D.; FERREIRA, T. V. Methodology to Evaluate the Electromechanical Effects of Electromagnetic Forces on Conductive Materials in Transformer Windings Using the Von Mises and Fatigue Criteria. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31, n. 5, p. 2206-2214, 2016.

AZEVEDO, A. C. **Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado por Curtos-Circuitos “Passantes” e Correntes de Energização**. 2007. 159 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

BARRA, P. H. A.; ROSENTINO, A. J. J. P.; DELAIBA, A. C. Análises dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Devido a Assimetria dos Enrolamentos, Utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). In: **VIII WORKSPOT – WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA, EQUIPAMENTOS, SUBESTAÇÕES E MATERIAIS**, Recife, 2016.

_____. Estudo Comparativo de Modelagens de Enrolamentos de um Transformador Utilizando o Método dos Elementos Finitos Para Análises de Esforços Eletromecânicos. In: **XIV CEEL – CONFERÊNCIA DE ESTUDOS EM ENGENHARIA ELÉTRICA**, Uberlândia, 2016.

BASTOS, J. P. A.; SADOWSKI, N. **Electromagnetic by Modeling by Finite Element Methods**. Florianópolis: Marcel Dekker, 2003.

- BECHARA, R. **Análise de falhas em transformadores de potência.** 2010. 102 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- BENETI, D. **Estudo de Viabilidade Para a Aplicação de Sensores Distribuídos de Deformação a Fibra Óptica em Transformadores de Potência.** 2016. 172 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Institutos Lactec), Curitiba, 2016.
- BERNARDI, G. A. F. **Aterramento de Neutro em Subestações Industriais e suas Implicações no Sistema de Proteção.** 2015. 217 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, 2015.
- BJERKAN, E. **High Frequency Modeling of Power Transformers.** 2005. 244 f. Thesis (Doctor) – Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2005.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Mechanical Engineering Design.** 10th ed. New York: McGraw-Hill, 2010.
- CARDOSO, F. L.; SILVA, L. C. P. Redução do Nível de Curto em Sistemas de Subtransmissão Utilizando Reatores com Núcleo de Ar. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, Belo Horizonte, 2014.
- CARDOSO, J. R. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos.** Publicação Independente, Primeira Edição, São Paulo, 1995.
- CHESF; UFU. **Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado pelas Altas Correntes de Energização (“Inrush”) e de Curtos-Circuitos “Passantes”.** Relatório Final de P&D, 2008.
- CIGRE, Group du Travail 12.05. **Enquête Internationale sur les Défaillances en Service des Transformateurs de Grande Puissance.** ELECTRA, nº 88, 1983.
- CIGRE, Working Group 12.19. **The Short Circuit Performance of Power Transformers.** Brochure 209, CIGRE, 2002.
- CIGRE, Working Group A2.26. **Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA).** Brochure 342, CIGRE, 2008.
- COPEL DISTRIBUIÇÃO. **Manual de Instruções Técnicas – Aterramento de Redes de Distribuição.** v. 2.0, 2013.
- CPFL. **NTD 010.002 - Aterramento de Rede de Distribuição.** v. A, 2008.
- CONRAD, L.; LITTLE, K.; GRIGG, C. Predicting and preventing problems associated with remote fault-clearing voltage dips. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 27, n.1, p. 167-172, 1991.
- COSTA, S.; COX, R. Advantages of comprehensive Monitoring for critical power transformers. In: VIII WORKSPOT – WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA, EQUIPAMENTOS, SUBESTAÇÕES E MATERIAIS, Recife, 2016.

- DEL VECCHIO, R. M.; POULIN, B.; FEGHALI, P. T.; SHAH, D. M.; AHUJA, R. **Transformer Design Principles: With Applications to Core-Form Power Transformers.** 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- DELAIBA, A. C. **Análises dos Efeitos Térmicos e Dinâmicos Provocados pela Corrente de Curto-Círcuito.** Apostila de Subestações, Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- DOBLE. “The Life of a Transformer”. Seminar and Industry Expo. Florida, February 19-25, 2006.
- EREMIA, M.; SHAHIDEHPOUR, M. **Handbook Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability and Control.** USA: John Wiley – IEEE Press, 2013.
- FAIZ, J.; EBRAHIMI, B. M.; NOORI, T. Three- and Two-Dimensional Finite-Element Computation of Inrush Current and Short-Circuit Electromagnetic Forces on Windings of a Three-Phase Core-Type Power Transformer. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 44, n. 5, p. 590-597, 2008.
- FERRAZ, G. M. F. **Proposta de um Modelo de Circuito Equivalente para Representação em Banda Larga de Transformadores de Distribuição.** 2015. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.
- FESER, K.; et al. The Transfer Function Method for Detection of Winding Displacements on Power Transformers after Transport, Short Circuit of 30 Years of Service, CIGRE, 2000.
- FORTESCUE, C. L. Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks. In: ANNUAL CONVENTION OF THE AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS, Atlantic City, 1918.
- GCOI, CDE – Comissão de Desempenho de Equipamentos e Instalação. **Relatório Técnico: Análise Estatística de Desempenho de Transformadores.** 1996.
- GREENWOOD, A. **Electrical Transients in Power Systems.** [S.l.]: Jhon Wiley and Sons, 1991.
- GRIGOLETTO, F. A. **Análise comparativa entre as metodologias ANSI e IEC para o cálculo do curto-círcuito em sistemas industriais.** 2013. 245 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.
- GUASCH, L.; CÓRCOLES, F.; PEDRA, J. Effects of Symmetrical and Unsymmetrical Voltage Sags on Induction Machines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, n. 2, p. 774-782, 2004.
- GUIMARÃES, R. **Suportabilidade Mecânica e Vida Útil de Transformadores Submetidos a Correntes de Energização e de Curto-Circuitos.** 2013. 167 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

GUIMARÃES, R.; DELAIBA, A. C.; OLIVEIRA, J. C.; SARAIVA, E.; ROSENTINO, A. J. J. P. Electromechanical Forces in Transformers Caused by Inrush Currents: An Analytical, Numerical and Experimental Approach. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 24, n. 6, p. 863-872, 2013.

GUIMARÃES, R.; ROSENTINO, A. J. J. P.; BOSSA, V. F.; DELAIBA, A. C. Suportabilidade Mecânica e Redução de Vida Útil de Transformadores Causado Pela Corrente de Curto-Círculo. In: VII WORKSPOT – WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA, EQUIPAMENTOS, SUBESTAÇÕES E MATERIAIS, Rio de Janeiro, 2014.

HAYT Jr., W. H.; BUCK, J. A. **Engineering Electromagnetics**. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

HEATHCOTE, M. **The J & P Transformer Book**. 13th ed. Great Britain: Elsevier Ltd., 2007.

HYUN-MO, A.; LEE, J.; KIM, J.; OH, Y.; JUNG, S.; HAHN, S. Finite-Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force in Power Transformer. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 47, n. 3, p. 1267-1272, 2011.

HYUN-MO, A.; OH, Y. H.; KIM, J. K.; SONG, J. S.; HAHN, S. C. Experimental Verification and Finite Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force for Dry-Type Transformer. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 48, n. 2, p. 819-822, 2012.

IEC 60076. **Ability to withstand short circuit**. 2nd ed. Part 5, 2000.

IEC 60909. **Short-Circuit Currents in Three-phase A.C. Systems**. 1st ed. Part 0-4, 2001.

IEEE Std 551. **Recommended Practice for Calculating AC Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems**. IEEE Violet Book Std. 551, 2006.

KINDERMANN, G. **Curto-Círcito**. 2a ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.

KLADAS, A. G.; PAPADOPOULOS, M. P.; TEGOPOULOS, J. A. Leakage Flux and Force Calculation on Power Transformer Windings under Short-circuit: 2D and 3D Models based on the Theory of Images and the Finite Element Method Compared to Measurements. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 30, n. 5, p. 3487-3490, 1994.

KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer Engineering: Design and Practice**. USA: Marcel Dekker, Inc., 2004.

KUMBHAR, G. B.; KULKARNI, S. V. Analysis of Short-Circuit Performance of Split-Winding Transformer Using Coupled Field-Circuit Approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 2, p. 926-943, 2007.

LAPWORTH, J. A. Transformer Reliability Surveys. **Journal Electra**, Cigré, n. 227, p. 10-14, 2006.

LING, P. C. Y.; BASAK, A. Investigation of magnetizing inrush current in a single-phase transformer. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 24, n. 6, p. 3217-3222, 1988.

- MACHRY, T. R. **Dirigíveis: Uma Alternativa Para o Transporte de Cargas Especiais.** 2005. 77 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- MCNUTT, W. J.; JHONSON, W. M.; NELSON, R. A.; AYERS, R. E. Power Transformer Short-circuit Strength – Requirements, Design and Demonstration. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 89, n. 6, p. 1955-1969, 1970.
- MEEKER, D. **Finite Element Method Magnetics**, v. 4.2, User's Manual, 2015.
- MINHAS, M. S. A. **Dynamic Behavior of Transformer Winding under Short-Circuits.** 2007. 142 f. Thesis (Doctor) – University of Witwatersrand, Johannesburg, 2007.
- NAJDENKOSKI, K.; MANOV, D. Electromagnetic forces calculation on power transformer windings under short circuit. **The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**, v. 17, 1998.
- NEVES, W.; FERNANDES, D.; BALTAR, F. J. A.; ROSENTINO, A. J. J. P.; SARAIVA, E.; DELAIBA, A. C.; GUIMARÃES, R.; LYNCE, M.; OLIVEIRA, J. C. A Comparative investigation of electromechanical stresses on transformers caused by inrush and short-circuit currents. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL POWER QUALITY**, Lisbon, 2011.
- PATEL, M. R. Instability of the Continuously Transposed Cable Under Axial Short-Circuit Forces in Transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 17, n. 1, p. 149-154, 2002.
- PIMENTA, E. C. C. **Efeitos de Afundamentos de Tensão no Processo de Laminação Industrial.** 2010. 80 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- ROSENTINO, A. J. J. P. **Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-Círcuito Trifásico.** 2010. 173 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.
- ROSENTINO, A. J. J. P.; DELAIBA, A. C., PRÉVOST, J. L. A Proposal of a qualitative index for mechanical withstand safety margin analysis of transformers. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 27, n. 6, p. 1-12, 2017.
- SALON, S.; LAMATTINA, B.; SIVASUBRAMANIAM, K. Comparison of assumptions in computation of short circuit forces in transformers. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 36, n. 5, p. 3521-3521, 2000.
- SARAIVA, E. **Modelagem de Transformadores de Três Colunas com Base na Distribuição de Fluxos Magnéticos no Núcleo, Considerando o Efeito do Ciclo de Histerese.** 2004. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.
- SARAIVA, E. **Um estudo das alterações dos parâmetros de transformadores oriundas de deformações nos enrolamentos: uma contribuição para o diagnóstico de vida útil.** 2011. 203 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.
- SILVA, L. C. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica em um Campus Universitário.** 2014. 252 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

SOUZA, R. M. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor.** Apostila de Elementos Finitos, Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará, 2003.

SOUZA, D. C. P. **Falhas e Defeitos Ocorridos em Transformadores de Potência do Sistema Elétrico da CELG, nos Últimos 28 Anos: Um Estudo de Caso.** 2008. 101 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Goiás, Goiânia, 2008.

STEURER, M.; FRÖHLICH, K. The Impact of Inrush Currents on the Mechanical Stress of High Voltage Power Transformers Coils. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 17, n. 1, p. 155-160, 2002.

STRAC, L.; KELEMEN, F.; ZARKO, D. Analysis of Short-Circuit Forces at the Top of the Low Voltage U-Type and I-Type Winding in a Power Transformer. In: 13TH INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS AND MOTION CONTROL CONFERENCE, Poznan, 2008.

UQAILI, M. A.; SAHITO, A. A.; HALEPOTO, I. A.; MEMON, Z. A.; DARS, S. B. Impact of distributed generation on network short-circuit level. In: 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS COMMUNICATIONS, VEHICULAR TECHNOLOGY, INFORMATION THEORY AND AEROSPACE & ELECTRONIC SYSTEMS (VITAE), Aalborg, 2014.

WANG, S.; ZHANG, H. J.; WANG, S.; LI, H., YUAN, D. Cumulative Deformation Analysis for Transformer Winding Under Short-Circuit Fault Using Magnetic-Structural Coupling Model. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 26, n. 7, 2016.

WATERS, M. **The short circuit strength of power transformers.** London: Macdonald and Co., 1966.

YANG, B.; WANG, S. H.; HUANGFU, Y. P.; WANG, G. L.; ZHANG, H. J. Dynamic deformation analysis of power transformer windings by considering the effect of elasticity characteristics of kraft paper. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY AND ELECTROMAGNETIC DEVICES, Beijing, 2013.