

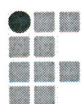
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RODOLFO MOISÉS RODRIGUES BISNETO

**ANÁLISE DE ESFORÇOS ELETROMAGNÉTICOS EM
TRANSFORMADOR SUBMETIDO A UM CURTO-CIRCUITO
TRIFÁSICO**

Itumbiara

2019



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: **RODOLFO MOISÉS RODRIGUES BISNETO.**

Matrícula: **20141040070150.**

Título do Trabalho: **ANÁLISE DE ESFORÇOS ELETROMAGNÉTICOS EM TRANSFORMADOR SUBMETIDO A UM CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO.**

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: ____/____/____

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Kumbraia, 09/08/2019.
Local Data

Rodolfo Moisés Rodrigues Bisneto

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



RODOLFO MOISÉS RODRIGUES BISNETO

**ANÁLISE DE ESFORÇOS ELETROMAGNÉTICOS EM
TRANSFORMADOR SUBMETIDO A UM CURTO-CIRCUITO
TRIFÁSICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara.

Prof. Dr. Cláudio Roberto Pacheco, (IFG) –
Orientador

Prof. Dr. Roberlam Gonçalves de Mendonça, (IFG)

Prof. Ms. Wellington do Prado, (IFG)

Itumbiara

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

R696a

Rodrigues Bisneto, Rodolfo Moisés

Análise de esforços eletromagnéticos em transformador submetido a um curto-circuito trifásico. / Rodolfo Moisés Rodrigues Bisneto. -- 2019.

73 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Roberto Pacheco

1. Transformadores. 2. Eletromagnetismo. 3. Curtos-circuitos. I. Título.
II. Pacheco, Cláudio Roberto.

CDD: 621.314

Bibliotecário: Eduardo Pereira Resende CRB/1-3266



INSTITUTO FEDERAL
GOIÁS
Campus Itumbiara

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS
COORDENAÇÃO DE CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TERMO DE APROVAÇÃO

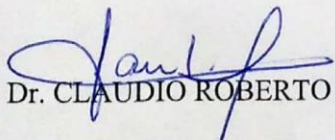
TÍTULO: ANÁLISE DE ESFORÇOS ELETROMAGNÉTICOS EM TRANSFORMADOR SUBMETIDO A UM CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO.

AUTOR: RODOLFO MOISÉS RODRIGUES BISNETO.

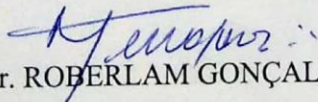
ORIENTADOR: Prof. Dr. CLAUDIO ROBERTO PACHECO.

Aprovado como parte das exigências para obtenção do diploma de Engenheiro Eletricista, do Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

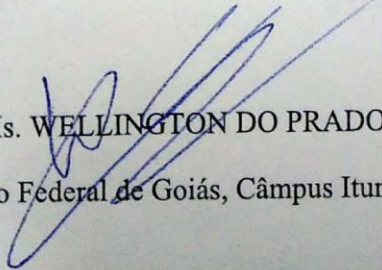
Itumbiara, 06 de agosto de 2019.


Prof. Dr. CLAUDIO ROBERTO PACHECO.

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.


Prof. Dr. ROBERLAM GONÇALVES DE MENDONÇA.

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.


Prof. Ms. WELLINGTON DO PRADO.

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Célia Maria e Simário Santana, e às minhas irmãs Sara Moraes e Amanda Moraes, meus maiores incentivadores que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus que permitiu que tudo isso acontecesse ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitário, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Aos meus pais, Simário Santana Nunes e Célia Maria Moraes Nunes e irmãs, Amanda Moraes Nunes e Sara Moraes Nunes, pelo incentivo e força em todos os momentos. Sempre servirão como um guia à minha trajetória pessoal e profissional.

Aos meus familiares, em especial o meu avô, Selmiro Sebastião e as minhas avós, Maria das Dores e Silvia Rosa, pelas lembranças, e por serem meus maiores exemplos de luta e determinação nessa vida.

Aos meus amigos, agradeço por todo amor, força, incentivo e apoio incondicional. Vocês foram fundamentais para minha formação, por isso merecem o meu eterno agradecimento.

A todos os professores que contribuíram com a minha trajetória acadêmica, especialmente ao Cláudio Roberto Pacheco, responsável pela orientação do meu projeto. Obrigado por exigir de mim muito mais do que eu imaginava ser capaz de fazer. Manifesto aqui minha gratidão eterna por compartilhar sua sabedoria, o seu tempo e sua experiência.

“Tenha em mente que tudo que você aprende na escola é trabalho de muitas gerações. Receba essa herança, honre-a, acrescente a ela e, um dia, fielmente, deposite-a nas mãos de seus filhos”

— Albert Einstein

RESUMO

Transformadores são equipamentos essenciais aos sistemas elétricos, quando eles danificam ou apresentam algum tipo de falha o seu reparo ou até mesmo a sua substituição demanda altos custos financeiros. Muitas falhas deste equipamento ocorrem pela redução da resistência da isolação dos enrolamentos, que pode ser causado pelas vibrações produzidas pelas forças eletromecânicas durante sua operação normal, ou seja, em regime permanente, pelos fenômenos eletroquímicos do líquido de resfriamento e também pelas deformações dos enrolamentos causadas pelas altas correntes de curto-circuito. A atuação dos sistemas de proteção, não impede que os transformadores sejam submetidos aos indesejáveis efeitos transitórios. No entanto, espera-se que um transformador suporte um determinado número de curtos-circuitos durante seu tempo de operação. Neste contexto, torna-se importante o emprego de metodologias e técnicas para tentar entender e avaliar os esforços eletromecânicos nos transformadores. Nessa perspectiva, o presente trabalho tem por objetivo investigar os tipos de falhas que podem ocorrer nos enrolamentos do transformador em decorrência das forças radiais e axiais. Em seguida, apresenta-se uma metodologia analítica para calcular as forças e estresses nos enrolamentos de um transformador trifásico submetido a um curto-circuito trifásico assimétrico. Por fim, o transformador será modelado no *Finite Element Method Magnetics* (FEMM) baseado na técnica de elementos finitos com o intuito de comparar com os valores obtidos analiticamente.

Palavras-chave: Transformadores, Forças Eletromagnéticas, Forças Axiais, Forças Radiais, Corrente de Curto-Circuito.

ABSTRACT

Transformers are essential equipment for electrical systems, when they are damaged or have some kind of failure their repair or even their replacement demands high financial costs. Many failures of this equipment occur due to the reduction of the insulation resistance of the windings, which can be caused by the vibrations produced by the electromechanical forces during its normal operation, that is, in permanent regime, by the electrochemical phenomena of the cooling liquid and also by the deformations of the windings caused by the high short-circuit currents. The action of protection systems, whose response time, as a rule, does not prevent transformers from being subjected to undesirable transient effects. However, a transformer is expected to support a certain number of short circuits during its operating time. In this context, it is important to use methodologies and techniques to try to understand and evaluate the electromechanical forces in transformers. In this perspective, the present work aims to investigate the types of failures that can occur in transformer windings as a result of radial and axial forces. Next, an analytical methodology is presented to calculate the forces and stresses in the windings of a three-phase transformer subjected to an asymmetric three-phase short circuit. Finally, the transformer will be modeled in the Finite Element Method Magnetics (FEMM) based on the finite element technique in order to compare it with the values obtained analytically.

Keywords: Transformers, Electromagnetic Forces, Axial Forces, Radial Forces, Short Circuit Current.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transformador danificado após ocorrência de uma falha.	19
Figura 2 – Porcentagem de falhas dos transformadores em SE's convencionais em relação ao componente afetado e a origem da falha.	21
Figura 3 – Porcentagem de falhas dos transformadores em SE's de usina em relação ao componente afetado e a origem da falha.	21
Figura 4 – Fluxograma de falha do enrolamento.	22
Figura 5 – Curva da “banheira”.	23
Figura 6 – Processo de envelhecimento e redução da suportabilidade do transformador.	24
Figura 7 – Tipos de faltas e sentido das correntes em sistemas trifásicos. a) curto-circuito trifásico; b) curto-circuito bifásico; c) curto-circuito bifásico à terra; d) curto-circuito monofásico à terra.....	28
Figura 8 – Fator de impulso em função da relação R/X.	30
Figura 9 – Forma de onda da corrente de curto-circuito trifásico de uma falta totalmente assimétrica.....	31
Figura 10 – Forma de onda da força eletromagnética em função do tempo durante uma falta totalmente assimétrica.	32
Figura 11 – Campo de dispersão e decomposição das forças eletromagnéticas.	33
Figura 12 – Ação das forças eletromagnéticas radiais no enrolamento interno e externo do transformador.	35
Figura 13 – Deformação devido às forças compressivas: (a) Ilustração dos espaçadores e outros componentes do transformador e (b) Deformação forçada (forced buckling) no enrolamento interno.	36
Figura 14 – Deformação forçada (forced buckling) no enrolamento de um transformador.	36
Figura 15 – Deformação livre (free buckling) no enrolamento interno.	37
Figura 16 – Deformação livre (free buckling) no enrolamento de um transformador.	37
Figura 17 – Deformação axial em um enrolamento do transformador.	38
Figura 18 – Colapso axial correspondente a uma força axial excessiva causada por um curto-circuito em um transformador.	38
Figura 19 – Inclinação dos condutores entre espaçadores radiais (bending).	39
Figura 20 – Problema de inclinação dos condutores entre espaçadores (bending) em um transformador.	40
Figura 21 – Deformação defeito as forças axiais: (a) Condutores na posição normal e (b) Tombamento dos condutores devido às forças axiais (tilting).	40
Figura 22 – Problema de tombamento (tilting) em um transformador.	41
Figura 23 – Curvas de uma compressão axial para enrolamentos considerados perfeitos.	44
Figura 24 – Forma de onda das correntes em condição normal de operação.	47
Figura 25 – Forma de onda das correntes para um curto-circuito trifásico.	48
Figura 26 – Estresse de tração radial no enrolamento externo do transformador comparado com o valor de estresse máximo suportável.	50
Figura 27 – Interface gráfica do programa FEMM.	53
Figura 28 – Transformador trifásico de 15 KVA utilizado na simulação.	54

Figura 29 – Vista superior de corte do transformador trifásico (dimensões em milímetros).	54
Figura 30 – Vista de corte do transformador trifásico: (a) frontal e (b) lateral (dimensões em milímetros).	55
Figura 31 – Vista frontal de corte do transformador trifásico considerando os enrolamentos (dimensões em milímetros).	55
Figura 32 – Curva de caracterização da magnetização da chapa de aço silício do transformador trifásico.	56
Figura 33 – Geometria do transformador trifásico implementado no FEMM.	59
Figura 34 – Definição dos materiais do transformador no FEMM (a) ACOSILICIO e (b) AR.	60
Figura 35 – Curva de magnetização da chapa de aço silício do transformador trifásico gerado no FEMM.	60
Figura 36 – Caracterização da camada externa relacionada ao enrolamento interno da fase B.	61
Figura 37 – Malha de elementos finitos do transformador trifásico de 15 KVA geradas no FEMM.	62
Figura 38 – Distribuição da densidade de fluxo magnético para condição normal de operação.	63
Figura 39 – Densidade de fluxo nas colunas do transformador e nas regiões entre os enrolamentos de cada fase para a condição normal de operação.	64
Figura 40 – Distribuição da densidade de fluxo magnético para condição de curto-circuito trifásico.	65
Figura 41 – Densidade de fluxo nas colunas do transformador e nas regiões entre os enrolamentos de cada fase para a condição de curto-circuito trifásico.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Causas típicas de falhas em transformadores.	20
Tabela 2 – Custos de Falhas.	23
Tabela 3 – Definição da classificação das condições de operação de um transformador.	25
Tabela 4 – Valores para o fator de impulso e fator resultante em função da relação R/X.	30
Tabela 5 – Características elétrica, magnética e geométrica do transformador de 15 KVA.	46
Tabela 6 – Valores instantâneos das correntes para condição normal de operação.	47
Tabela 7 – Valores instantâneos das correntes para um curto-circuito trifásico.	48
Tabela 8 – Resultado das forças radiais para condição normal de operação (I_n) e curto-circuito trifásico ($I_{3\phi s}$).	48
Tabela 9 – Resultado dos estresses ocasionados pelas forças radiais para condição normal de operação (I_n) e curto-circuito trifásico ($I_{3\phi s}$).	49
Tabela 10 – Resultado dos esforços ocasionados pelas forças axiais para condição normal de operação (I_n) e curto-circuito trifásico ($I_{3\phi s}$).	49
Tabela 11 – Pontos representativos da curva B-H da Figura 4.6.	57
Tabela 12 – Valores das relutâncias e das espessuras do entreferro do transformador trifásico.	58
Tabela 13 – Forças radiais totais impostas nos enrolamentos interno e externo para condição normal de operação.	64
Tabela 14 – Forças radiais distribuídas impostas nos enrolamentos interno e externo para condição de curto-circuito trifásico.	67
Tabela 15 – Forças radiais totais impostas nos enrolamentos interno e externo para condição de curto-circuito trifásico.	67
Tabela 16 – Estresses radiais médios nos enrolamentos interno e externo para condição de curto-circuito trifásico.	67
Tabela 17 – Força axial nas extremidades dos enrolamentos interno e externo para condição de curto-circuito trifásico.	68
Tabela 18 – Força axial compressiva total nos enrolamentos interno e externo para condição de curto-circuito trifásico.	68

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.2 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2 ORIGEM DAS FALHAS EM TRANSFORMADORES.....	19
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	19
2.2 ANÁLISE DE FALHAS EM TRANSFORMADORES	20
2.3 CURTO CIRCUITO	26
2.4 FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS EM TRANSFORMADORES	32
2.5 FALHAS ELETROMECAÂNICAS EM TRANSFORMADORES	34
2.5.1 Falhas devido às forças radiais.....	34
2.5.2 Falhas devido às forças axiais.....	38
3 METODOLOGIA ANALÍTICA PARA CÁLCULO DAS FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS EM ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADOR.....	42
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	42
3.2 METODOLOGIA ANALÍTICA PARA CÁLCULO DAS FORÇAS RADIAIS EM ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS	42
3.3 METODOLOGIA ANALÍTICA PARA CÁLCULO DAS FORÇAS AXIAIS EM ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS	43
3.4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA ANALÍTICA EM UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 15 KVA.....	45
3.4.1 Cálculo das forças e estresses radiais	48
3.4.2 Cálculo das forças axiais.....	49
3.4.3 Análise dos resultados.....	49
4 REPRESENTAÇÃO DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO NO FEMM (<i>FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS</i>)	51
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	51

4.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	51
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 15 KVA ..	53
4.4 MODELAGEM DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 15 KVA NO FEMM	57
4.4.1 Simulação do transformador trifásico de 15 kVA sob condição normal de operação.....	62
4.4.2 Simulação do transformador trifásico de 15 kVA sob curto-circuito trifásico	65
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Transformadores de potência são equipamentos essenciais aos sistemas elétricos, são os responsáveis pela interconexão da rede em diferentes níveis de tensão e constituem-se em um dos componentes de maior custo. Além do alto capital de investimento, quando são danificados ou apresentam defeitos, conseqüentemente 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 conseqüências 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 dificulta sua reposição (KULKARNI, 2004).

É perceptível a dificuldade da perda inesperada de um transformador de potência, seja pelos custos envolvidos ou pela complexidade da logística envolvida em sua reposição. Em conseqüência disso, há uma grande preocupação com esses equipamentos com relação aos fenômenos elétricos causadores de falhas.

Sabe-se que transformadores estão ininterruptamente expostos a fatores ambientais, como ambientes úmidos, corrosivos, intempéries, além de estresses térmicos associados as sobrecargas e correntes de curto-circuito. Eles também estão submetidos aos estresses dielétricos, os quais estão ligados com sobretensões. Por isso, devem ser projetados para suportar as premissas impostas pelo sistema elétrico e pelo meio externo em que estão instalados.

Quando ocorre falha do sistema isolante, a principal razão é a redução ou mudança do seu comportamento dielétrico. Contudo, as propriedades mecânicas são também relevantes, pois uma avariada de origem mecânica pode causar uma redução ou até mesmo a quebra do material isolante.

As degradações de algumas propriedades do sistema isolante são resultado de ação individual e/ou conjunta dos seguintes fatores:

- Calor;
- Umidade;
- Acidez;
- Redução da suportabilidade dielétrica;
- Contaminação;
- Esforço mecânico aplicado devido a corrente no enrolamento;
- Vibrações e outros;

A alteração dos materiais isolantes normalmente está associada com as reações químicas, as quais são aceleradas por qualquer aumento de temperatura admissível.

Os papéis isolantes são afetados pela deterioração de suas propriedades mecânicas devido as forças eletromagnéticas, tais como: correntes de *inrush*, curto-circuito ou vibrações.

A contaminação é outro fator importante na degradação, visto que partículas metálicas presentes no óleo também podem afetar consideravelmente o sistema isolante.

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

Assim, compreende-se que possui várias relações possíveis para entender, descrever e justificar as muitas possibilidades de falha de um sistema isolante.

Dentro deste cenário, destaca-se que uma das maiores razões de falhas internas destes equipamentos, é a redução da suportabilidade da isolação dos seus enrolamentos causado pelos fenômenos eletroquímicos do líquido de resfriamento, pelas vibrações produzidas pelas forças eletromecânicas durante a sua operação normal e pelas altas correntes de curto-circuito.

Destaca-se que a proteção de transformadores, por meio de relés com funções de sobrecorrente 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 ameniza os riscos de falhas decorrentes de esforços eletromecânicos (BARRA, 2017).

Nessa circunstância, é esperado que o transformador de potência seja capaz de suportar, durante a vida útil, um número significativo de ocorrências que provoquem correntes elevadas em seus enrolamentos, ou seja, energizações, curtos-circuitos trifásicos, dentre outros.

Mas, é certo que a suportabilidade mecânica decresça progressivamente a cada nova ocorrência, fazendo com que a capacidade de suportar novos esforços eletromecânicos seja reduzida.

Apesar deste assunto ser uma preocupação dos projetistas e fabricantes de transformador, assim como dos profissionais de manutenção e operação das empresas de energia elétrica, existe uma certa carência de metodologias e ferramentas robustas para se avaliar os efeitos dos esforços mecânicos oriundos das elevadas correntes transitórias sobre esses equipamentos.

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo estudar, analisar e simular forças eletromagnéticas nos enrolamentos do transformador, quando submetido a curto-circuito. Destaca-se que a ocorrência de curto-circuito fase-terra é a mais comum em redes elétricas secundárias. Entretanto, este trabalho fará uma abordagem apenas nos curtos-circuitos trifásico, por apresentarem maior magnitude comparado com os outros tipos de curtos-circuitos.

Inicialmente, será apresentado uma metodologia analítica que estima as forças eletromagnéticas em transformadores, quando os mesmos são submetidos as sobrecorrentes. Os resultados obtidos pelas equações desenvolvidas para os cálculos analíticos serão confrontados com os dados obtidos em simulações computacionais.

O programa computacional escolhido para realizar as simulações do modelo elétrico conforme a técnica de elementos finitos será o FEMM (*Finite Element Method Magnetics*). O FEEM é um programa livre que possui um completo conjunto de ferramentas que permite analisar problemas estáticos e assimétricos. É um programa útil, porque trabalha internamente com complicadas equações diferenciais que precisam ser resolvidas quando se inter-relaciona distintas áreas do conhecimento científico.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para atingir os objetivos propostos, além deste capítulo introdutório, o trabalho está organizado na seguinte estrutura:

- Capítulo 1 - Introdução.
- Capítulo 2 – Origem das Falhas em Transformadores.
- Capítulo 3 – Metodologia Analítica para Cálculo das Forças Eletromagnéticas em Enrolamentos de Transformador.

- Capítulo 4 – Representação do Transformador Trifásico no FEMM (*Finite Element Method Magnetics*).
- Capítulo 5 - Considerações Finais e Sugestões para Trabalhos Futuros
- Referências Bibliográficas

O capítulo 2 apresenta inicialmente, de forma bem resumida, a análise de algumas falhas, que os transformadores são comumente submetidos. Em seguida é apresentado as principais características das correntes de curto-circuito, visto que são uma das principais causadoras das falhas mecânicas. Por último é apresentado os tipos de forças eletromagnéticas que surge decorrente das elevadas correntes de curto-circuito, com destaque para os respectivos tipos de falhas passíveis de ocorrência nos enrolamentos concêntricos para cada modalidade de força.

O capítulo 3 apresenta uma definição teórica das componentes de forças eletromagnéticas que se estabelecem nos enrolamentos dos transformadores. As densidades de fluxo magnético de dispersão são analisadas detalhadamente, pois trata-se de um parâmetro que afeta diretamente a magnitude das forças. Em seguida é apresentado uma metodologia analítica para o cálculo das forças eletromagnéticas radiais e axiais, utilizando métodos tradicionais e existentes na literatura sobre o assunto. Por último é aplicado a metodologia analítica, em um transformador trifásico de 15 KVA, com a intenção de confrontar os esforços dos eventos sob análise.

O capítulo 4 apresenta inicialmente o MEF, uma das alternativas disponíveis para a simulação de dispositivos eletromagnéticos, destacam-se as aplicabilidades e as facilidades do método. Em seguida é apresentado o programa FEMM, o qual se baseia nas técnicas de elementos finitos. Por último modela-se o transformador de 15 KVA com o intuito de obter os resultados das forças axiais e radiais dos eventos sob análise.

O capítulo 5 apresenta as principais contribuições do presente trabalho e as considerações finais. Além disso, destacam-se algumas sugestões para projetos futuros.

2 ORIGEM DAS FALHAS EM TRANSFORMADORES

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Atualmente, transformadores operam em sistemas elétricos com topologia em malha, e em geral, interligados. A potência nominal destes equipamentos vão da ordem de algumas dezenas/centenas de KVA até potências em unidades/dezenas de MVA. Em geral, os transformadores de potência são bastante confiáveis, tendo uma vida útil em torno de 20 a 35 anos, podendo chegar até os 60 anos quando se tem uma boa manutenção (WANG, et.al. 2002).

As falhas que acontecem nos transformadores são bem conhecidas e podem trazer danos bem graves, tais como: perigo a equipe de manutenção quando, ocorre explosão; danos ao meio ambiente, quando há vazamento de óleo; custos de reparo ou substituição; entre outros.

A ocorrência de descargas elétricas, manobras e curtos-circuitos são alguns dos fenômenos que podem levar o transformador a uma falha. O equipamento logo depois que é fabricado apresenta uma boa suportabilidade térmica, dielétrica, química e mecânica. Entretanto, com o tempo, sua isolação pode danificar ao ponto em que não seja mais capaz de suportar, por exemplo, uma corrente de curto-circuito (WANG, et. al. 2002).

Embora os sistemas de proteção sejam eficientes, à sua velocidade de atuação não impede que os equipamentos sejam submetidos aos indesejáveis efeitos transitórios, aumentando assim os riscos de falhas em decorrência de esforços eletromagnéticos.

A fim de ilustrar as consequências que podem ocorrer no equipamento a Figura 1 apresenta um transformador danificado após ser submetido a algum tipo de falha.

Mediante o exposto, este capítulo tem como objetivo realizar uma abordagem das principais características das falhas que surgem nos transformadores.

Figura 1 – Transformador danificado após ocorrência de uma falha.



Fonte: ROSENTINO, 2010.

2.2 ANÁLISE DE FALHAS EM TRANSFORMADORES

As falhas em transformadores são consequências de diferentes causas e condições tanto de operação como de instalação. Elas podem ser classificadas como sendo de origens térmicas, mecânicas e elétricas. A Tabela 1 relaciona as causas típicas de falhas em transformadores, utilizando como forma de classificação a sua natureza, isto é, se devida as causas internas ou externas ao equipamento (AZEVEDO, 2007).

Tabela 1 – Causas típicas de falhas em transformadores.

Interna	Externa
Deterioração do Sistema Isolante	Descargas Atmosféricas
Sobreaquecimento	Sobrecarga
Umidade	Curto-circuito
Contaminação do Óleo Isolante	Chaveamento
Descargas Parciais	
Defeitos de Projeto e Fabricação	
Ressonância dos Enrolamentos	

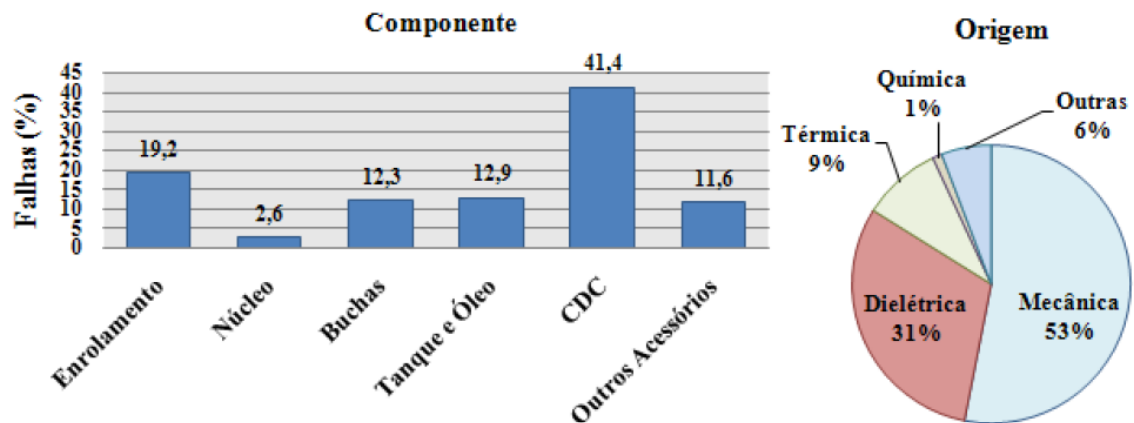
Fonte: Adaptado de AZEVEDO, 2007.

Vários estudos têm sido realizados com o objetivo de estabelecer índices estatísticos para falhas e os tipos de elementos envolvidos nos transformadores. Um dos mais famosos foi realizado pelo grupo de trabalho 12.05 do CIGRE, que em 1983 publicou resultados de uma pesquisa realizada entre os anos de 1968 a 1978 (CIGRE, 1983).

No estudo foi realizado uma análise de mais de 1000 falhas num total de 47000 transformadores. Contudo, os resultados apresentados neste trabalho abrangerá apenas os dados das unidades com comutador de derivações com carga (CDC), tanto para transformadores em subestações (SE's) convencionais quanto para transformadores em SE's de usina, pois eles correspondem a cerca de 70% das unidades avaliadas.

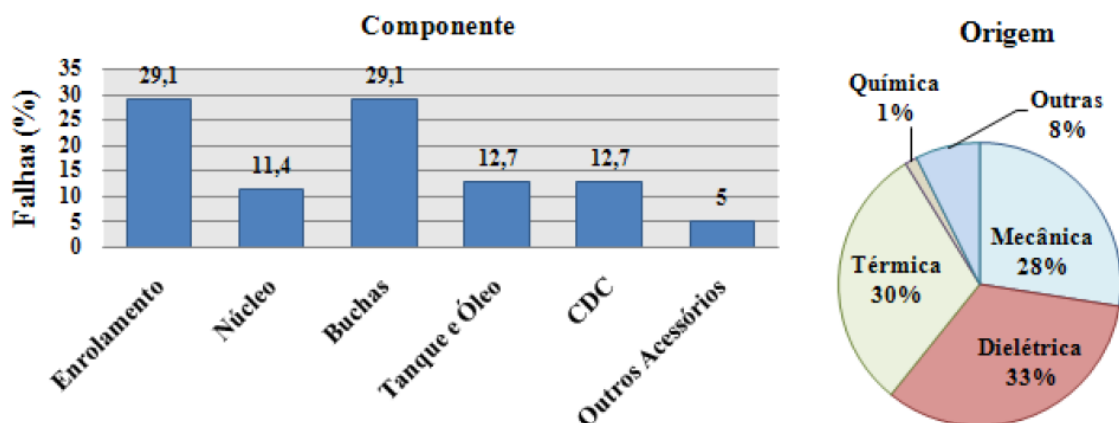
As Figuras 2 e 3 apresentam respectivamente as percentagens de falhas que ocorrem nos transformadores em SE's convencionais e em SE's de usinas, evidenciando-se os principais componentes afetados, bem como a origem das falhas.

Figura 2 – Porcentagem de falhas dos transformadores em SE's convencionais em relação ao componente afetado e a origem da falha.



Fonte: Adaptado de CIGRE, 1983.

Figura 3 – Porcentagem de falhas dos transformadores em SE's de usina em relação ao componente afetado e a origem da falha.



Fonte: Adaptado de CIGRE, 1983.

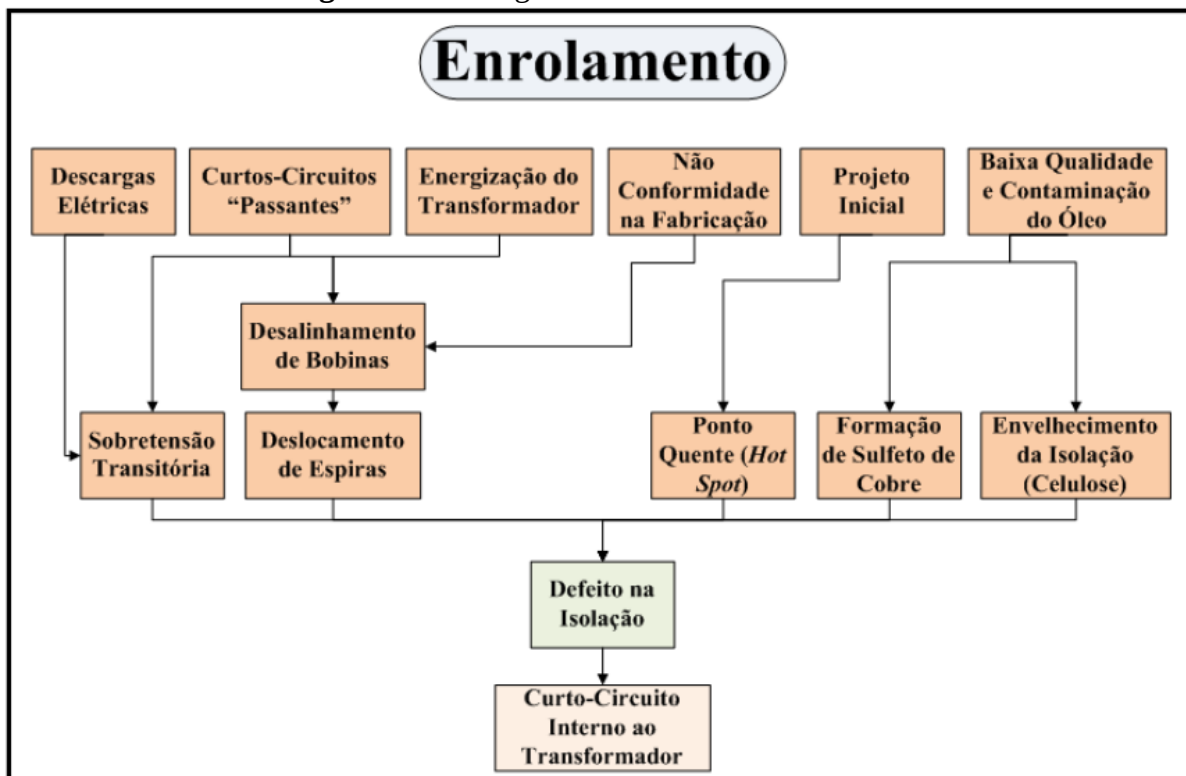
Analisando os resultados, observa-se que grande porcentagem das falhas foi de origem mecânica e dielétrica. Considera-se que as falhas dielétricas iniciam-se, na sua grande maioria, com os movimentos mecânicos dos enrolamentos, os quais poderiam ser evitados por meio do monitoramento das condições mecânicas do núcleo e dos enrolamentos.

Destaca-se que a porcentagem de falhas referentes ao CDC dos transformadores em SE convencionais, ilustrada na Figura 2, é consideravelmente maior que dos transformadores em SE de usina, ilustrada na Figura 3. Isto ocorre, pois, os transformadores em SE de usina são monitorados e possuem programas de manutenção rígidos e com maior frequência, quando comparados com os transformadores em SE convencionais.

Observa-se ainda que em ambos os tipos de unidades, as falhas nos enrolamentos foram significativas. Além da suportabilidade térmica e dielétrica, os enrolamentos devem

suportar também as forças mecânicas, as quais podem ser causadas por uma corrente de energização do transformador, ou por uma corrente de curto-circuito. A Figura 4 mostra, em fluxograma, a sequência de falhas do enrolamento.

Figura 4 – Fluxograma de falha do enrolamento.



Fonte – ROSENTINO, 2010.

Os custos relacionados com reparo/substituição das unidades transformadoras avariadas, principalmente as de potência, são muito altos. Para ilustrar essa questão, foi realizado um levantamento entre os anos de 1997 e 2001 com o objetivo de obter informações sobre desativações de transformadores de potência associando-as a causas e custos.

Concessionárias de diversos países participaram dessa pesquisa enviando as informações requeridas. Do total de casos obtidos junto as empresas colaboradoras, 94 continham informações conclusivas que propiciaram a criação de um banco de dados. Os resultados desta pesquisa estão sintetizados de acordo com BARTLEY (2003), na forma de gráfico e tabelas. A Tabela 2 associa o custo de cada causa de falhas em função do número de ocorrências.

Tabela 2 – Custos de Falhas.

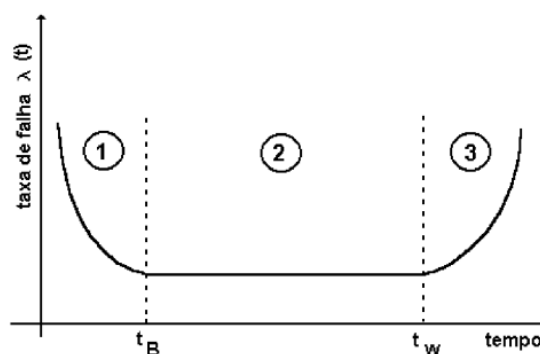
Causas das Falhas	Numero	Dólares Pagos
Falhas na Isolação	24	\$ 149.967.277
Projeto/Material	22	\$ 64.696.051
Desconhecida	15	\$ 29.776.245
Contaminação do Óleo	4	\$ 11.836.367
Sobrecarga	5	\$ 8.568.768
Fogo/Explosão	3	\$ 8.045.771
Sobretensão	4	\$ 4.959.691
Manutenção Incorreta	5	\$ 3.518.783
Inundação (causa natural ou humana)	2	\$ 2.240.198
Perda de Conexão	3	\$ 2.186.725
Descargas Atmosféricas	3	\$ 657.935
Umidade	1	\$ 175.000
Total	94	\$ 286.628.811

Fonte; BARTLEY, 2003.

Observa-se na tabela acima que a isolação foi o responsável pelo maior número de registros de falhas e, conseqüentemente, pelos maiores gastos alcançando a exagerada quantia de 150 milhões de dólares. A referência acredita que as causas das falhas na isolação podem ser de origem externa (como por exemplo, curtos-circuitos) ou interna devido a isolação inadequada ou defeituosa.

A Figura 5 ilustra a curva que expressa uma estimativa do número das falhas em função do tempo de vida para transformadores de potência. Esta é denominada curva de “modelo de falhas” de transformadores (conhecida também como curva “*bathtub*” ou curva da “banheira”) e evidencia que os períodos mais críticos, em termos de probabilidade de falha de um transformador, ocorrem no início de sua operação e depois decorridos alguns anos de funcionamento do equipamento.

Figura 5 – Curva da “banheira”.



Fonte: MEDINA, 2003.

De acordo com MEDINA (2003), a curva da “banheira” é descrita da seguinte forma: a primeira parte conhecida como mortalidade infantil, representa às desativações que acontecem nos primeiros anos de vida e, que podem estar relacionadas com as inadequações de projetos, erros de fabricação, problemas ocorridos durante as fases de transporte e de montagem.

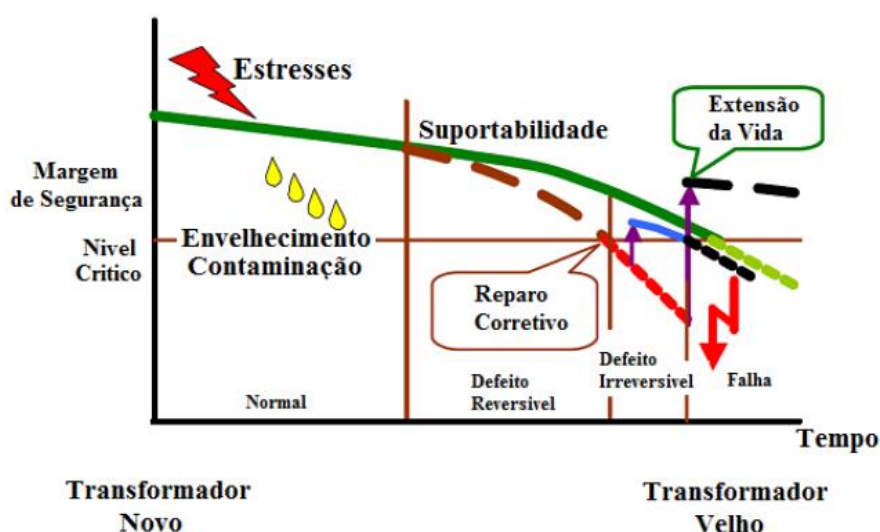
Nessa região, a taxa de falha decresce em função do tempo ou idade. A segunda parte, conhecida como vida útil, apresenta uma taxa de ocorrência de falhas baixa e, praticamente constante, que também pode estar associada a qualquer tipo de falta, sendo a única fase na qual a distribuição exponencial é válida, ou seja, como a taxa de falha é constante, as falhas se distribuem exponencialmente ao longo do tempo.

A terceira e última parte é conhecida como de envelhecimento, representa a fase de fadiga e é caracterizada por um rápido crescimento da taxa de falha com o tempo. Neste caso, os defeitos podem estar relacionados, principalmente, com a perda da resistência mecânica do sistema de isolamento dos enrolamentos, que tendem a degradar-se com o envelhecimento.

A falha em um transformador ocorre quando a sua suportabilidade em relação a alguns parâmetro chaves (esforços mecânicos, dielétricos, dentre outros) é ultrapassada por estresses intermitentes durante toda a sua vida de operação. Esta situação pode ser observada na Figura 6, onde se repara que naturalmente a suportabilidade do transformador é reduzida devido ao seu envelhecimento normal, como mostra a curva em verde.

Entretanto, a falha do equipamento pode-se tornar mais rápida que o normal sob influências de fatores adversos (como por exemplo: descarga parcial, excesso de umidade, entre outras), como mostra a curva marrom (ROSENTINO, 2010).

Figura 6 – Processo de envelhecimento e redução da suportabilidade do transformador.



Fonte: ROSENTINO, 2010.

A Tabela 3 mostra as definições das diferentes condições de operação durante a vida útil do transformador mostrada pela Figura 6.

Tabela 3 – Definição da classificação das condições de operação de um transformador.

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

Fonte: ROSENTINO, 2010.

O envelhecimento do sistema de isolamento reduz tanto a suportabilidade elétrica quanto a mecânica do equipamento. Com o tempo, o transformador é submetido a curtos-circuitos, o que resultam em elevadas forças eletromagnéticas. Desta forma, a isolamento do condutor é enfraquecida ao ponto em que não possa mais ser capaz de suportar as demandas mecânicas devido, por exemplo, a um curto-circuito. Com isso a isolamento espira por espira sofre então uma falha dielétrica, ou ocorre um afrouxamento das amarrações do enrolamento, reduzindo assim a capacidade do equipamento suportar futuros curtos-circuitos (AZEVEDO, 2007).

Comprova-se através dos gráficos e tabelas apresentados ao longo desse capítulo, que as falhas estão vinculadas aos estresses térmicos, dielétricos, químicos e mecânicos. Deve-se destacar ainda que a maioria dos problemas é atribuída, diretamente ou indiretamente, às falhas na isolamento, provocadas pela diminuição da resistência dielétrica dos isolantes.

Em outras palavras, as deformações ameaçam a integridade mecânica dos enrolamentos dos transformadores e são influenciadas por alguns fatores, como por exemplo: problemas ocasionados durante o transporte; forças dinâmicas durante a operação normal; forças excessivas provocadas por curtos-circuitos ou corrente de energização.

Contudo, a razão mais comum de deformações mecânicas sofridas pelos condutores utilizados nos enrolamentos são os esforços mecânicos ocasionados por curtos-circuitos.

2.3 CURTO CIRCUITO

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

O efeito do curto-circuito é o corte no fornecimento de energia, interrupção nos processos de fabricação, prejuízos na produção, prejuízos de componentes, além do risco a segurança de operadores.

Pode-se classificar os curtos-circuitos como sendo temporários ou permanentes. Nas palavras de Kindermann (2004), a ocorrência de curtos-circuitos temporários é bem mais frequente, com 96% dos eventos ocorridos, o que lamentavelmente não alivia o sistema elétrico, no que refere-se aos efeitos mecânicos, considerando que os componentes (como por exemplo: cabos, barramentos, elementos de fixação, transformadores, entre outros) sofrerá a corrente de curto-circuito assimétrica nos primeiros ciclos. Os prejuízos podem ser minimizados se os componentes forem especificados para suportar as solicitações térmicas e dinâmicas causadas pela corrente de curto-circuito.

A solicitação térmica, além de ser função do quadrado do valor eficaz da corrente de curto-circuito, depende também do tempo de duração deste evento. Desta forma, é essencial que a proteção contra curto-circuito opere o mais rápido possível e separe o ponto de falta da fonte de tensão.

Já a solicitação dinâmica resulta principalmente do quadrado do valor do pico da corrente de curto-circuito. Desta forma, também se torna essencial uma rápida atuação dos equipamentos de proteção. Além disso, se a corrente de curto-circuito não atingir seu valor de pico, os componentes terão solicitações térmicas e dinâmicas reduzidas.

As correntes de curto-circuito, além de ser a responsável pelas maiores causas de falhas em transformadores, é responsável pelas faltas que apresentam maior impacto sobre as estruturas de sustentação dos transformadores. Os efeitos das correntes de curto-circuito nos enrolamentos são habitualmente agrupados em efeitos térmicos e efeitos mecânicos.

O impacto que os efeitos térmicos e mecânicos podem causar em unidades transformadoras, em função de suas potências nominais, é uma questão para a qual ainda não existe um consenso absoluto. Entretanto, segundo a referência, os efeitos mecânicos (estresse) tendem a ser predominantes em transformadores de potência, devido as elevadas corrente de curto-circuito envolvidas. Por outro lado, em transformadores de distribuição, os efeitos térmicos determinam os limites operacionais sob curtos-circuitos (AZEVEDO, 2007).

Neste contexto, a capacidade de um transformador para resistir aos curtos-circuitos é considerada essencial para garantir a sua segurança e a confiabilidade dos sistemas. E, para operarem satisfatoriamente, estes equipamentos devem ser projetados e construídos para suportar os curtos-circuitos a que possam ser submetidos durante o tempo de vida para o qual foram projetados (FOLDI et.al. 2000). Para que isso ocorra, os enrolamentos devem ter resistência mecânica suficiente para suportar as forças eletromagnéticas produzidas pelas altas correntes, sem se danificar. Ao mesmo tempo, os materiais usados na construção de condutores e isolamento, devem ser capazes de resistir, sem expressiva deterioração, as altas temperaturas produzidas pelas correntes de curto-circuito.

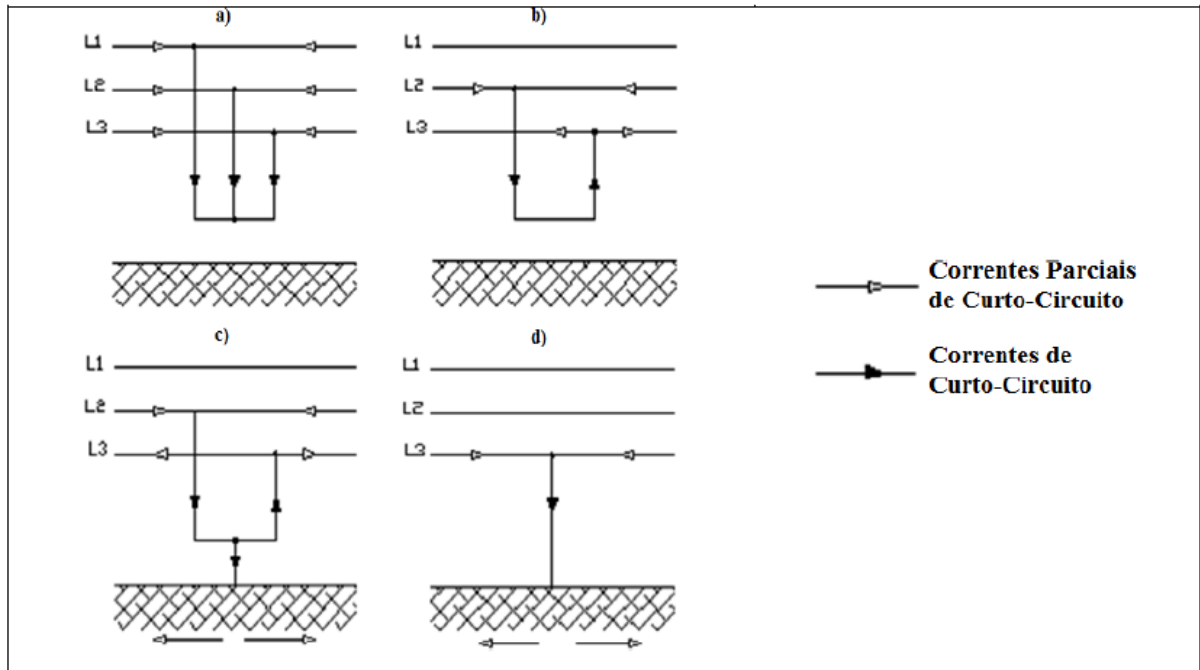
A obtenção de um projeto seguro e eficiente requer, portanto, a adoção de uma metodologia para efetuar cálculos das resistências mecânicas das várias partes do transformador (WATERS, 1966). Nesse sentido, a seguir, são apresentados os principais aspectos que devem ser observados quando do desenvolvimento de projetos e construção de transformadores:

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

Sistemas elétricos de potência estão sujeitos a ocorrência de curtos-circuitos. Muito destes, contudo, alcançarão valores inferiores à máxima corrente de curto-circuito possível de ocorrência, e somente em casos raros, um transformador estará sujeito a este fenômeno em seus terminais com a capacidade de curto-circuito total do sistema disponível no lado energizado.

Em sistemas trifásicos os curtos-circuitos são classificados em 4 categorias, que estão ilustrados na Figura 7 juntamente com as indicações dos sentidos das correntes. Através da figura, nota-se que o curto-circuito tripolar é o mais fácil de compreender e calcular.

Figura 7 – Tipos de faltas e sentido das correntes em sistemas trifásicos. a) curto-circuito trifásico; b) curto-circuito bifásico; c) curto-circuito bifásico à terra; d) curto-circuito monofásico à terra.



Fonte: DELAIBA (2006).

Dados estatísticos mostram que a maioria dos curtos-circuitos ocorridos no sistema elétrico é do tipo fase-terra. Seguem, em termos da frequência de ocorrência, os curto bifásicos, bifásicos à terra e, por último, os curtos-circuitos trifásicos (AZEVEDO, 2007). Evidencia-se que apesar dos curtos-circuitos trifásicos ocorrerem com menor frequência, normalmente são os que apresentam maior gravidade, sendo assim, os responsáveis pelos maiores esforços nos enrolamentos dos transformadores.

Contudo, é prática comum projetar transformadores para suportar 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-circuito (WATERS, 1966).

Para analisar os efeitos térmicos provocados pela corrente de curto-circuito trifásico em um equipamento, é preciso conhecer o valor eficaz dessa corrente, ou seja, o valor simétrico ($I_{3\phi}$). Como a componente alternada da corrente de curto-circuito tem a mesma forma de onda da tensão (somente a sequência positiva é considerada), seu valor eficaz pode ser obtido a partir do valor eficaz da tensão, a qual é calculada pela Equação 2.1 (DELAIBA, 2006).

$$I_{3\phi} = \frac{U_l}{\sqrt{3} \cdot Z} \quad (2.1)$$

Onde:

U_l : Tensão de linha nominal [V]

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

Para analisar o efeito dinâmico provocado por uma corrente de curto-circuito trifásico, é preciso conhecer o valor de pico dessa corrente, ou seja, o valor assimétrico ($I_{3\phi s}$). Essa corrente máxima é obtida por intermédio de três diferentes equacionamentos, os quais são: a “equação do meio ciclo”; as equações das normas IEC 60909 (2001) e a IEEE Std-551 (2006) (GRIGOLETTO, 2013).

Enfatiza-se que não é objetivo, desse trabalho, a comparação de equacionamentos utilizando como referência a IEC 60909 (2001). Explicação referentes à comparação de metodologias das normas citadas são encontradas na referência (GRIGOLETTO, 2013).

Neste contexto, o maior valor instantâneo da corrente de curto-circuito pode ser determinado a partir da Equação 2.2 (DELAIBA, 2006).

$$I_{3\phi s} = f_i \cdot \sqrt{2} \cdot I_{3\phi} \quad (2.2)$$

Onde:

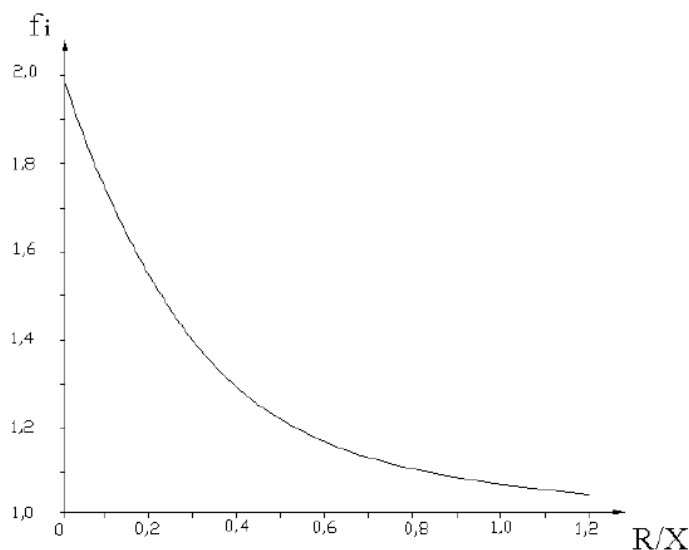
$f_i = f(R/X)$: Fator de assimetria ou impulso, que leva em consideração a influência da componente continua.

O fator de impulso pode ser obtido a partir das características peculiares de cada circuito com o auxílio da Equação 2.3 [11,12].

$$f_i = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3,03 \frac{R}{X}} \quad (2.3)$$

O valor de f_i pode ser obtido também a partir da curva da Figura 8. De forma mais prática, também pode-se utilizar a Tabela 4, que apresenta alguns valores discretos de relações R/X .

Figura 8 – Fator de impulso em função da relação R/X.



Fonte: DELAIBA (2006).

Tabela 4 – Valores para o 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	≥0,071
Fator de Impulso f_i	1,07	1,16	1,25	1,38	1,48	1,55	1,61	1,68	1,74	1,8
Fator $f_i \cdot \sqrt{2}$	1,51	1,64	1,76	1,95	2,09	2,19	2,27	2,38	2,46	2,55

Fonte: IEC 60076-5, 2000.

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

Para determinar uma estimativa para o cálculo do nível de curto-circuito de uma instalação, considera-se que o curto-circuito trifásico ocorra na saída do transformador, portanto, a única impedância envolvida é a do equipamento mencionado. Nesta condição simplificada, a única impedância a ser considerada é a do transformador, e o valor da corrente de curto-circuito trifásico pode ser calculado pela Equação 2.4 (DELAIBA, 2006).

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

Na qual:

$$Z_{trafo} = \frac{Z\% \cdot U_l^2}{S_n \cdot 100} \quad (2.5)$$

Onde:

$Z\%$: Impedância porcentual do transformador,

S_n : Potência aparente nominal do transformador [VA].

De forma a simplificar o cálculo, substitui-se a Equação 2.5 na 2.4, implicando em:

$$I_{3\phi} = \frac{S_n \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot Z\% \cdot U_l} \quad (2.6)$$

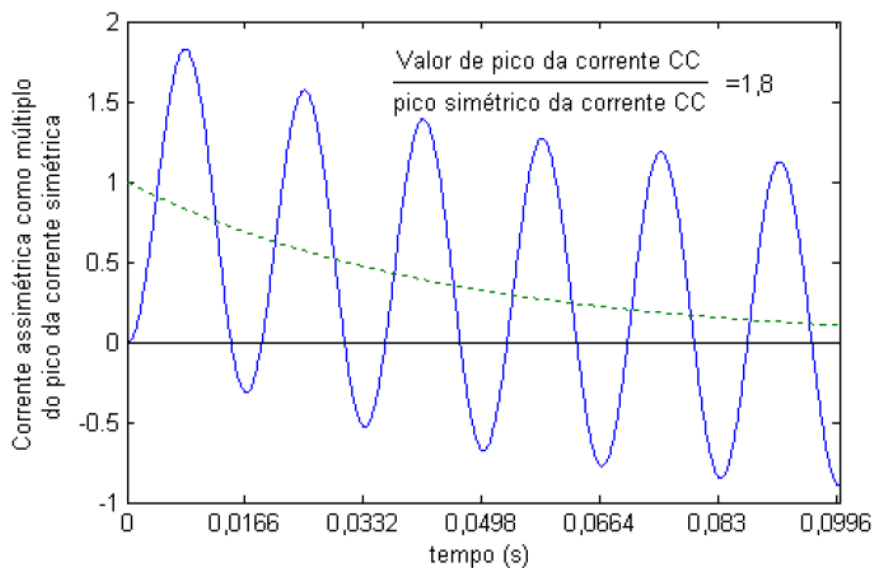
Consequentemente, a corrente assimétrica de curto-circuito trifásico é obtida por meio das Equações 2.2, 2.3 e 2.6, resultando em:

$$I_{3\phi s} = \frac{f_i \cdot \sqrt{2} \cdot S_n \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot Z\% \cdot U_l} = \frac{(1,02 + 0,98 \cdot e^{-3,03 \frac{R}{X}}) \cdot \sqrt{2} \cdot S_n \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot Z\% \cdot U_l} \quad (2.7)$$

Uma vez que as forças produzidas são proporcionais ao quadrado da corrente, uma redução moderada da corrente proporciona uma redução substancial do estresse devido ao curto-circuito. Diante disso, o fator de assimetria se mostra ainda mais importante, uma vez que para um fator de assimetria máximo (1,8), as forças correspondentes ao pico do primeiro ciclo da corrente de falta são ($1,8^2 = 3,24$) vezes maiores do que para uma corrente completamente simétrica (WATERS, 1966).

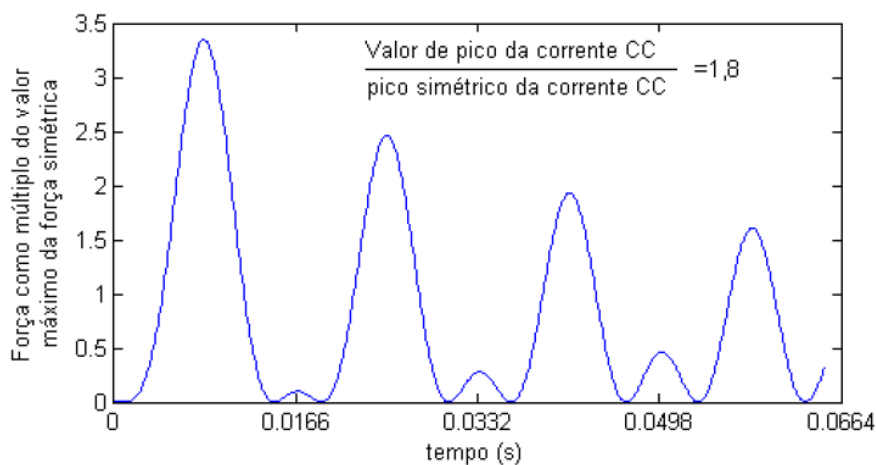
Com a intenção de esclarecer tal fato, a Figura 9 mostra uma corrente de curto-circuito para uma situação de máxima assimétrica. Diante do interesse em analisar o comportamento dos esforços eletromecânicos, a Figura 10 ilustra a forma de onda da força devido à esta corrente imposta nos enrolamentos dos transformadores.

Figura 9 – Forma de onda da corrente de curto-circuito trifásico de uma falta totalmente assimétrica.



Fonte: WATERS, 1966.

Figura 10 – Forma de onda da força eletromagnética em função do tempo durante uma falta totalmente assimétrica.



Fonte: WATERS, 1966.

A frequência das ocorrências de faltas é um fator importante para a vida útil dos transformadores. Embora as estruturas de suporte e os sistemas isolantes sejam projetados para resistir aos máximos estresses provocados por curtos-circuitos, a ocorrência com maior frequência de faltas, tende a prejudicar a isolação, reduzindo assim gradativamente sua resistência aos esforços mecânicos.

Quanto ao tempo de duração das faltas, considera-se que este não seja um fator agravante dos estresses mecânicos, visto que as máximas forças se verificam durante a ocorrência do primeiro pico da corrente (AZEVEDO, 2007).

2.4 FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS EM TRANSFORMADORES

Por meio da teoria eletrodinâmica, sabe-se, que a densidade de força num dado volume de um enrolamento de um transformador é igual ao produto vetorial da densidade de corrente no enrolamento pela densidade de fluxo magnético de dispersão. Esta correlação é mostrada pela Equação 2.8, que se fundamenta na expressão básica das forças de Lorentz (AZEVEDO, et. al. 2007).

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (2.8)$$

Onde:

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

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

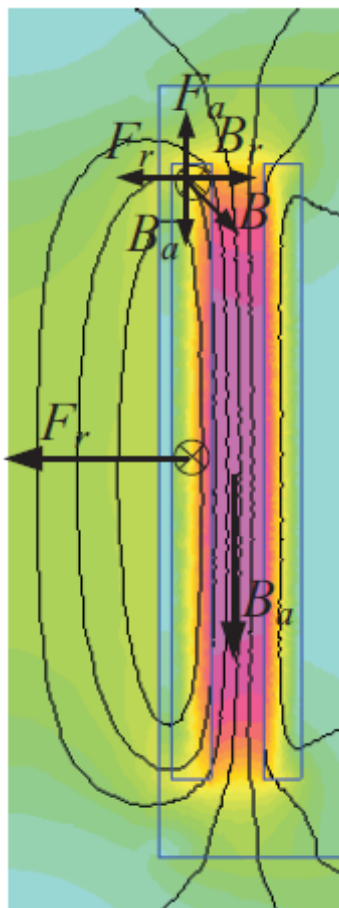
$\vec{B}$: Densidade de fluxo magnético de dispersão [T].

Através da Equação 2.8, percebe-se, 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, sob condições normais de operação, os enrolamentos do transformador estarão expostos à pequenas forças eletromagnéticas, tendo em vista que as forças e os campos de dispersão são relativamente pequenos.

No entanto 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 valores elevados que podem destruir total ou parcialmente o transformador.

A distribuição de fluxo magnético de dispersão é quase que exclusivamente axial (linhas de fluxos paralelas aos enrolamentos) ao longo da maior parte da altura dos enrolamentos (B_a) e inclina-se nas extremidades das bobinas, buscando o menor caminho de retorno. Essa inclinação provoca a decomposição do campo de dispersão em duas componentes: uma axial (B_a) e outra radial (B_r) nas extremidades inferior e superior da bobina (AZEVEDO, 2007). Estes fatos podem ser verificados através da Figura 11.

Figura 11 – Campo de dispersão e decomposição das forças eletromagnéticas.



Fonte: AZEVEDO, 2007.

O processo de interação entre essas grandezas vetoriais acontece da seguinte maneira: a densidade de fluxo magnético de dispersão axial (B_a), interage com a corrente do enrolamento, dando origem a uma força radial (F_r), a qual é responsável pela repulsão entre os enrolamentos interno e externo do transformador. Em contrapartida, a interação entre o fluxo magnético de dispersão radial (B_r) com a corrente do enrolamento dá origem a uma força axial (F_a), a qual é responsável pelos esforços de compressão axial.

2.5 FALHAS ELETROMECHANICAS EM TRANSFORMADORES

Mecanicamente, as condições normais de operação e até mesmo de sobrecarga pouco afetam a suportabilidade mecânica dos enrolamentos do transformador. Porém, em condições de curto-circuito, as elevadas correntes transitórias associadas aos campos de dispersão podem provocar a deformação e/ou deslocamento dos enrolamentos.

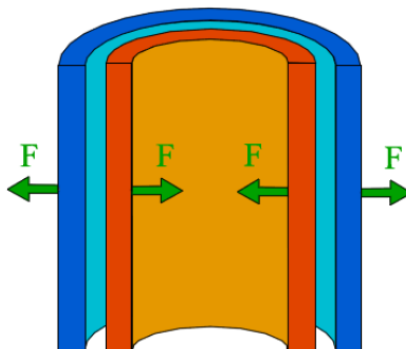
Geralmente, a ocorrência desse tipo de defeito não é perceptível de imediato, pois dificilmente o esforço eletromecânico imposto aos enrolamentos do transformador é maior que o admissível pelo equipamento. Contudo, a suportabilidade mecânica dos enrolamentos é reduzida, fazendo com que a capacidade de suportar novos eventos seja menor, o que pode reduzir o final de sua vida útil.

Conforme apresentado anteriormente, as forças eletromagnéticas podem ser decompostas em forças axiais e radiais. Entretanto, os mecanismos de falhas em transformadores de núcleo envolvido são diferentes do núcleo envolvente. Neste trabalho, serão analisadas, as falhas mecânicas em enrolamentos devido aos esforços eletromecânicos advindo das forças eletromagnéticas em transformadores do tipo “núcleo envolvido”, pois nos capítulos decorrentes apresentam este modelo de núcleo. As falhas para ambos os tipos de núcleo podem ser encontradas na referência (WATERS, 1966).

2.5.1 Falhas devido a forças radiais

As forças radiais, como visto, são originadas pela componente axial de fluxo magnéticos (B_a) e podem produzir efeitos diferentes nos enrolamentos externo e interno dos transformadores. Em equipamentos do tipo núcleo envolvido, as forças eletromagnéticas radiais tendem a comprimir o enrolamento interno (estresses de compressão) e tracionar os enrolamentos externos (estresses de tração) [8;15], conforme a Figura 12.

Figura 12 – Ação das forças eletromagnéticas radiais no enrolamento interno e externo do transformador.



Fonte: ROSENTINO, 2010.

As consequências das deformações originadas das forças eletromagnéticas radiais são (AGUIAR, 2007):

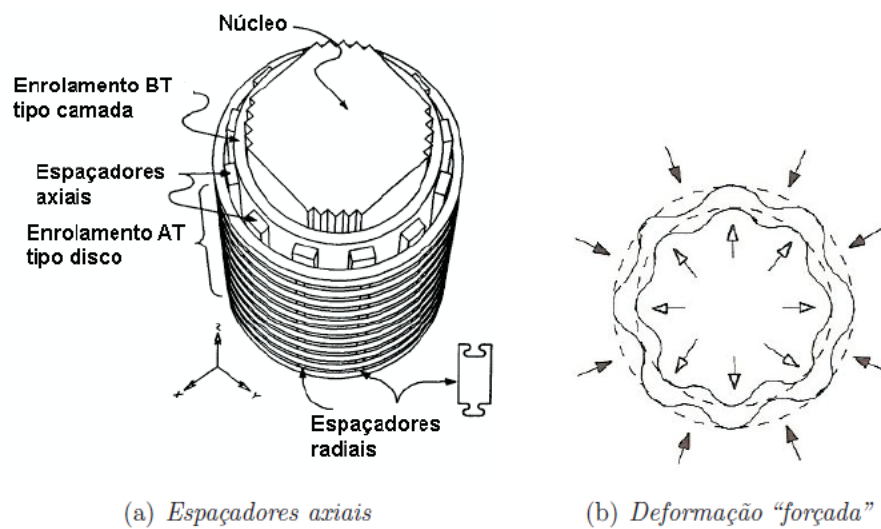
- Alongamento do isolante que reveste os condutores dos enrolamentos. Isto é altamente prejudicial, visto que degrada significativamente o material isolante, reduzindo a vida útil do transformador;
- Diminuição das distâncias de isolamento entre o núcleo e o enrolamento interno. Com isso há uma mudança da distribuição de fluxo magnético no interior do transformador, além de partes do material isolante estar expostas a maiores estresses elétricos, o que consequentemente, reduzirá a capacidade do transformador em suportar surtos de tensão;
- Redução das distâncias de isolamento 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, reduz a robustez do transformador, frente às solicitações impostas pelo sistema, como curtos-circuitos trifásicos, bifásicos, monofásicos, entre outros.

Os enrolamentos externos estão sujeitos as forças de tração, e por consequência, ao estresse de tração (*hoop stress*). Essa força, dependendo de seu valor, poderá causar danos a isolamento do condutor, caso o estresse de tração exceda o limite de escoamento do condutor (WATERS, 1966).

Os enrolamentos internos estão sujeitos as forças compressivas, implicado em deformações de duas maneiras distintas. Uma delas ocorre quando o enrolamento interno está firmemente sustentado por espaçadores, como mostra a Figura 13 (a). Os espaçadores neste

caso localizados axialmente, e a estrutura de suporte como um todo, tem rigidez mecânica maior que a dos condutores (WATERS, 1966). Neste caso, os condutores podem apresentar uma deformação entre todos os suportes ao longo da circunferência do enrolamento, com a curvatura voltada para dentro, desde que o valor do estresse exceda o limite elástico do material condutor. Esse tipo de falha é conhecido como “deformação forçada” (*forced buckling*) e está ilustrada na Figura 13 (b). A Figura 14 também ilustra este evento em um transformador real.

Figura 13 – Deformação devido às forças compressivas: (a) Ilustração dos espaçadores e outros componentes do transformador e (b) Deformação forçada (*forced buckling*) no enrolamento interno.



Fonte: AZEVEDO, 2007.

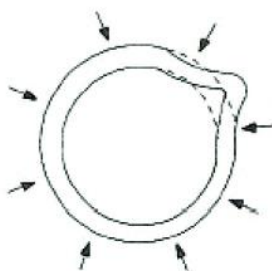
Figura 14 – Deformação forçada (*forced buckling*) no enrolamento de um transformador.



Fonte: Adaptado ROSENTINO, 2010.

A outra forma de deformação que afeta o enrolamento é chamada “deformação livre” (*free buckling*). Neste caso, diferente do primeiro, a inclinação dos condutores não está relacionada com os espaçadores axiais, sendo que a resistência mecânica dos condutores é maior do que aquela proporcionada pela estrutura de suporte (CIGRE, 2002). Nesta condição, a projeção do condutor pode se dar tanto para fora quanto para dentro, em um ou mais pontos da circunferência, como ilustra a Figura 15. A Figura 16 também ilustra este evento em um transformador real.

Figura 15 – Deformação livre (*free buckling*) no enrolamento interno.



Fonte: CIGRE, 2002

Figura 16 – Deformação livre (*free buckling*) no enrolamento de um transformador.



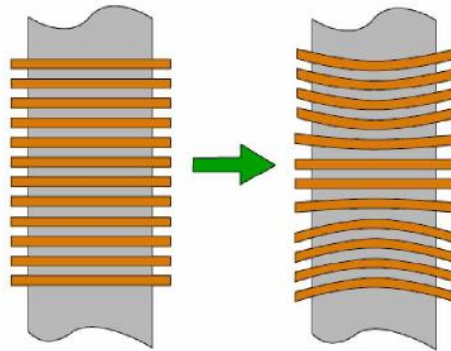
Fonte: Adaptado ROSENTINO, 2010.

Quanto a deformação dos enrolamentos, muitos fatores podem contribuir para a sua ocorrência, como por exemplo: utilização de materiais com características inferiores as mínimas requeridas; excentricidade dos enrolamentos, enrolamentos frouxos, baixa resistência das estruturas de suporte em relação ao condutor dentre outras.

2.5.2 Falhas devido a forças axiais

As forças axiais, como visto, são originadas pela componente radial de fluxo magnéticos (B_r) e podem produzir efeitos de compressão axial nos enrolamentos dos transformadores. Sob tal efeito, os enrolamentos podem se curvar entre os espaçadores isolantes localizados radialmente, ou se inclinarem entre si. A figura 17 representa a vista de frente de um enrolamento antes e depois da deformação. A figura 18 também ilustra este evento em um transformador real.

Figura 17 – Deformação axial em um enrolamento do transformador.



Fonte: Aguiar, 2007.

Figura 18 – Colapso axial correspondente a uma força axial excessiva causada por um curto-circuito em um transformador.



Fonte: ROSENTINO, 2010.

As consequências das deformações originadas das forças eletromagnéticas axiais são (AGUIAR, 2007):

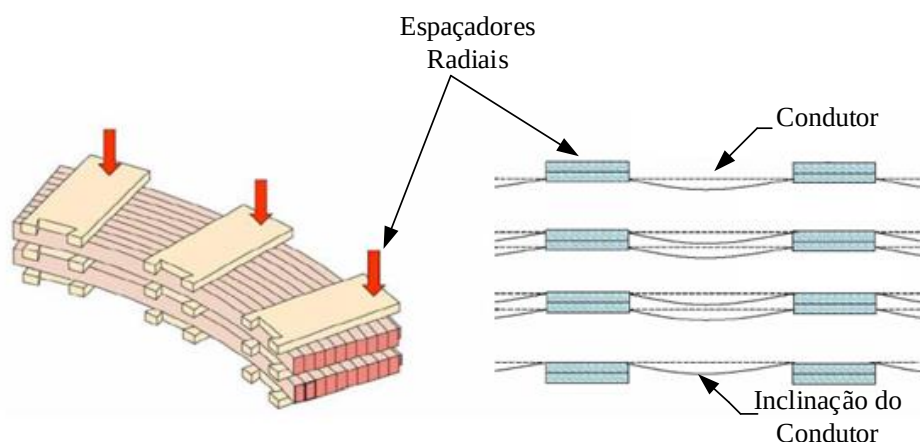
- Torção dos condutores dos enrolamentos. Com isso há um estiramento e/ou esmagamento do material isolante que reveste os condutores, reduzindo a vida útil do transformador;
- Diminuição da rigidez mecânica do disco de compressão ou respectiva quebra, que tem como consequência o deslocamento do enrolamento, as vibrações e a diminuição da suportabilidade mecânica;
- Afrouxamento nas amarrações dos enrolamentos, reduzindo assim a robustez do transformador frente às solicitações transitórias impostas pelo sistema elétrico, além de vibrações e fadiga do material isolante e conexões.

As altas forças de compressão axial nas extremidades dos enrolamentos podem causar deformação nas estruturas de fixação (*clamping*). Os elementos de fixação têm a função de exercer uma pressão eficaz sobre os enrolamentos durante os curtos-circuitos para garantir a resistência as forças axiais (CIGRE, 2002).

Adicionalmente, as falhas devido às forças axiais descritas anteriormente, existem outros dois tipos importantes, que são: flexão entre espaçadores radiais (*bending*) e o tombamento (*tilting*), os quais são analisados na sequência.

Sob ação das forças axiais, o condutor de um enrolamento pode inclinar-se entre os espaçadores isolantes localizados radialmente, como mostra a figura 19. Essa inclinação também pode resultar em danos a sua isolação. De forma contrária ao que se verifica com os esforços provenientes das forças radiais, a curvatura da deformação neste caso, se dá num plano vertical e não horizontal (AZEVEDO, 2007).

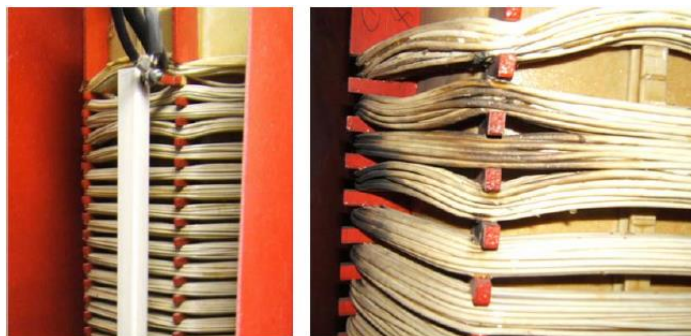
Figura 19 – Inclinação dos condutores entre espaçadores radiais (*bending*).



Fonte: Adaptado de ROSENTINO, 2010.

A figura 20 também ilustra a ocorrência do fenômeno *bending* em um transformador real.

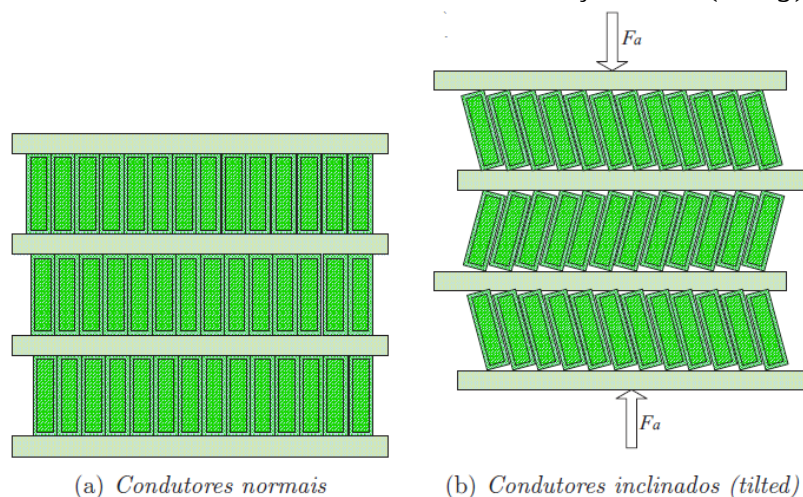
Figura 20 – Problema de inclinação dos condutores entre espaçadores (*bending*) em um transformador.



Fonte: Adaptado de ROSENTINO, 2010.

Ainda como efeito dos esforços provenientes das forças axiais, tem-se o tombamento (*tilting*), um dos principais tipos de defeitos em grandes transformadores. Essa falha ocorre quando as forças axiais são maiores que a carga limite suportável pelos enrolamentos, caracterizando-se pela inclinação dos condutores em forma de zig-zag. A Figura 21 (a) mostra os condutores na posição normal e a Figura 21 (b) mostra a inclinação dos mesmos devido a ação das forças axiais. Nota-se que, devido a elevada força imposta, desloca-se a seção transversal dos condutores em torno do eixo de simetria perpendicular (AZEVEDO, 2007).

Figura 21 – Deformação defeito as forças axiais: (a) Condutores na posição normal e (b) Tombamento dos condutores devido às forças axiais (*tilting*).



Fonte: AZEVEDO, 2007.

A Figura 22 também ilustra a ocorrência do fenômeno *tilting* em um transformador real.

Figura 22 – Problema de tombamento (*tilting*) em um transformador.



Fonte: ROSENTINO, 2010.

3 METODOLOGIA ANALÍTICA PARA CÁLCULO DAS FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS EM ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADOR

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como visto anteriormente, uma das principais razões de falhas internas dos transformadores, é a redução da suportabilidade mecânica da isolação dos seus enrolamentos, ocasionados pelas forças eletromecânicas produzidas pelas altas correntes de curto-circuito. Com isso, este capítulo irá apresentar uma metodologia analítica para estimar as forças radiais e axiais, além do estresse eletromecânico em transformadores ocasionados por curtos-circuitos trifásicos. Contribuindo com os aspectos anteriores, a metodologia analítica é aplicada em um transformador de 15 KVA com enrolamento concêntrico de tamanho igual sem derivações e sem desalinhamento axial (caso ideal).

3.2 METODOLOGIA ANALÍTICA PARA CÁLCULO DAS FORÇAS RADIAIS EM ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS

As componentes das forças radiais agindo em um transformador com enrolamentos concêntricos podem ser calculadas com precisão através de um método analítico clássico. Diante das implicações físicas, objetiva-se apresentar na sequência os principais equacionamentos referentes as forças axiais e o estresse médio. Salienta-se que informações adicionais dos equacionamentos podem ser encontradas nas referências [10;15].

A força radial que atua sobre o enrolamento externo e/ou interno pode ser determinada pela seguinte equação (WATERS, 1966):

$$F_r = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_a)^2 \cdot D_m}{h} \cdot 10^{-7} \text{ [N]} \quad (3.1)$$

Onde:

n : Número de espira do enrolamento a ser analisado;

I_a : Valor da corrente de pico do evento a ser analisado, ou seja, valor da corrente assimétrica do curto-circuito trifásico [A];

D_m : Diâmetro médio do enrolamento a ser analisado [m];

h : Altura do enrolamento a ser analisado [m];

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

Consequentemente a força radial média pode ser encontrada pela Equação 3.2:

$$F_{rmed} = \frac{F_r}{\pi} = \frac{2\pi \cdot (nI_a)^2 \cdot D_m}{h} \cdot 10^{-7} \text{ [N]} \quad (3.2)$$

Enquanto isso, a força radial distribuída ao longo de cada espira do enrolamento pode ser obtida pela Equação 3.3:

$$F_{rad-dist} = \frac{2\pi \cdot n \cdot I_a^2}{h} \cdot 10^{-7} \text{ [N/m]} \quad (3.3)$$

Por fim, o estresse médio de tração no enrolamento será dado pela Equação 3.4:

$$\sigma_{r-medio} = \frac{F_{rad-dist} \cdot D_m}{2 \cdot b \cdot e} = \frac{F_{rad-dist} \cdot D_m}{2 \cdot a_c} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (3.4)$$

Onde:

b : Distancia axial do condutor [m];

e : Distancia radial do condutor [m];

a_c : Seção transversal do condutor [m²].

As equações e as considerações salientadas anteriormente, são validas para o cálculo analítico das forças e estresse tanto no enrolamento externo quanto no interno. Precisando-se apenas atentar para o uso do diâmetro correto do enrolamento que estiver sendo analisado.

3.3 METODOLOGIA ANALÍTICA PARA CÁLCULO DAS FORÇAS AXIAIS EM ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS

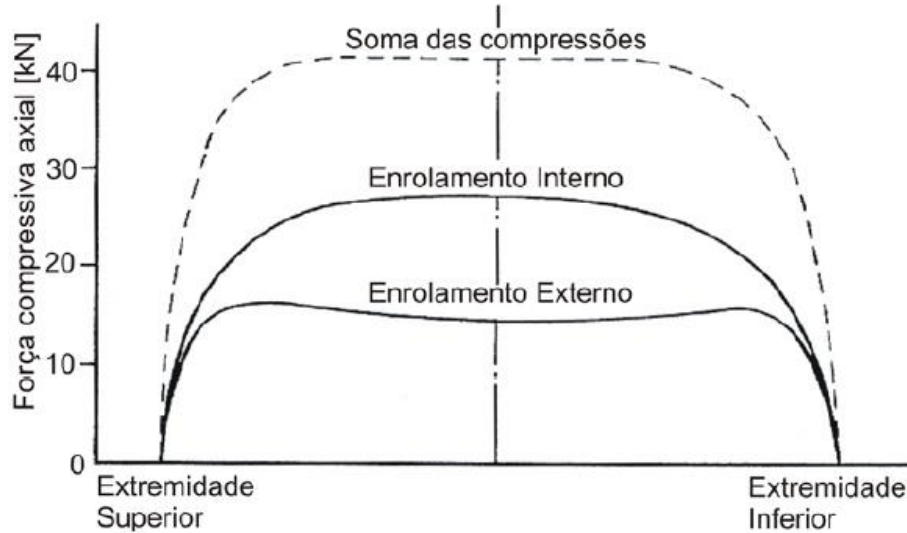
As componentes das forças axiais agindo em um transformador com enrolamentos concêntricos convencionais não podem ser calculadas com exatidão de forma analítica. Isso ocorre, pois, a curvatura do fluxo de campo magnético não pode ser referenciada sem soluções bastante complexas, as quais requerem uso de alguma modelagem computacional.

Antes da possibilidade de realizar modelagens computacionais, algumas metodologias foram criadas para estimar as forças axiais, como exemplo, tem-se o método ampère-espira residual (WATERS, 1966). Tal metodologia é utilizada principalmente nas condições em que há uma contribuição para o aumento das forças axiais nos enrolamentos, como o desalinhamento axial dos enrolamentos e o uso de derivações (tapes).

Nos transformadores que possuem distribuição uniforme de forças magnetomotrizes, isto é, enrolamentos concêntricos de igual comprimento, sem derivações, sem deslocamentos e sem desalinhamento de eixo entre o enrolamento externo e interno (caso ideal), as forças axiais que ocorrem devido aos campos radiais nas duas extremidades dos enrolamentos estão dirigidas para o ponto médio dos enrolamentos (ROSENTINO, 2010). Para este caso, as curvas de

compressão total, também podem ser consideradas ideais, conforme ilustrado pela Figura 23. Neste exemplo foram analisadas as forças compressivas no enrolamento externo e interno de um transformador. A curva pontilhada representa a soma das compressões, e tem valor constante ao longo da maior parte do enrolamento. Esse valor é estimado pela Equação 3.5 (WATERS, 1966).

Figura 23 – Curvas de uma compressão axial para enrolamentos considerados perfeitos.



Fonte: ROSENTINO, 2010.

$$F_{cTotal} = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_s)^2 \cdot D_{mt} \cdot 10^{-7}}{h^2} \left[d_0 + \frac{d_i + d_e}{3} \right] \text{ [N]} \quad (3.5)$$

Onde:

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

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

d_0 : Ducto do transformador [m];

d_i : Espessura radial do enrolamento interno [m] ;

d_e : Espessura radial do enrolamento externo [m].

Considerando a força no pico da primeira metade do ciclo de curto-circuito, e assumindo um fator de impulso (f_i), tem-se um valor máximo para a força compressiva total, fornecido pela Expressão 3.6 (ROSENTINO, 2010).

$$F_{cTotal} = \frac{2,83 \cdot f_i \cdot S_\phi \times 10^5}{Z_{\%} \cdot f \cdot h} \quad (3.6)$$

Onde:

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

f : Frequência em ciclos por segundo

Para transformadores de maior porte, no caso da falta de uma análise mais detalhada, pode-se considerar que cerca de 2/3 a 3/4 da força compressiva total é aplicada no enrolamento interno (F_{c-intl}) e os 1/3 a 1/4 restantes no enrolamento externo (F_{c-ext}) (WATERS, 1966).

De forma específica, os estresses mais elevados ocorrem no final dos enrolamentos. A força axial total no final da bobina de qualquer enrolamento, em condições ideais, pode ser dada pela Equação 3.7 (WATERS, 1966).

$$F_a = 0,366. q. F. \log\left(1 + \frac{4. d_1^2}{w^2}\right) \quad (3.7)$$

Onde:

q : Fração do ampère-espira total em um enrolamento, depende do número de discos (N_d) ou do número de camadas (N_l) do enrolamento;

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

$$F = \frac{2\pi^2.(nI_a)^2. D_{medio}}{h^2} . 10^{-7} \text{ [N];}$$

$$w = b + w_b \text{ [m]}$$

Por fim, a força radial distribuída ao longo de cada espira do enrolamento pode ser obtida pela Equação 3.8.

$$F_{axi-dist} = \frac{F_a}{\pi.D_m} \text{ [N/m]} \quad (3.8)$$

3.4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA ANALÍTICA EM UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 15 KVA

Este item tem como objetivo mostrar a aplicação da metodologia analítica para cálculos de estresses e forças eletromecânicas em um transformador de 15 KVA submetido a condições de curto-circuito trifásico. 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, o que facilita os cálculos analíticos. A Tabela 5 apresenta-se as características elétrica, magnética e geométrica do transformador trifásico de 15 KVA – 220/220 V (CHESF, 2008).

Tabela 5 – Características elétrica, magnética e geométrica do transformador de 15 KVA.

Potência do transformador	15 KVA	
Número de fases	3	
Tensão	Enrolamento Externo	220 V
	Enrolamento Interno	220 V
Tipo de ligação (enrolamentos com terminais acessíveis)	Enrolamento Externo	Estrela ou delta
	Enrolamento Interno	Estrela ou delta
Dimensões do fio de cobre	Enrolamento Externo	3,5 x 4,5 mm
	Enrolamento Interno	3,5 x 4,5 mm
Densidade de corrente	Enrolamento Externo	2,58 A/mm ²
	Enrolamento Interno	2,58 A/mm ²
Número de espiras	Enrolamento Externo	66 em duas camadas
	Enrolamento Interno	66 em duas camadas
Enrolamento interno	Diâmetro Externo	106×10^{-3} m
	Diâmetro Interno	87×10^{-3} m
Enrolamento externo	Diâmetro Externo	151×10^{-3} m
	Diâmetro Interno	132×10^{-3} m
Área aparente	Coluna	$49,996 \times 10^{-4}$ m ²
	Culatra	$52,826 \times 10^{-4}$ m ²
Área líquida	Coluna	$47,496 \times 10^{-4}$ m ²
	Culatra	$50,185 \times 10^{-4}$ m ²
Largura	Coluna	80×10^{-3} m
	Culatra	66×10^{-3} m
Densidade de fluxo magnético	Coluna	1,55 Tesla
	Culatra	1,44 Tesla
Impedância percentual	3,47%	
Frequência de operação	60 Hz	
Valor assimétrico da corrente de curto-circuito trifásico	Enrolamento Externo	2192 A
	Enrolamento Interno	2192 A

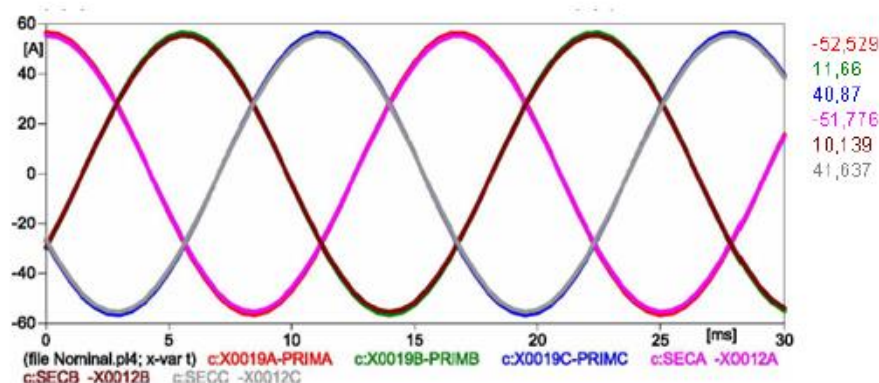
Fonte: UFU, 2008.

A corrente de curto-circuito trifásica apresenta um fator de impulso (f_i) de aproximadamente 1,36, o qual foi obtido em uma simulação realizada no software ATP (*Alternative Transient Program*). Este valor está totalmente coerente, pois o valor de $R\%$ considerado na simulação foi de 1%, através do valor de $Z\%$, igual a 3,47%, pode-se estimar o valor de $X\%$, o qual será de aproximadamente 3,3%. Assim, a relação $R\%/X\%$ será de 0,3. De acordo com a tabela 4 este valor representa um fator de impulso (f_i) aproximado de 1,38.

Os valores das correntes tanto para condição normal, quanto para o caso de curto-circuito trifásico, também foram obtidos através da simulação realizada no software ATP. O modelo de transformador utilizado foi o de 3 colunas conforme SARAIVA (2004).

A forma de onda e os valores das correntes nas três fases tanto no primário (enrolamento externo – alta tensão), quanto no secundário (enrolamento interno – baixa tensão) do transformador em condições nominais de operação são apresentados respectivamente na Figura 24 e na Tabela 6. Salienta-se, que o valor da corrente eficaz calculada para esta condição de operação é de 39,39 [A] ou de 55,70 [A] de pico, o qual está bem próximo ao obtido pela simulação (SARAIVA, 2004). Convém salientar que os valores de corrente apresentados na tabela 6 são instantâneos, onde o tempo utilizado foi de 8 ms.

Figura 24 – Forma de onda das correntes em condição normal de operação.



Fonte: Autor

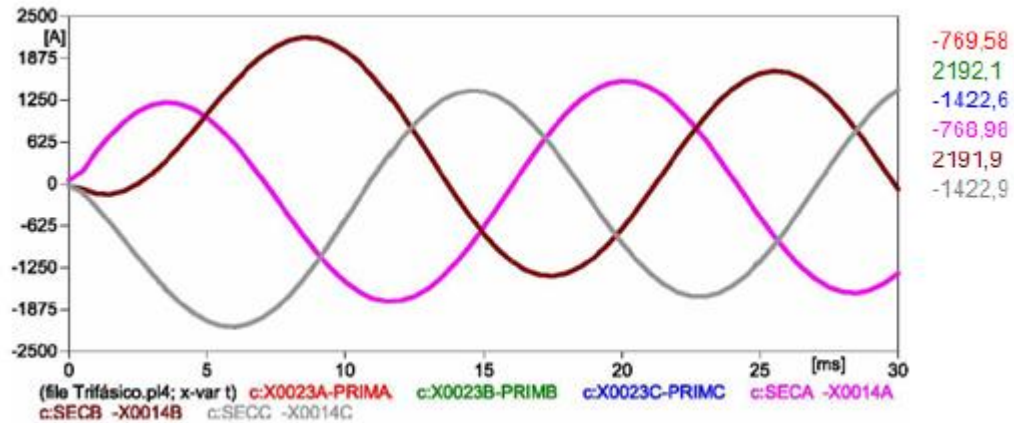
Tabela 6 – Valores instantâneos das correntes para condição normal de operação.

Corrente	Fase A [A]	Fase B [A]	Fase C [A]
Primário	-52,529	11,66	40,87
Secundário	-51,776	10,139	41,637

Fonte: Autor

A forma de onda e os valores das correntes de curto-circuito trifásico do enrolamento primário e do secundário, são apresentados respectivamente na Figura 25 e na Tabela 7.

Figura 25 – Forma de onda das correntes para um curto-circuito trifásico.



Fonte: Autor

Tabela 7 – Valores instantâneos das correntes para um curto-circuito trifásico.

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

Fonte: Autor

Através dos equacionamentos destacados nesse capítulo, e das Tabelas 6 e 7, foram realizados os cálculos para obter as forças e os estresses radiais e axiais.

3.4.1 Cálculo das forças e estresses radiais

As forças radiais total (F_r), média (F_{rmed}) e distribuída ($F_{rad-dist}$) foram obtidas, respectivamente, através das Equações 3.1, 3.2 e 3.3 para o enrolamento externo e interno, frente as correntes de pico para condição normal de operação (I_n) e para correntes assimétricas de curto-circuito trifásico ($I_{3\phi s}$). A Tabela 8 mostra os resultados encontrados.

Tabela 8 – Resultado das forças radiais para condição normal de operação (I_n) e curto-circuito trifásico ($I_{3\phi s}$).

Corrente	Enrolamento	Força Radial Total (F_r [N])	Força Radial Média (F_{rmed} [N])	Força Radial Distribuída ($F_{rad-dist}$ [N/mm])
I_n	Externo	23,367	7,433	$7,964 \times 10^{-4}$
	Interno	15,2667	4,861	$7,629 \times 10^{-4}$
$I_{3\phi s}$	Externo	$35,011 \times 10^3$	$11,144 \times 10^3$	1,1933
	Interno	$23,870 \times 10^3$	$7,599 \times 10^3$	1,193

Fonte: Autor

A partir da Equação 3.4 e dos valores da força radial distribuída elencados na Tabela 8, calcula-se o estresse radial médio nos enrolamentos ($\sigma_{r-medio}$), o qual poder ser visto na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultado dos estresses ocasionados pelas forças radiais para condição normal de operação (I_n) e curto-circuito trifásico ($I_{3\phi s}$).

Corrente	Enrolamento	Estresse Radial Médio ($\sigma_{r-medio}$ [N/mm ²])
I_n	Externo	$3,578 \times 10^{-3}$
	Interno	$2,335 \times 10^{-3}$
$I_{3\phi s}$	Externo	5,36
	Interno	3,65

Fonte: Autor

3.4.2 Cálculo das forças axiais

As forças e esforços axiais foram obtidos através das Equações 3.6, 3.7 e 3.8, frente às correntes de pico para condição normal de operação (I_n) e para correntes assimétricas de curto-circuito trifásico ($I_{3\phi s}$). A tabela 10 mostra os resultados encontrados.

Tabela 10 – Resultado dos esforços ocasionados pelas forças axiais para condição normal de operação (I_n) e curto-circuito trifásico ($I_{3\phi s}$).

Corrente	Enrolamento	Força Compressiva (F_c [N])	Força Extremidade (F_a [N])	Força Axial Distribuída ($F_{axi-dist}$ [N/mm])	Força Compressiva Total(F_{ct} [N])
I_n	Externo	1,1247	0,3864	$8,6922 \times 10^{-4}$	3,749
	Interno	2,6243	0,3704	$1,2217 \times 10^{-4}$	
$I_{3\phi s}$	Externo	$1,686 \times 10^3$	$0,579 \times 10^3$	1,302	$5,62 \times 10^3$
	Interno	$3,934 \times 10^3$	$0,579 \times 10^3$	1,909	

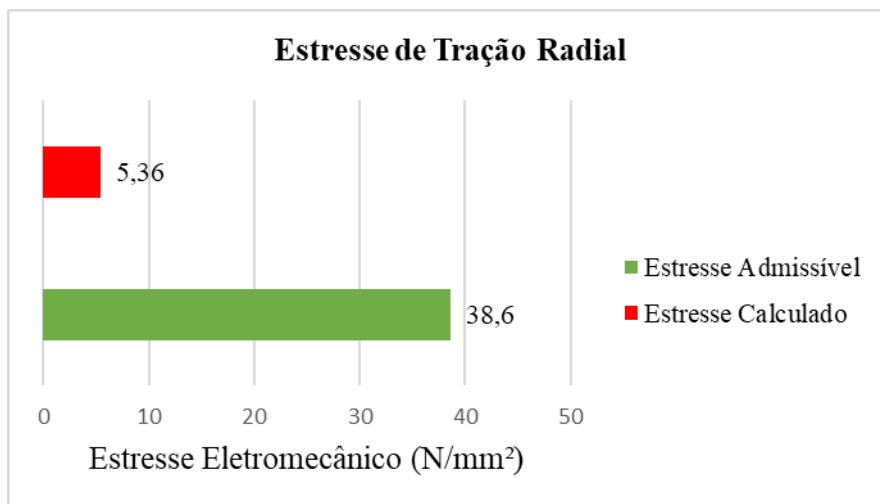
Fonte: Autor

3.4.3 Análise dos resultados

Em concordância com os resultados apresentados nos itens anteriores, neste momento objetiva-se apresentar uma análise comparativa entre o estresse de tração radial com o valor admissível pelo enrolamento, com a finalidade de identificar a possibilidade de danos físicos no transformador. O limite crítico adotado no presente trabalho foi baseado em WATERS (1966), para o alcance de valores mais precisos, devem-se realizar ensaios mecânicos nos condutores utilizados nos enrolamentos do equipamento (NBR, 1993).

A Figura 26 mostra a comparação entre o valor de referência para o estresse de tração radial máximo suportável e o valor calculado pelas formas analíticas.

Figura 26 – Estresse de tração radial no enrolamento externo do transformador comparado com o valor de estresse máximo suportável.



Fonte: Autor

Nota-se que o estresse de tração radial calculado é bem inferior ao limite máximo suportável, assim a possibilidade de ocorrência de uma falha mecânica é mínima.

Diante da inexistência de espaçadores tanto axiais, quando radiais, os efeitos do tipo flexão entre espaçadores radiais (*bending*), “deformação forçada” (*forced buckling*) e a “deformação livre” (*free buckling*) não foram analisados. Além disso, como o transformador não possui nenhum enrolamento do tipo disco, o efeito tombamento (*tilting*) também não foi analisado.

Este presente trabalho propõem ser o menos específico possível, não atribuindo assim particularidade de um sistema elétrico em questão. No entanto, se considerar algum nível de curto-circuito, espera-se que o valor da corrente assimétrica reduz devido a consideração de todos os elementos do sistema, fazendo com que as reduções nas forças eletromecânicas se darão com o quadrado da corrente reduzida, o que pode produzir uma redução considerável nos esforços.

4 REPRESENTAÇÃO DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO NO FEMM (*FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS*)

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No capítulo 3 foi abordado o emprego de uma metodologia analítica sobre a estimativa das forças eletromagnéticas e dos estresses mecânicos em transformadores. Essa estimativa também pode ser feita pelo emprego da técnica no domínio no tempo. Os softwares MATLAB, PSICE e EMTP são os principais programas que se utiliza essa técnica, no entanto, eles foram elaborados tomando-se como base a representação dos componentes dos sistemas elétricos, através de parâmetros distribuídos.

Outra técnica bastante utilizada e reconhecida internacionalmente para estes estudos é o método dos elementos finitos (MEF), o qual, é tecnicamente mais atrativo quando comparado com as outras duas alternativas apresentadas. Isso ocorre, pois, o MEF é uma ferramenta computacional que analisa os componentes dos sistemas de energia, tais como: transformadores, geradores, motores e dentre outros, de modo que seus parâmetros elétricos são considerados como sendo distribuídos. Além, disso, o mesmo possibilita a determinação das distribuições de campos e fluxos eletromagnéticos nos mais diversos componentes elétricos.

Mediante o exposto, este capítulo irá apresentar os estudos provenientes de uma simulação computacional, utilizando o MEF, para a obtenção e determinação dos estresses eletromecânicos do transformador de 15 KVA apresentado no capítulo anterior.

4.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Como visto, as equações de Maxwell descrevem os fenômenos eletromagnéticos, no entanto, para equipamentos com geometrias complexas a sua solução analítica é praticamente impossível. Neste caso, para obtenção de uma solução aproximada utiliza-se o método de cálculo numérico, como exemplo, o método de elementos finitos (MEF) que é um dentre os vários métodos conhecidos de cálculos numéricos para fenômenos eletromagnéticos.

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. Essa subdivisão é chamada de malha, sendo em geral constituída, no caso bidimensional, de triângulos e/ou quadriláteros, cujos vértices são chamadas de “nós das malhas”. Do fato de possuírem dimensões finitas, tais sub-

regiões são chamadas “elementos finitos”, provem daí o nome “Método dos Elementos Finitos”, estabelecido por Ray Clough, na década de 1950 (CARDOSO, 1995).

O MEF pode ser aplicado em inúmeras áreas, e analisar vários problemas físicos, com base na sua geometria e malha, onde monta-se um sistema de equações, a qual, permite determinar grandezas de interesses do fenômeno estudado, como exemplo, o eletromagnetismo, a transferência de calor, a eletroestática, etc. No caso do eletromagnetismo, temos como solução o vetor potencial magnético ou o potencial elétrico em cada nó da malha, através dos quais, é possível determinar os fluxos magnéticos ou elétricos no interior dos elementos finitos. Consequentemente, resulta-se os cálculos ou a obtenção das formas de onda da corrente, tensão dentre outras, as quais permitem obter parâmetros como: indutâncias, resistências capacitâncias, etc (CARDOSO, 1995).

Dos vários programas existentes baseados no MEF, escolheu-se o *Finite Element Method Magnetics* (FEMM) para a realização das simulações deste presente trabalho, que é um programa livre e que proporciona ferramentas para resolução de problemas em ambiente bidimensional (2D). Salienta-se, ainda, que o FEMM manipula internamente complicadas equações diferenciais que necessitam ser resolvidas quando se trabalha com magnetismo.

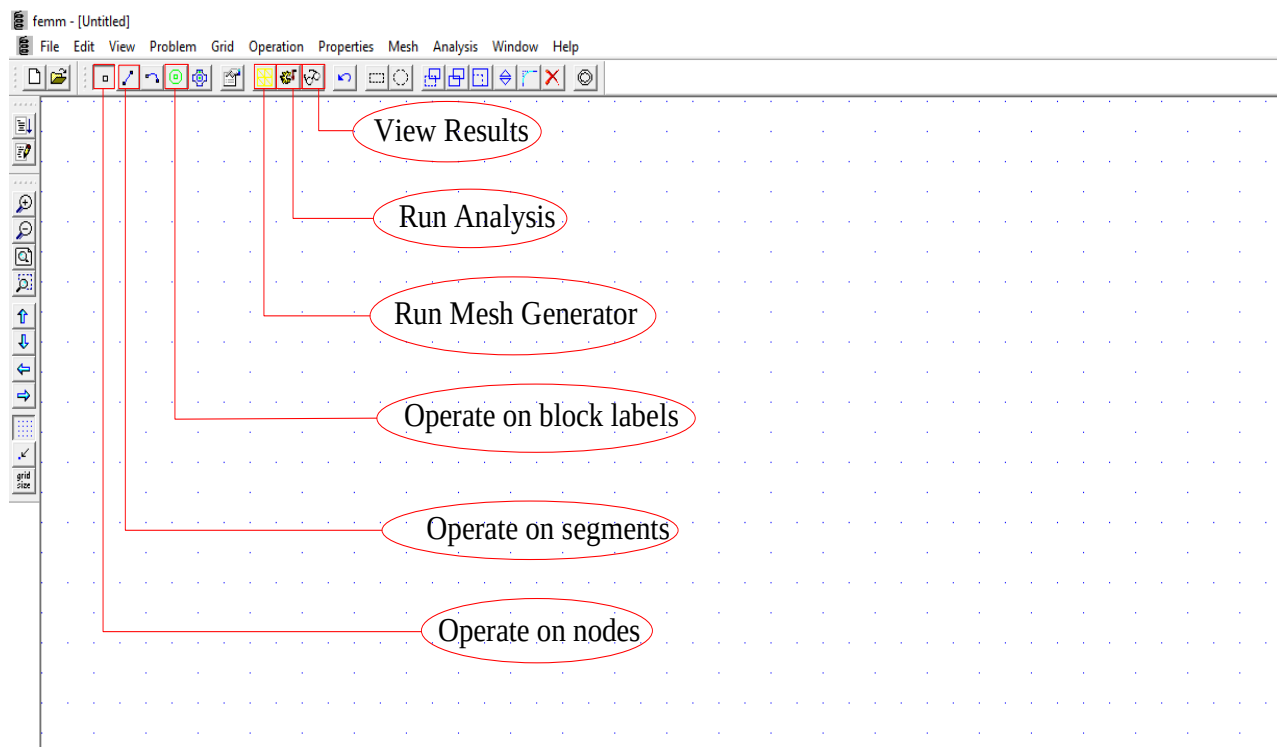
Como qualquer outro programa que utiliza a técnica de elementos finitos, a resolução de problemas físicos utilizando o FEMM é baseado nos seguintes módulos (AZEVEDO, 2007):

- Pré-processamento: consiste na definição da estrutura que permite descrever a geometria do problema, as propriedades físicas dos materiais, a densidade das malhas e as condições de contorno. Além disso, a malha de elementos finitos pode ser criada e visualizada nesta fase.
- Processamento: consiste na interpretação das informações definidas durante a fase de pré-processamento e na aplicação das equações de Maxwell pertinentes a resolução do problema, através da montagem de um sistema de equações diferenciais que descrevem o comportamento da estrutura sob análise.
- Pós-processamento: consiste-se de um programa gráfico que disponibiliza os resultados sob a forma de contornos e densidades. O usuário pode inspecionar a solução pontualmente, plotar resultados de interesse na forma de gráficos e calcular certas integrais.

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

Salienta-se, ainda, que o FEMM interage com o usuário através do femm.exe, onde existe uma múltipla interface com ferramentas relacionadas ao pré-processamento e pós-processamento, incluindo vários tipos de análises a serem processadas pelo programa. Pode-se citar, como exemplo, uma seção de CAD, a qual possibilita a criação da geometria do problema a ser resolvido, e onde se definem as propriedades físicas e as condições de contorno de fronteira. Ressalta-se, que arquivos “.DXF” do AutoCAD podem ser importados ao programa. A Figura 27 ilustra a interface gráfica do programa destacando as principais ferramentas.

Figura 27 – Interface gráfica do programa FEMM.



Fonte: Autor

Uma desvantagem apresentada pelo FEMM é que o modelo criado não pode ser conectado a um circuito elétrico externo. Dessa forma, as grandezas elétricas de entrada (como exemplo: tensão e corrente) devem ser impostas ao programa. No entanto, neste presente trabalho, esta deficiência foi resolvida utilizando o programa ATP (*Alternative Transient Program*), na extração das correntes elétricas a serem impostas aos enrolamentos do transformador.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 15 KVA

O transformador trifásico de 15 KVA com relação de tensão de 220/220V foi implementado e simulado no FEMM, com o intuito de analisar o desempenho elétrico,

magnético e mecânico. O equipamento possui três colunas (núcleo envolvido), com dois enrolamentos de dupla camada por fase, conectado em estrela, cujas características construtivas são ilustradas na Figura 28. As características geométricas, elétricas e magnéticas do transformador utilizado na modelagem são detalhadas na Tabela 5.

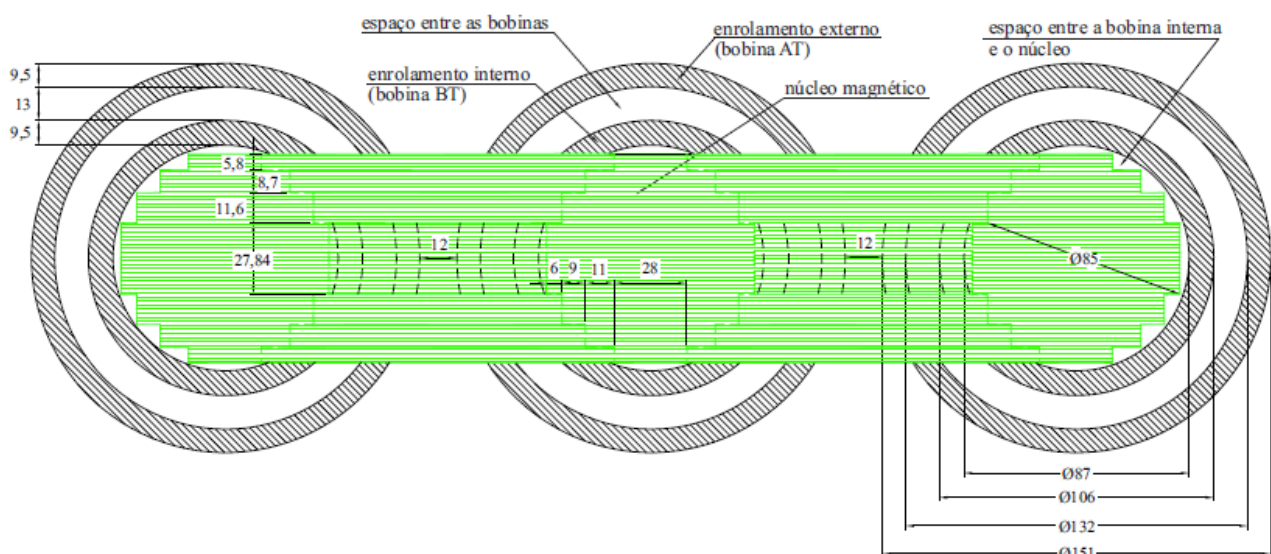
Figura 28 – Foto do transformador trifásico de 15 KVA utilizado na simulação.



Fonte: ROSENTINO, 2010.

Complementarmente as características apresentadas, a Figura 29 mostra a vista superior do transformador detalhando os enrolamentos externo e interno, o núcleo de ferro e algumas dimensões físicas necessárias para a implementação no programa FEMM.

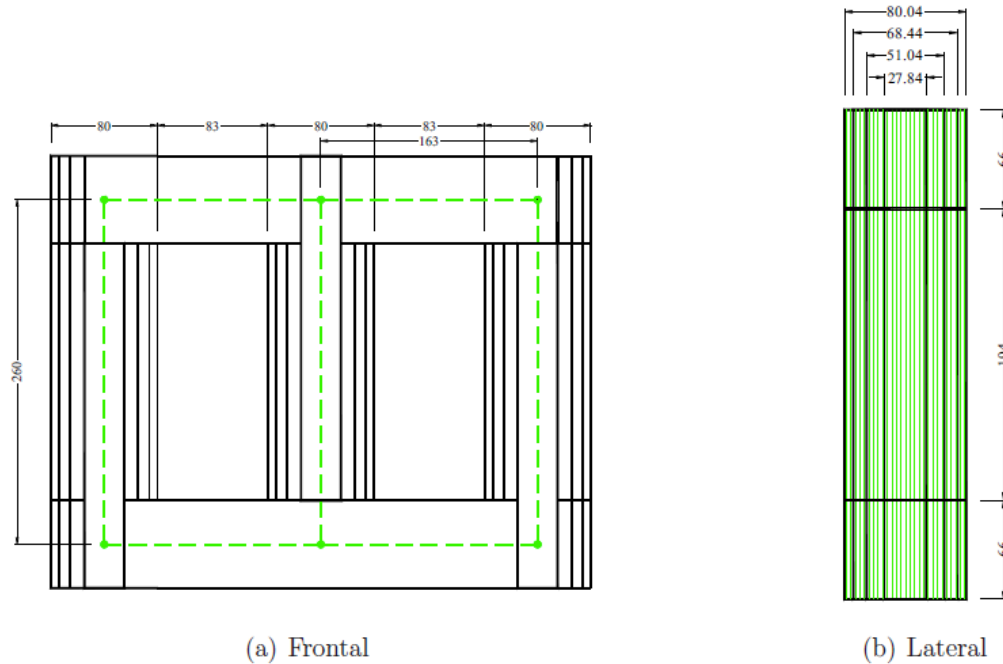
Figura 29 – Vista superior de corte do transformador trifásico (dimensões em milímetros).



Fonte: AZEVEDO, 2007.

As vistas, frontal e lateral do núcleo são ilustradas respectivamente pelas Figuras 30(a) e 30(b). Destaca-se que a figura 30(a) mostra o comprimento médio do fluxo magnético no núcleo (linha tracejada em verde).

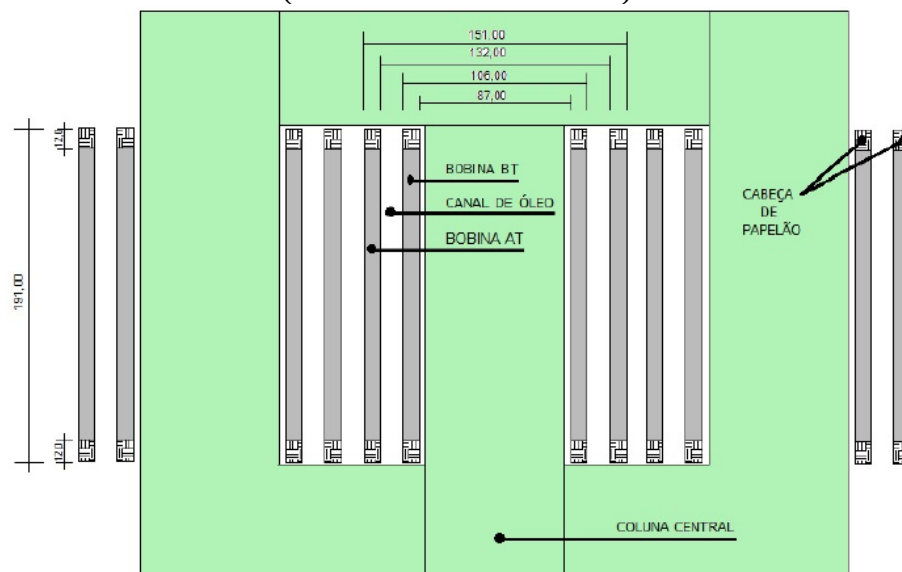
Figura 30 – Vista de corte do transformador trifásico: (a) frontal e (b) lateral (dimensões em milímetros).



Fonte: AZEVEDO, 2007.

Adicionalmente, a Figura 31 ilustra uma vista frontal do transformador, incluindo alguns detalhes dos enrolamentos.

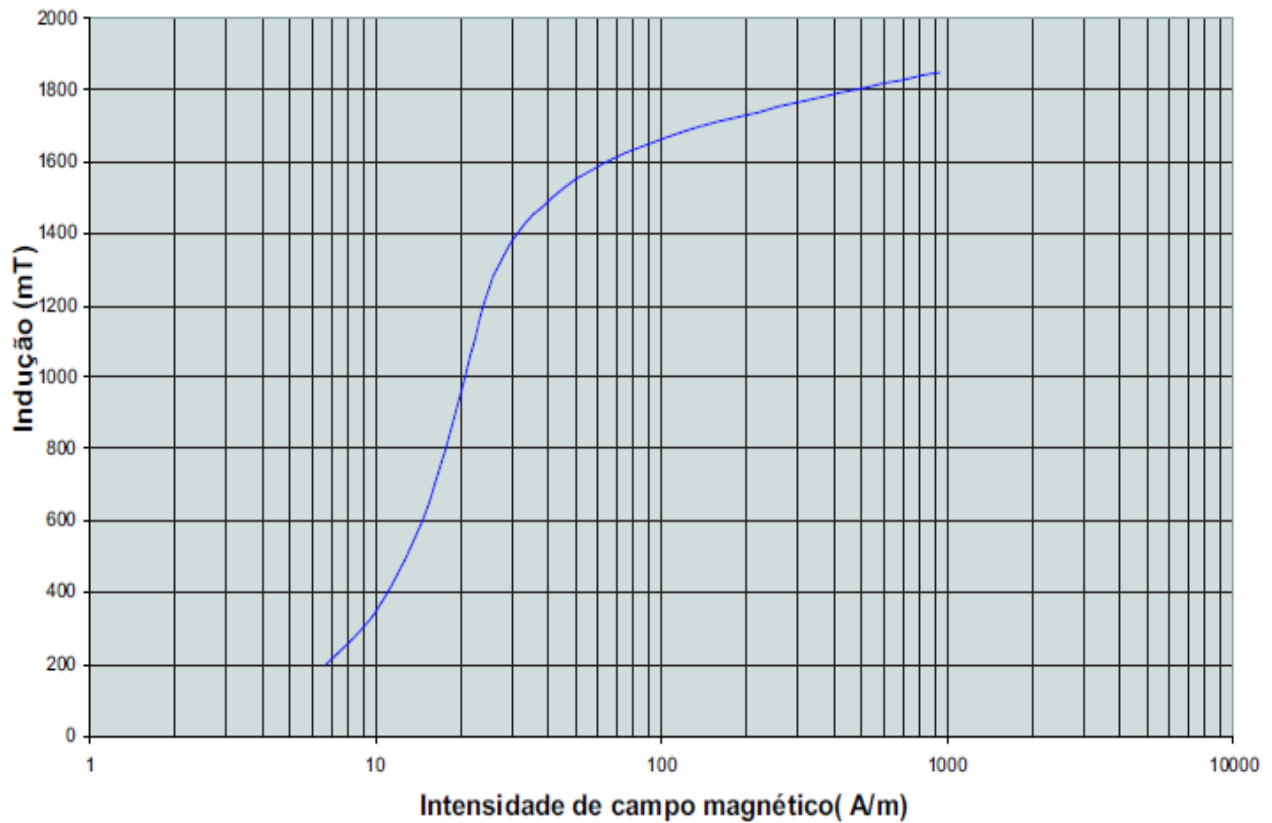
Figura 31 – Vista frontal de corte do transformador trifásico considerando os enrolamentos (dimensões em milímetros).



Fonte: ROSENTINO, 2010.

Para levar em conta os efeitos da saturação magnética, torna-se essencial a representação da característica de magnetização do equipamento. Assim, a Figura 32 ilustra a curva B-H da chapa de aço silício utilizada no núcleo do transformador.

Figura 32 – Curva de caracterização da magnetização da chapa de aço silício do transformador trifásico.



Fonte: AZEVEDO, 2007.

A Tabela 11 apresenta alguns pontos representativos da curva de magnetização exposta anteriormente.

Tabela 11 – Pontos representativos da curva B-H da Figura 4.6.

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.

4.4 MODELAGEM DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 15 KVA NO FEMM

O transformador será modelado em duas situações diferentes de operação. A primeira, analisa-se o equipamento operando em condição normal de operação. A segunda, analisa-se a situação do transformador submetido a um curto-circuito trifásico.

Para as duas operações, os procedimentos para as modelagens se basearam nas seguintes etapas:

- Criação da geometria do transformador no FEMM;
- Definição das propriedades físicas dos materiais relacionados à geometria;
- Utilização do programa ATP para obter as correntes elétricas em condições normal de operação e/ou de curto-circuito trifásico;
- Geração de Malhas;

- Solução da modelagem;
- Análise dos resultados obtidos.

O transformador possui em seu núcleo entreferros associados as colunas e culatras. Por questões de simplificação, no modelo implementado no FEMM, serão considerados três entreferros, que são: o entreferro associado a coluna externa direita e as culatras (lado direito) superior e inferior ($\mathfrak{R}_d$), o entreferro associado a coluna externa esquerda e culatra (lado esquerdo) superior e inferior ($\mathfrak{R}_e$) e o entreferro associado a coluna central ($\mathfrak{R}_c$). São empregados os valores de relutância obtidos por SARAIVA (2004), no entanto, o dado necessário para implementar no FEMM é sua espessura. Assim, de posse dos valores de relutância, são calculados os valores das espessuras dos entreferros (ℓ) por meio da Equação 4.1. Os valores das relutâncias e das espessuras dos entreferros são apresentados na Tabela 12.

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

Onde:

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

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

μ : Permeabilidade do ar, $\mu_0 = 4 \times \pi \times 10^{-7}$ [H/m];

A : Área da seção transversal da coluna [m²].

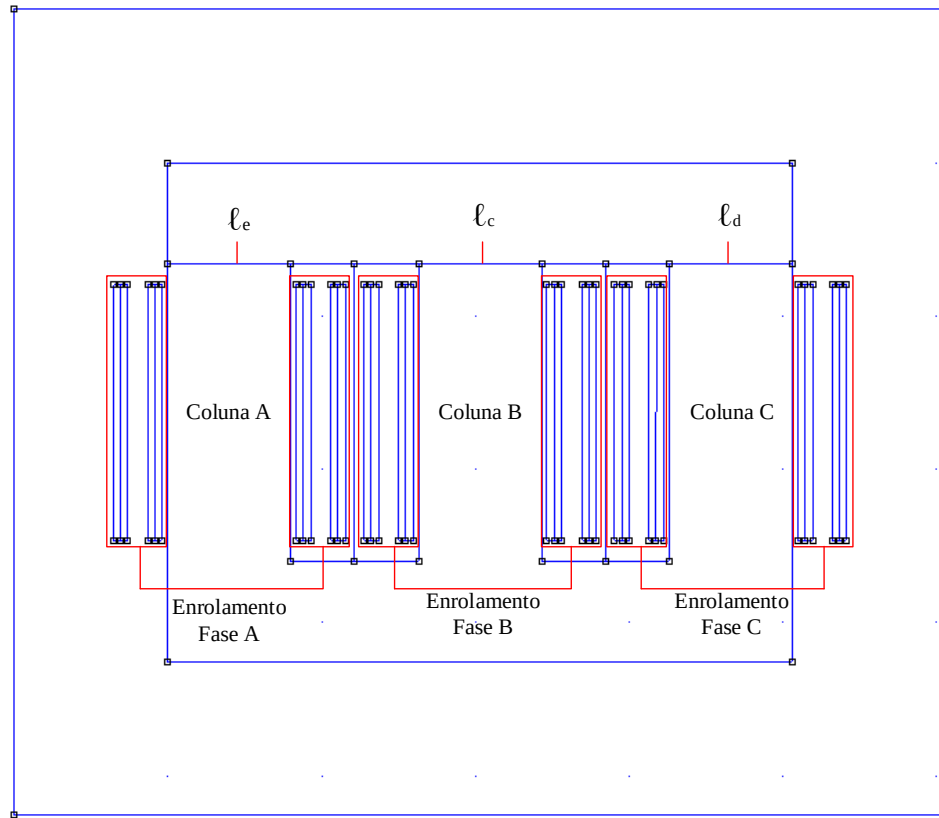
Tabela 12 – Valores das relutâncias e das espessuras do entreferro do transformador trifásico.

Coluna	Direita	Esquerda	Central
Relutância - $\mathfrak{R}$ [H^{-1}]	20294,19	20294,19	7547,36
Espessura do Entreferro ℓ [m]	1,211x10 ⁻⁴	1,211x10 ⁻⁴	0,4504x10 ⁻⁴

Fonte: Autor.

Por fim, o próprio tanque do transformador foi utilizado como sendo a condição de contorno do modelo. A Figura 33 ilustra a modelagem do transformador trifásico sob estudo.

Figura 33 – Geometria do transformador trifásico implementado no FEMM.



Fonte: Autor.

Ressalta-se, que foi utilizado um modelo planar com uma profundidade de 1 [mm]. Assim o valor da força obtida em cada condutor do enrolamento estará na unidade de [N/mm].

Para essa modelagem, quatro diferentes tipos de materiais foram criados, que são: AR, ENR_ALTA, ENR_BAIXA e ACO_SILICIO.

O material AR foi definido para as seguintes regiões: entreferros, janela do transformador e tanque. Salienta-se, que o propósito deste trabalho é totalmente relacionado a análise magnética, onde as propriedades do ar e do óleo são semelhantes, por isso o ar foi utilizado para representar o óleo. A principal propriedade inserida no modelo para este material é a sua permeabilidade relativa, cujo valor é igual a 1 (ROSENTINO, 2010).

Os materiais ENR_ALTA e ENR_BAIXA definem, respectivamente, os enrolamentos externos (Alta Tensão - AT) e internos (Baixa Tensão - BT). As propriedades definidas no FEMM para estes dois materiais também foram o ar, a diferença é que se tratando de materiais condutores, eles estão associados com circuitos elétricos.

Por fim, o material ACO_SILICIO foi definido para toda a região do núcleo ferromagnético, onde leva-se em conta a curva B-H da chapa de aço silício ilustrada na Figura 32.

A Figura 34(a) ilustra a definição do material ACO_SILICIO e a figura 34(b) do material AR (que também representa os materiais ENR_ALTA e ENR_BAIXA).

Figura 34 – Definição dos materiais do transformador no FEMM (a) ACO_SILICIO e (b) AR.

Block Property

Name: ACO_SILICIO

B-H Curve: Nonlinear B-H Curve

Linear Material Properties

Relative μ_x : 1 Relative μ_y : 1

ϕ_{hx} , deg: 0 ϕ_{hy} , deg: 0

Nonlinear Material Properties

Edit B-H Curve ϕ_{hmax} , deg: 0

Coercivity

H_c , A/m: 0

Electrical Conductivity

σ , MS/m: 20

Source Current Density

J , MA/m²: 0

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Laminated in-plane

Lam thickness, mm: 0.3 Lam fill factor: 0.95

Number of strands: 0 Strand dia, mm: 0

OK Cancel

Block Property

Name: AR

B-H Curve: Linear B-H Relationship

Linear Material Properties

Relative μ_x : 1 Relative μ_y : 1

ϕ_{hx} , deg: 0 ϕ_{hy} , deg: 0

Nonlinear Material Properties

Edit B-H Curve ϕ_{hmax} , deg: 0

Coercivity

H_c , A/m: 0

Electrical Conductivity

σ , MS/m: 0

Source Current Density

J , MA/m²: 0

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Not laminated or stranded

Lam thickness, mm: 0 Lam fill factor: 1

Number of strands: 0 Strand dia, mm: 0

OK Cancel

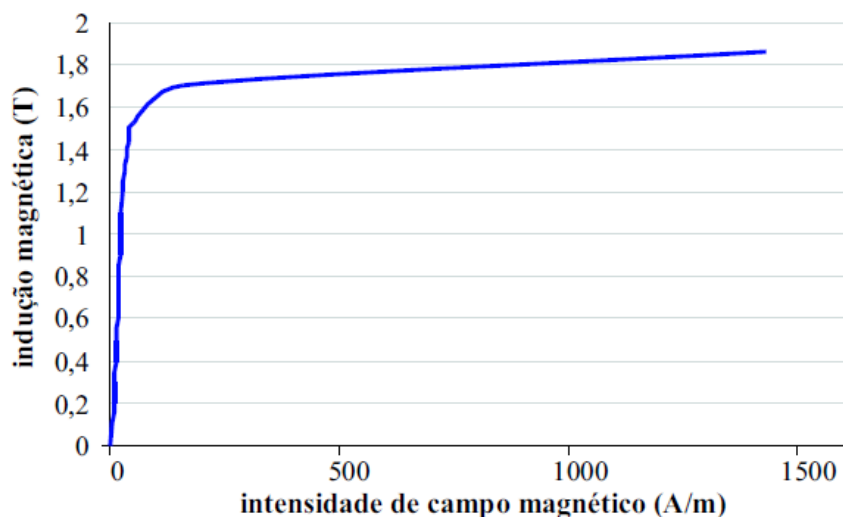
(a)

(b)

Fonte: Autor.

A Figura 35 ilustra a curva de magnetização da chapa de aço silício do transformador, gerada pelo programa FEMM, a partir dos pontos específicos da Tabela 11.

Figura 35 – Curva de magnetização da chapa de aço silício do transformador trifásico gerado no FEMM.



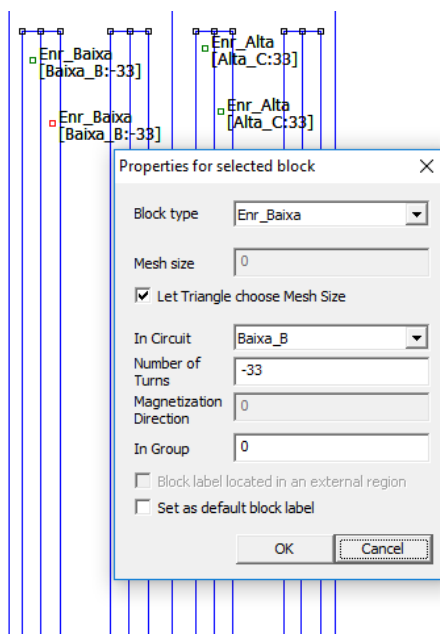
Fonte: Autor.

Conforme já apresentado, os materiais ENR_ALTA e ENR_BAIXA estão associados com os circuitos elétricos. Assim para o enrolamento externo (ENR_ALTA), foram criados os circuitos Alta_A, Alta_B e Alta_C e para o enrolamento interno (ENR_BAIXA), os circuitos Baixa_A, Baixa_B e Baixa_C. Cada um destes circuitos descreve os valores de corrente em cada enrolamento e em cada fase do transformador, portanto, na sua criação são solicitados os valores das correntes elétricas.

Para mostrar a definição dos diferentes elementos na geometria do transformador, a Figura 36 ilustra o procedimento para caracterizar a camada externa relacionada ao enrolamento interno da fase B.

No campo *Block type* é inserido o material, neste caso o ENR_BAIXA, no campo *In circuit* insere-se o circuito Baixa_B, o qual está sob análise. Quando a região é associada a um circuito, automaticamente é requerido o número de espiras. Neste caso, foi selecionado -33, onde o número 33 se refere a quantidade de espiras presentes na camada externa e o sinal negativo refere-se ao sentido da corrente.

Figura 36 – Caracterização da camada externa relacionada ao enrolamento interno da fase B.



Fonte: Autor.

Para implementar no FEMM os valores das correntes, tanto para condição normal de operação, quanto para o caso de curto-circuito trifásico, foram realizadas simulações no programa ATP. Os gráficos e valores das correntes simuladas encontra-se no Capítulo II. Ressalta-se que a análise por intermediação dos elementos finitos é estática, no caso do FEMM. Assim, para cada situação, o instante de tempo a ser analisado é aquele cuja corrente seja máxima.

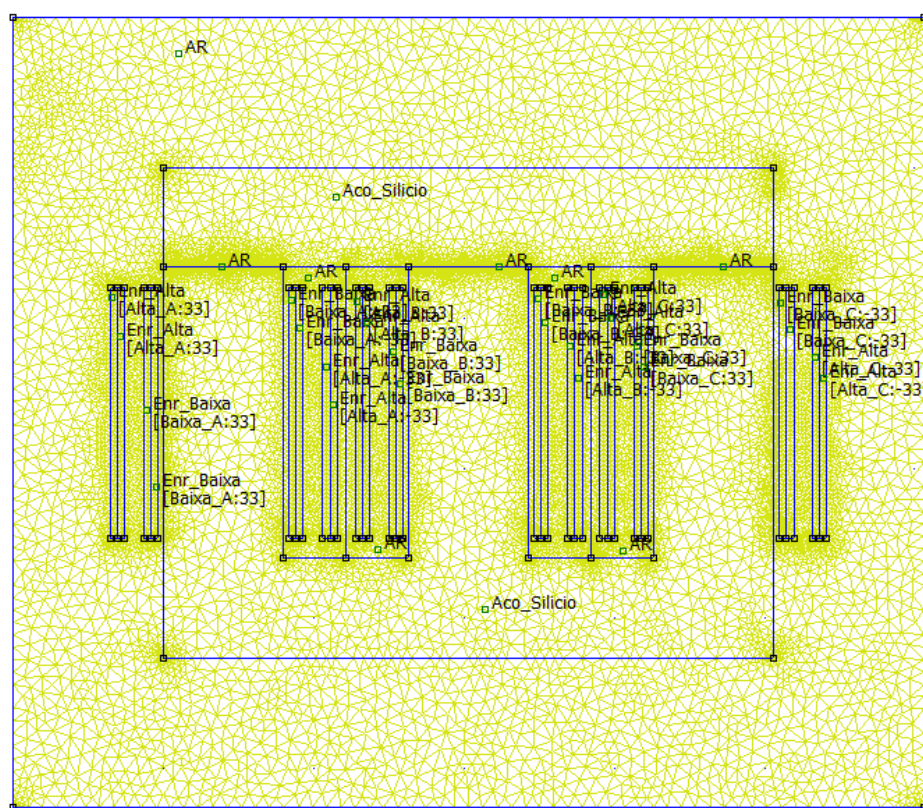
4.4.1 Simulação do transformador trifásico de 15 kVA sob condição normal de operação

Nesta primeira situação operativa imposta ao transformador, as correntes elétricas possuem picos reduzidos, fazendo com que os fluxos de dispersão se tornem pequenos também. Portanto, espera-se que essa situação não cause falhas mecânicas nos enrolamentos. No entanto, essa é a situação onde mais se conhece os resultados elétricos e magnéticos. Assim, se as simulações apresentarem resultados que coincidem com os valores informados pelo fabricante, a modelagem torna-se coerente.

Como dado de entrada para as simulações deste primeiro caso, foram utilizados os valores das correntes para condição normal de operação apresentados na Tabela 6, os quais foram determinados através das simulações no programa ATP. Salienta-se, que o instante analisado é aquele onde ocorre os picos de corrente na fase B.

A malha de elementos finitos gerada para a estrutura do transformador trifásico esta ilustrada na Figura 37. Essa malha é do tipo triangular através da criação por partes do software de 63848 nós.

Figura 37 – Malha de elementos finitos do transformador trifásico de 15 KVA geradas no FEMM.

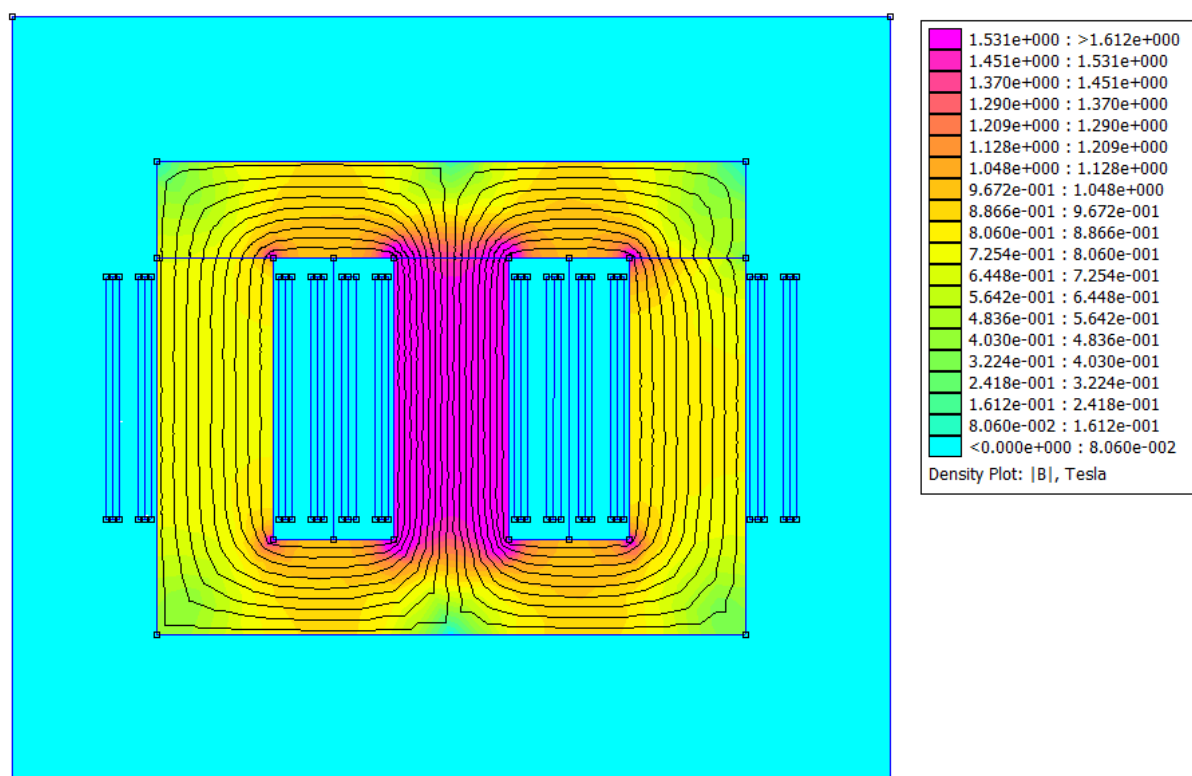


Fonte: Autor.

Após a criação das malhas, entra-se para a fase de processamento. Nesta condição de estudo, interessa-se em visualizar o comportamento da distribuição da densidade de fluxo no núcleo do transformador.

Dentro destes aspectos, a Figura 38 ilustra a distribuição de fluxo magnético no interior do transformador para a condição normal de operação, para o instante quando o fluxo é máximo na fase B.

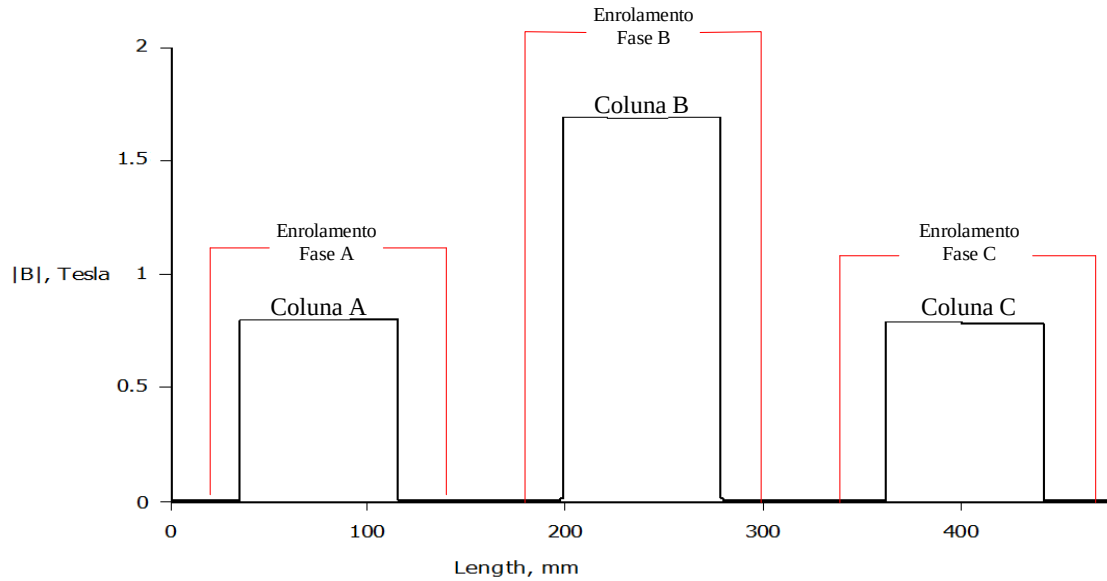
Figura 38 – Distribuição da densidade de fluxo magnético para condição normal de operação.



Fonte: Autor.

Através da Figura 38, observa-se que a densidade da coluna central vale aproximadamente 1,55 [T], ou seja, igual ao valor informado pelo fabricante. Adicionalmente, a Figura 39 ilustra o comportamento da densidade de fluxo ao longo do transformador. Isto foi realizado traçando uma linha desde o ponto médio da camada externa do enrolamento externo da fase A, até o ponto médio da camada externa do enrolamento externo da fase C.

Figura 39 – Densidade de fluxo nas colunas do transformador e nas regiões entre os enrolamentos de cada fase para a condição normal de operação.



Fonte: Autor.

Percebe-se que o fluxo de dispersão entre o enrolamento interno e externo das fases é quase desprezível. Desta forma, o produto vetorial entre a densidade de fluxo de dispersão e da corrente em condição normal de operação, produzirão forças eletromagnéticas reduzidas.

Como dito anteriormente, o modelo implementado faz uso de uma modelagem planar, o que acarreta na necessidade da interpretação dos valores em [N/mm]. Como o objetivo é estimar o valor total da força radial em [N], deve-se realizar uma média entre os valores das forças radiais entre os lados direito e esquerdo do enrolamento, depois multiplica-lo pelo comprimento médio da espira, assumindo como $\pi.141,5$ [mm] para as espiras do enrolamento externo e $\pi.96,5$ [mm] para as espiras do enrolamento interno.

Por fim, a Tabela 13 apresenta as forças radiais totais impostas nos enrolamentos interno e externo para condição normal de operação, e os valores encontrados pela metodologia analítica no capítulo anterior, para uma possível comparação.

Tabela 13 – Forças radiais totais impostas nos enrolamentos interno e externo para condição normal de operação.

Análise	F_r [N] - Enrolamento Interno	F_r [N] - Enrolamento Externo
FEMM	14,1786	21,1635
Analítica	15,2667	23,367

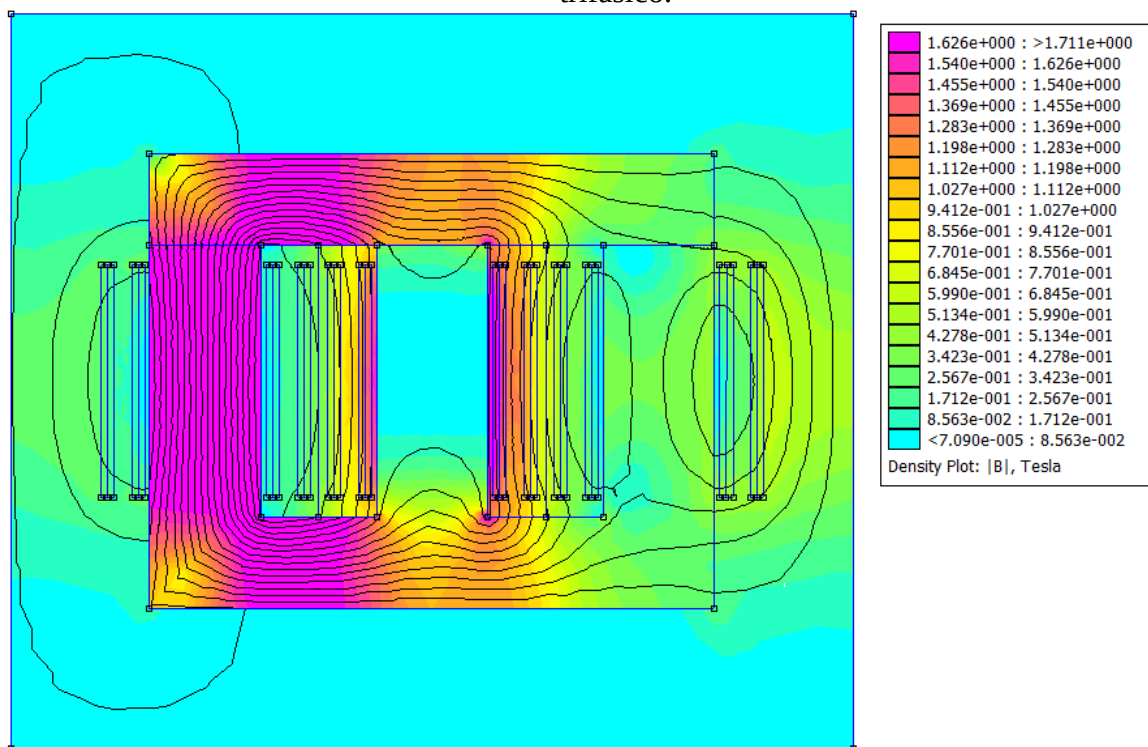
Fonte: Autor.

4.4.2 Simulação do transformador trifásico de 15 kVA sob curto-circuito trifásico

Nesta segunda situação operativa o transformador está submetido à um curto-circuito trifásico assimétrico. Para essa simulação foi utilizado os valores das correntes apresentados na Tabela 7, os quais foram determinados através das simulações no programa ATP. Salienta-se, que o instante analisado é aquele onde ocorre os maiores picos de corrente assimétrica, ou seja, na fase B. Assim, a atenção dos estudos será voltada as forças eletromecânicas ocorrentes nessa fase.

Depois de inserir os valores das correntes no FEMM, foi gerada a malha de elementos finitos, idêntica àquela exibida pela Figura 37, a qual, após a fase de processamento, permite visualizar a distribuição do fluxo magnético no interior do transformador quando submetido a um curto-circuito trifásico, para o instante quando o fluxo é máximo na fase B, que pode ser observada na Figura 40.

Figura 40 – Distribuição da densidade de fluxo magnético para condição de curto-circuito trifásico.



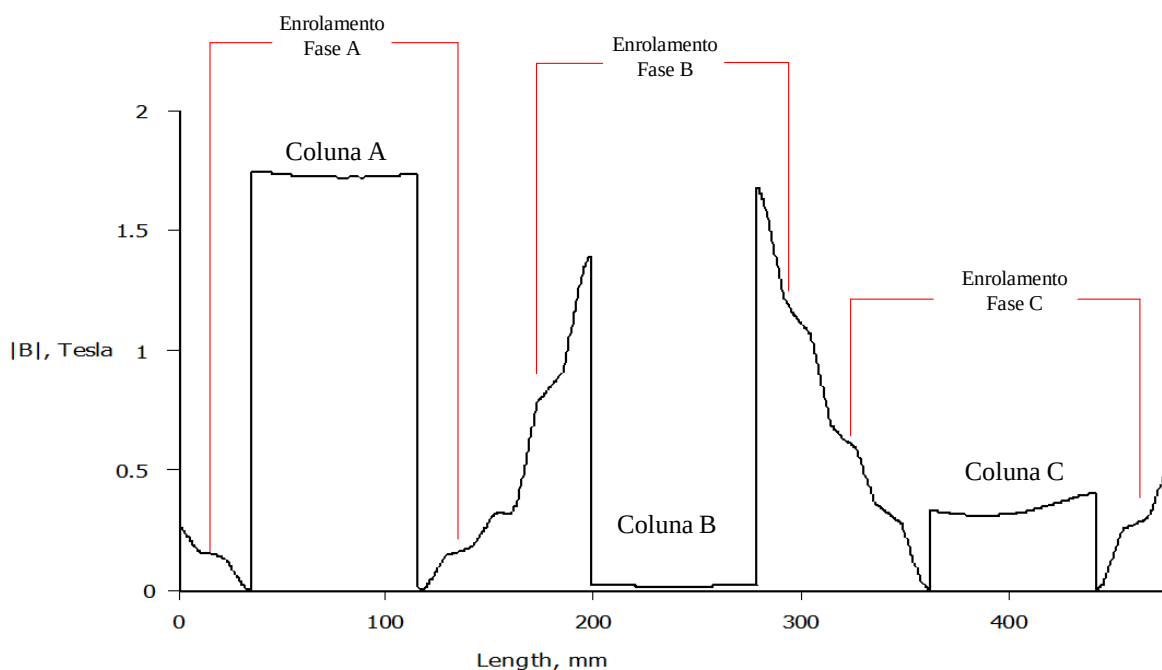
Fonte: Autor.

Contrário ao caso anterior, através da Figura 40, observa-se que grande parte da densidade de fluxo magnético concentra-se entre os enrolamentos da fase B, o qual é de aproximadamente 1,1 [T]. Neste sentido, o valor de fluxo de dispersão associado a elevada corrente de curto-circuito trifásico no enrolamento, produzirão elevados esforços eletromecânicos. Nota-se, que houve uma redução significativa na densidade do fluxo

magnético no núcleo ferromagnético. Isto ocorre, pois na condição de curto-circuito trifásico, quase todo fluxo fica distribuído no óleo.

Análogo ao caso anterior, também foi obtido uma curva representada pela Figura 41, que ilustra o comportamento da densidade de fluxo magnético ao longo do transformador, onde observa-se a redução da concentração de fluxo magnético nas colunas e o aumento de fluxo de dispersão entre os enrolamentos interno e externo de cada fase.

Figura 41 – Densidade de fluxo nas colunas do transformador e nas regiões entre os enrolamentos de cada fase para a condição de curto-circuito trifásico.



Fonte: Autor.

A seguir são apresentados os resultados referentes as forças radiais e axiais devido a condição de curto-circuito trifásico, para os enrolamentos da fase B do transformador. Confrontando-os com aqueles obtidos analiticamente.

a) Forças Radiais

Para obtenção das forças radiais distribuídas, realiza-se uma média das forças distribuídas entre os lados direito e esquerdo do enrolamento, dividindo-se o resultado pelo comprimento médio da espira, conforme já mostrado anteriormente. A Tabela 14 mostra esses valores de força radial distribuída em [N/mm] para cada enrolamento, os quais são comparados com aqueles estimados pela metodologia analítica no capítulo anterior.

Tabela 14 – Forças radiais distribuídas impostas nos enrolamentos interno e externo para condição de curto-circuito trifásico.

Análise	$F_{rad-dist}$ [N/mm] - Enrolamento Interno	$F_{rad-dist}$ [N/mm] - Enrolamento Externo
FEMM	1,1728	1,1745
Analítica	1,193	1,1933

Fonte: Autor.

Para obter o valor total da força radial em [N], deve-se realizar uma média entre os valores das forças radiais entre os lados direito e esquerdo do enrolamento, depois multiplicá-lo pelo comprimento médio da espira, conforme visto anteriormente. A Tabela 15 apresenta os valores da força radial para cada enrolamento e os valores obtidos pela metodologia analítica.

Tabela 15 – Forças radiais totais impostas nos enrolamentos interno e externo para condição de curto-circuito trifásico.

Análise	F_r [N] - Enrolamento Interno	F_r [N] - Enrolamento Externo
FEMM	22,675x10 ³	31,750x10 ³
Analítica	23,870x10 ³	35,011x10 ³

Fonte: Autor.

Através das Tabelas 14 e 15, observa-se que os resultados são bem próximos. Enfatiza-se, que as estimativas das forças radiais distribuídas, são de grande importância, pois observa-se pela Equação 3.4 que a partir das mesmas, estimam-se os valores dos estresses eletromecânicos. Assim, a Tabela 16 apresenta os valores do estresse radial médio para o enrolamento interno e externo do transformador, quando submetido a um curto-circuito trifásico.

Tabela 16 – Estresses radiais médios nos enrolamentos interno e externo para condição de curto-circuito trifásico.

Análise	$\sigma_{r-medio}$ [N/mm ²] - Enrolamento Interno	$\sigma_{r-medio}$ [N/mm ²] - Enrolamento Externo
FEMM	3,6007	5,2568
Analítica	3,65	5,36

Fonte: Autor.

b) Forças Axiais

Através da Figura 40, observa-se que as maiores forças axiais estão localizadas nas extremidades dos enrolamentos. Para calcular o valor total da força axial em [N], deve-se realizar uma média entre os valores das forças axiais entre os lados direito e esquerdo da parte superior ou inferior do enrolamento, depois multiplicá-lo pelo comprimento médio da espira, conforme realizado para as forças radiais. A Tabela 17 apresenta os valores da força axial para cada enrolamento e os valores obtidos pela metodologia analítica.

Tabela 17 – Força axial nas extremidades dos enrolamentos interno e externo para condição de curto-circuito trifásico.

Análise	F_a [N] - Enrolamento Interno	F_a [N] - Enrolamento Externo
FEMM	$0,357 \times 10^3$	$0,477 \times 10^3$
Analítica	$0,579 \times 10^3$	$0,579 \times 10^3$

Fonte: Autor.

Embora, a somatória das forças axiais se aproxima para um valor igual a zero, haverá uma força compressiva na metade de ambos os enrolamentos (ROSENTINO, 2010). Por fim, a Tabela 18 apresenta os valores das forças compressivas totais para o enrolamento externo e interno, e da força axial compressiva total, cujo valor é o somatório das forças compressivas dos enrolamentos, os quais podem ser comparados com os obtidos na metodologia analítica.

Tabela 18 – Força axial compressiva total nos enrolamentos interno e externo para condição de curto-circuito trifásico.

Análise	F_c [N] - Enrolamento Interno	F_c [N] - Enrolamento Externo	F_{ct} [N]
FEMM	$2,226 \times 10^3$	$3,072 \times 10^3$	$5,298 \times 10^3$
Analítica	$3,934 \times 10^3$	$1,686 \times 10^3$	$5,62 \times 10^3$

Fonte: Autor.

Através das Tabelas 17 e 18, nota-se a discrepância entre os resultados apresentados pelo FEMM e os obtidos na metodologia analítica. Isso ocorre principalmente pela proximidade do tanque e a presença das colunas vizinhas, os quais influenciam o cálculo das forças axiais nas extremidades dos enrolamentos. Outro ponto determinante, é que a distribuição de fluxo

nas extremidades torna-se não uniforme, assim, não é possível obter um resultado analítico preciso.

Nota-se uma divergência alta na força compressiva para os enrolamentos interno e externo. De acordo com WATERS (1966) 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, essa mesma referência considera que, para a maioria dos transformadores, aproximadamente dois terços da força total é atribuída ao enrolamento interno e o restante ao enrolamento externo. Sendo assim, verificou-se divergência entre essa consideração e os resultados obtidos por meio do método dos elementos finitos. Isto se justifica pois, na simulação computacional notou-se uma proporção diferente na distribuição da força total.

Ressalta-se que estas diferenças já eram de se esperar, tendo em vista que existe maior complexidade para a estimativa das forças axiais. Assim, as aproximações utilizadas para obter os esforços analiticamente podem ter resultados não tão exatos, principalmente por não se levar em conta a não uniformidade do campo de dispersão radial.

Por fim, verifica-se que a metodologia analítica para as forças axiais, devido as suas aproximações pode se distanciar da exatidão. Já o programa FEMM, devido a modelagem bidimensional, considera as características geométricas e magnéticas do transformador, desta forma, tem-se resultados mais exatos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo final, apresenta-se uma sinopse dos resultados alcançados e das contribuições oferecidas na pesquisa aqui descrita.

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de entender melhor, os esforços eletromagnéticos, e conseqüentemente as falhas mecânicas ocasionadas por uma corrente de curto-circuito trifásica. O trabalho tem como um dos seus pilares a tese de doutorado “ Estresse Eletromecânicos em Transformadores Causado por Curtos-Circuitos Passantes e Correntes de Energização” desenvolvida por Ana Claudia de Azevedo.

O capítulo 1 apresentou os principais objetivos desse trabalho, retratando uma breve contextualização sobre a importância dos transformadores para o sistema elétrico de potência. Buscando entender melhor o processo de falhas, apresentou-se a maioria dos problemas que ocorrem em transformadores, que são de origem mecânica, térmica, dielétrica e química. Além disso mostrou a importância em desenvolver novas pesquisas relacionadas a falhas mecânicas em transformadores.

O capítulo 2 apresentou a origem das falhas, e fez uma caracterização das falhas eletromecânicas. Além de mostrar as propriedades da corrente de curto-circuito, enfatizou a corrente de curto-circuito trifásica assimétrica.

Ainda nesse capítulo, mostrou-se que as principais forças que atuam no enrolamento são as axiais e radiais. As axiais são ocasionadas pela componente de campo agindo radialmente nos enrolamentos e as radiais pela componente de campo agindo axialmente. Mostrou ainda, que os principais tipos de falhas ocasionadas por essas forças são os estresses de compressão e de tração nos enrolamentos.

Nesse sentido, o capítulo 3 caracterizou essas falhas, porém de forma analítica. Verificou-se que as forças radiais podem ser calculadas com o uso de uma metodologia mais simples, enquanto que as forças axiais são calculadas de uma forma aproximada pelo método ampère-espira residual. Essa metodologia analítica foi exemplificada em um transformador trifásico de 15 KVA, para duas situações diferentes, a primeira quando está em regime normal de operação e a segunda quando submetido a um curto-circuito trifásico assimétrico.

O capítulo 4, apresentou-se o método dos elementos finitos, e modelou o transformador exemplificado no capítulo 3 no programa FEMM, tal modelagem possibilitou extrair os esforços eletromecânicos produzidos nos enrolamento quando submetidos a um curto-circuito trifásico, os quais foram comparados com aqueles obtidos pela metodologia analítica.

Comprovou-se, através da simulação, que as forças radiais se concentram no ponto médio do enrolamento, enquanto que as forças axiais se encontram nas extremidades. Para as forças e esforços radiais foi constatado uma boa proximidade dos resultados. Já as forças axiais, apresentaram uma discrepância maior, devido a não uniformidade do fluxo de dispersão nas extremidades do enrolamento.

Apesar de todas as limitações apresentadas neste presente trabalho, a metodologia computacional desenvolvida pode servir como base em projetos de transformadores, com o intuito que eles sejam capazes de suportar os esforços eletromecânicos resultantes das correntes de curto-circuito.

Atualmente, mesmo com toda a tecnologia empregada na construção dos transformadores, não se sabe quantos curtos-circuitos o equipamento é capaz de suportar sem que seja danificado. Isso acontece pela dificuldade que se tem em investigar as deformações, pois é praticamente impossível retirar de operação transformadores para realizar estudos e ensaios.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a finalização deste trabalho, mesmo reconhecendo que os principais objetivos tenham sido atingidos, se faz necessário apresentar algumas sugestões para um maior aprofundamento do tema, que são:

- Efetuar a modelagem computacional das componentes axiais e radiais, para avaliar os estresses causados nos enrolamentos de transformadores;
- Efetuar estudos que permita avaliar quantos curtos-circuitos o transformador é capaz de suportar.
- Estudos em transformadores com potência e geometrias diferentes;
- Estudos de técnicas que sejam capazes de monitorar as condições dos enrolamentos;
- Estudos experimentais para avaliar os estresses mecânicos nos enrolamentos. Comparar os valores medidos com os obtidos analiticamente e computacionalmente.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, E. R., **Análise de Resposta em Frequência Aplicada em Transformadores de Potência**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2007.
- AZEVEDO, A. C. **Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado por Curtos-Circuitos “Passantes” e Correntes de Energização**. 2007, f. 159, Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- AZEVEDO, A. C., et. al., **Transformer Mechanical Stress Caused by External Short-circuit: a Time Domain Approach**. 7th International Conference on Power Systems Transients, France, June/2007.
- BARRA, Pedro Henrique Aquino. **Estresse eletromecânico em transformadores sob o enfoque de curtos-circuitos assimétricos: uma abordagem analítica e computacional**. 2017. 148 f. Tese (Mestrado) Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017
- BARTLEY P. E., W. H., **Analysis of Transformer Failures**. International Association of Engineering Insurers, 36th Annual Conference, Stockholm, 2003.
- 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, Groupe 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.
- DELAIBA, A. C., **Análise dos Efeitos Térmicos e Dinâmicos Provocados pela Corrente de Curto-Circuito**. Apostila de Subestações, Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- FOLDI, J., et. al. **Recent Achievements in Performing Short-Circuit Withstand Tests on Large Power Transformers in Canada**. Session 12-201, CIGRE, 2000.
- GRIGOLETTO, F. A. **Análise comparativa entre as metodologias ANSI e IEC para o cálculo do curto-circuito em sistemas industriais**. 2013. 245 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.
- IEC 60076. **Ability to withstand short circuit**. 2nd ed. Part 5, 2000.
- KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer Engineering: Design and Practice**. USA: Marcel Dekker, Inc., 2004.

MEDINA P., M. C., **Falhas em Transformadores de Potência: Uma Contribuição para Análises, Definições, Causas e Soluções**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2003.

NBR 5356-5, **Transformadores de Potência – Parte 5: Capacidade de Resistir a Curtos-Circuitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, NBR 5356, 1993.

ROSENTINO, A. J. J. P. **Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-Circuito Trifásico**. 2010. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

SARAIVA, E., **Modelagem de Transformadores de Três Colunas com Base na Distribuição de Fluxos Magnéticos no Núcleo, Considerando o Efeito do Ciclo de Histerese**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, 2004.

WANG, M., et. al, **Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service**. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.18, No.6, November/December, 2002.

WATERS, M., **The Short-Circuit Strength of Power Transformers**. Macdonald & Co., London, 1966.