



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – UFPA
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ – CAMTUC
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA – FEM

Maciel da Costa Furtado

**ANÁLISE DE ESFORÇOS MECÂNICOS NOS ENROLAMENTOS DE
TRANSFORMADORES OCASIONADOS POR CORRENTES DE
ENERGIZAÇÃO UTILIZANDO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

TUCURUÍ-PA

2013

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – UFPA
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ – CAMTUC
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA – FEM**

Maciel da Costa Furtado

***ANÁLISE DE ESFORÇOS MECÂNICOS NOS ENROLAMENTOS DE
TRANSFORMADORES OCACIONADOS POR CORRENTES DE ENERGIZAÇÃO
UTILIZANDO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS***

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Colegiado do Curso de
Engenharia Mecânica para obtenção do
grau de Engenheiro Mecânico.

**Orientador: Prof. M.Sc Wellington da
Silva Fonseca**

TUCURUÍ-PA

2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – UFPA
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ – CAMTUC
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA – FEM

Maciel da Costa Furtado

***ANÁLISE DE ESFORÇOS MECÂNICOS NOS ENROLAMENTOS DE
TRANSFORMADORES OCACIONADOS POR CORRENTES DE ENERGIZAÇÃO
UTILIZANDO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do
grau de Engenheiro Mecânico

Data da defesa: 06 de fevereiro de 2013

Conceito: _____

Banca Examinadora

Prof. M.Sc. Wellington da Silva Fonseca
Faculdade Engenharia Mecânica/UFPA – Orientador

Prof. Dr. Newton Sure Soeiro
Faculdade Engenharia Mecânica/UFPA – Membro

Engenheiro Gilton Carlos de Andrade Furtado
Engenheiro Mecânico Eletrobrás/Eletronorte - Membro

*Dedico aos meus pais, Juscemir Garcia Furtado e
Maria do Carmo da Costa Furtado.
Aos meus irmãos, Jonilson da Costa Furtado,
Jaqueline da Costa Furtado e
Juliana da Costa Furtado pelo crédito e apoio.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Juscemir Garcia Furtado e Maria do Carmo da Costa Furtado agradeço pelo amor, dedicação, carinho, afeto, paciência, e por todo esforço para criar não somente a mim, mas também todos os meus irmãos, Jonilson Furtado, Jaqueline Furtado e Juliana Furtado que hoje em sua grande parte são profissionais formados e com futuro brilhante pela frente graças a essas duas pessoas maravilhosas que nos trouxe no mundo. Pai e mãe muito obrigado.

A família dos meus tios, Jorge Furtado e Judith Furtado, Orlando Louzada e Amélia Louzada pela compreensão, paciência e amizade dedicada durante anos. A eles também devo muito de minha conquista, pois possibilitou que eu desenvolva-se meu curso de graduação da melhor forma possível, mostrando força e perseverança sem igual, bem como muita confiança em mim e nos meus trabalhos.

A meu primo Wellington Louzada e sua esposa Nilda Louzada e sua família maravilhosa por ter me acolhido em sua casa no primeiro ano de curso. A eles também agradeço por todo suporte e companheirismo em todo o momento que estive em sua casa.

Meus agradecimentos de maneira muito especial ao professor Wellington da Silva Fonseca, meu orientador, pelo incentivo e pelas discussões produtivas que culminaram no desenvolvimento deste trabalho. Ao colega Diorge Lima, atualmente estudante do curso de engenharia elétrica, pelo companheirismo e ajuda prestada, particularmente por auxiliar com a utilização do ANSYS.

Ao professor Newton Sure Soeiro e seu grupo de estudos científicos da UFPA o GVA (Grupo de Vibrações e Acústica), por conceder a licença comercial dos *softwares* ANSYS Workbench e SolidWorks para o desenvolvimento deste trabalho.

A todas as outras pessoas envolvidas durante a elaboração deste trabalho, que sem dúvida foram muito significativas para a concretização do mesmo.

“A matemática foi o alfabeto que Deus nos deu pra descobrir o universo”.

Galileu Galilei

“Se vi mais longe foi por estar sobre ombros de gigantes”

Isaac Newton

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURA	9
LISTA DE SIMBOLOS	10
LISTA DE TABELA	12
LISTA DE ABREVIATURA	13
RESUMO	14
ABSTRACT	15
CAPITULO 1	
INTRODUÇÃO	16
1.1 – Considerações Iniciais	16
1.2 – Justificativa	17
1.3 – Objetivo Geral	18
1.4 – Objetivo Especifico	18
1.5 – Metodologia	19
1.6 – Estrutura do Trabalho	20
CAPITULO 2	
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 – Introdução	22
2.2 – Breve Revisão Sobre o Assunto	22
2.3 – Revisão Bibliográfica	24
2.4 – Introdução ao Método de Elementos Finitos (MEF).....	28
2.4.1 – Método dos Resíduos Ponderados	30
2.4.2 – Método de Garlerkin	33
2.4.3 – Método dos Mínimos Quadrados	33
2.5 – Software ANSYS	34
2.5.1 – Fase de Pré-processamento.....	34
2.5.1.1 – Discretização	35
2.5.1.2 – Conceito de Grau de Liberdade (GLB)	35
2.5.1.3 – Formulação do Elemento.....	37
2.5.1.4 – Montagem do Sistema Matricial para o Elemento	37
2.5.1.5 – Montagem das Matrizes dos Elementos	38
2.5.1.6 – Aplicação das Condições de Contorno.....	38
2.5.2 – Fase de Solução	38
2.5.3 – Fase de Pós-processamento	38
2.5.4 – Plataforma ANSYS Workbench	38
2.6 – Principio de Funcionamento do Transformador	39
2.7 – Características do Transformador	40
2.8 – Introdução a Resistência dos Materiais	42
2.9 – Abordagem Analítica	45
2.9.1 – Correntes de Energização (<i>inrush</i>).....	45

2.9.2 – Análise das Forças Eletromagnéticas	46
2.9.3 – Determinação das Forças Radiais nos Enrolamentos	47
2.9.4 – Determinação das Forças Axiais nos Enrolamentos	50
2.9.4.1 – Condição Ideal	51
2.9.4.2 – Condição Não Ideal	51
2.9.5 – Falha Devido ao Esforço das Forças Radiais	53
2.9.6 – Falha Devido ao Esforço das Forças Axiais	56
2.10 – Modelagem Numérica	58
2.10.1 – Criação da Geometria	58
2.10.2 – Seleção dos Materiais	59
2.10.3 – Definição da Malha de Elementos Finitos	60
2.10.4 – Aplicações das Forças	62
2.10.5 – Condições de Contorno	63
2.10.6 – Fase de Solução do Modelo	63
2.10.7 – Análise dos Resultados	63

CAPITULO 3

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA ESTUDADO: FALHA EM TRANSFORMADORES	64
---	-----------

CAPITULO 4

ANÁLISE E DISCURSÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO TRANSFORMADOR DE 15 kVA	68
4.1 – Considerações Iniciais	68
4.2 – Resultados e Discussões	68
4.3 – Considerações Finais	77

CAPITULO 5

CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
5.1 – Conclusão	78
5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros	79

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	80
---------------------------------------	-----------

LISTA DE FIGURA

Figura 1 – Fluxograma descritivo do processo de modelagem	19
Figura 2 – Malha de elemento finito (para problema plano).....	35
Figura 3 – Graus de liberdade. a) graus de liberdade de um ponto; b) graus de liberdade de um corpo rígido.....	36
Figura 4 – Diferentes tipos de elementos finitos.	37
Figura 5 – Princípio de funcionamento de um transformador.....	39
Figura 6 – Principais ligações do transformador trifásico.....	40
Figura 7 – Vista superior de um transformador de 15 kVA, modelados pelo <i>software</i> SolidWorks.....	41
Figura 8 – Diagrama tensão-deformação em um ensaio de tração.....	42
Figura 9 – Carga de prova do cobre para vários níveis de “dureza”.	44
Figura 10 – Forma de onda típica da corrente transitória de energização (corrente de <i>inrush</i>).....	46
Figura 11 – Campo de dispersão e forças axiais e radiais.....	47
Figura 12 – Em <i>a</i> e <i>b</i> efeitos típicos dos esforços eletromecânicos nos enrolamento causado pelas forças radiais.....	47
Figura 13 – (a) Sentido das correntes nos enrolamentos; (b) Forças nos enrolamentos .	49
Figura 14 – Esforço de tração médio no enrolamento externo	49
Figura 15 – Esforço de compressão axial nos enrolamentos.....	50
Figura 16 – Seção transversal de um lado do transformador mostrando as forças axiais nos enrolamentos e a distribuição da densidade de fluxo de dispersão radial	52
Figura 17 – Ilustração dos espaçadores axiais e outros componentes do transformador	54
Figura 18 – Esforço eletromecânico sobre os enrolamentos devido à passagem de transitório elevados	56
Figura 19 – Inclinação de condutores devido à força radiais – seção transversal	57
Figura 20 – Desenho em <i>CAD</i> do transformador (vista 3D)	59
Figura 21 – Malha de elementos finitos, análise computacional	61
Figura 22 – (a) e (b) Aplicação das forças axiais e (c) e (d) aplicação das forças radiais, sendo todas para os enrolamentos internos e externos respectivamente	62
Figura 23 – Gráfico de custo em relação ao numero de falhas.....	65
Figura 24 – Curva de banheira	66
Figura 25 – (a) e (b) Resultados das forças radiais nos enrolamentos (esforço de compressão)	69
Figura 26 – (a) e (b) Deformação nos enrolamentos devida forças radiais	70
Figura 27 – Resultado no MEF dos esforços de compressão das forças axiais nos enrolamentos.....	72
Figura 28 – Máximo esforço nos condutores devido à inclinação dos mesmos em relação aos cantos dos espaçadores	73
Figura 29 – Resultado da deformação total para as forças axiais.....	76

LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{\alpha}$: Vetor coluna

α_i : São os parâmetros incógnitos do problema

β_j : Um coeficiente qualquer (direção J)

Δl : O alongamento ocorrido [m]

ε : Deformação sofrida

$\phi(x)_i$: São funções homogêneas naquelas restrições

μ_0 : Permeabilidade do vácuo [$4\pi 10^{-7}$]

ρ : Resistividade do condutor na temperatura de 75° C [$\Omega \cdot m$]

σ : Tensão aplicado [N/m^2]

$\sigma_{\text{útil}}$ e σ_{adm} : Tensões útil e admissível respectivamente para o cobre [N/m^2]

σ_{crit} : É o valor da tensão crítica [N/m^2]

σ_{med} : Tensão média para os enrolamentos (força radial) [N/m^2]

v : É uma função homogênea nas condições de contorno essenciais em todo o domínio do problema

$\mathcal{U}(x)$: Função ponderada ou função peso

$\Psi_j(x)$: Uma base de função linearmente independente

a : O comprimento do tap

c : Módulo equivalente de elasticidade do papel [N/m^2]

d_0 : Espaço entre os enrolamentos [m]

d_1 e d_2 : Espessura radial dos enrolamentos [m]

e : É a espessura do condutor [m]

f : Uma função qualquer

\vec{f} : Vetor coluna de f_j

f_j : Coeficientes na direção j

\vec{f}_0 : É a densidade volumétrica de força magnética [N/m^3]

h : Altura do enrolamento [m]

h_w : Altura do enrolamento energizado [m]

h_{eff} : É o comprimento efetivo do caminho do fluxo radial

l : É distância entre os suportes axiais [m]

l_f e l_0 : São os comprimentos finais e iniciais respectivamente para o alongamento [m]

k : Constante para espessura equivalente

m : Número de cunhas

n : É o numero de espiras do enrolamento energizado

(nI_{max}) : É a força magnetomotriz do enrolamento [A – espiras]

s : Comprimento dos espaçadores [m]

u : Responsável por gerar as parcelas contendo diferentes ordens de derivadas que podem aparecer em um problema específico

\hat{u} : Função aproximativa

$\hat{u}_0(x)$: Uma função que satisfaz as restrições essenciais e naturais do contorno
 A : Representa um operador diferencial sobre a função
 $A(\tilde{u})$: Função aproximativa de \hat{u}
 A_{ij} : Coeficientes (na direção ij)
 \vec{B} : A densidade de fluxo magnético de dispersão [T]
 B_a : É o fluxo magnético de dispersão [T]
 B_r : Densidade de fluxo magnético radial [T]
 $\{C\}_e$ e $\{F\}_e$: São vetores oriundos da resposta do sistema
 D : Diâmetro do enrolamento [m]
 D_m : É o diâmetro médio do enrolamento [m]
 E : O módulo de elasticidade do material [N/m^2]
 $E(\delta)$: O módulo de elasticidade incremental no valor crítico [N/m^2]
 F_a : Força axial [N]
 F_{med} : Força radial média [N]
 F_r : A força radial total no enrolamento [N]
 FS : Fator de segurança
 H : Intensidade do campo magnético [T]
 I_{0max} : Primeiro pico da corrente de *inrush* [A]
 I_n : Corrente nominal do enrolamento para corrente de *inrush* [A]
 \vec{J} : A densidade superficial de corrente [A/m^2]
 L : A distância entre os espaçadores radial [m]
 $[K]_e$: É a matriz de rigidez
 N : É o número de suportes axiais
 R : É o raio do enrolamento [m].
 $R(\hat{u})$: Resíduo de aproximação da função
 R_{cc} : É resistência em corrente contínua do condutor [Ω]
 S : É secção transversal da espira [m^2]
 $\{T\}_e$: É o vetor de efeitos externos

LISTA TABELAS

Tabela 1 – Causas típicas de falhas em transformadores	25
Tabela 2 – Características geométrica, elétrica e magnética do transformador em estudo	41
Tabela 3 – Valores dos esforços axiais para as condições 2, 4 e 8 espaçadores	57
Tabela 4 – Propriedades física e mecânica do cobre	60
Tabela 5 – Custo de falhas	65
Tabela 6 – Valores dos esforços das forças radiais para condição de <i>inrush</i>	70
Tabela 7 – Valores dos esforços das forças axiais nos pontos de inclinação para condição de <i>inrush</i>	74

LISTA DE ABREVIATURAS

ATP: Alternative Transient Program

GDL: Grau de Liberdade

MEF: Método de Elementos Finitos

FEMM: Finite Element Method Magnetics

FURTADO, Maciel da Costa. Análise de Esforços Mecânicos nos Enrolamentos de Transformadores Ocasionalmente por Correntes de Energização Utilizando o Método de Elementos Finitos. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Pará. Tucuruí-Pá, 2012.

RESUMO

Transformadores são equipamentos essenciais para o funcionamento de sistemas elétricos. O projeto desses transformadores é realizado prevendo situações mais severas a que possa ser submetido no local destinado para sua instalação, devendo ter capacidade de suportar as solicitações de natureza diversas a que possa ser exposto. Apesar do extremo cuidado observado na fase de projeto destes dispositivos, a prática tem mostrado um número de ocorrência de falhas significativas. Dentre as causas destacam-se justamente os esforços mecânicos ou tensões verificados nas estruturas internas dos dispositivos em decorrência dos esforços adicionais provocados pelas correntes transitórias de energização. A investigação dos efeitos danosos causados pelo fenômeno mencionado, portanto torna-se imperativo. Nessa perspectiva, este trabalho tem por objetivo descrever e analisar os diferentes efeitos como: tração e compressão a que estão sujeitos os enrolamentos interno e externo sob ação de forças radiais e axiais envolvendo as bobinas do transformador, que dependendo da severidade do distúrbio, podem comprometer a integridade física do dispositivo, causando perda de eficiência da máquina ou até mesmo levar ao desuso. Portanto, para tal propósito, será utilizada uma modelagem computacional baseada no método de elementos finitos, que permite simulações de fenômenos de regime transitório e permanente além de possibilitar o acesso às grandezas eletromecânicas nos enrolamentos do transformador.

Palavras-chave: Correntes de *inrush*, Esforço Mecânico, Método de Elementos Finitos, Enrolamentos, Transitório, Transformadores.

FURTADO, Maciel da Costa. Analysis of Mechanical Stress in Winding Transformer Caused by Inrush Currents Using Finite Element Method. Completion of Course Work. Mechanical Engineering Course. Federal University of Pará. Tucuruí-Pá, 2012.

ABSTRACT

Transformers are essential equipment for the operation of electrical systems. The project of these transformers is implemented by providing the most severe situations that may be submitted in place intended for installation and should be able to withstand the diverse nature that may be exposed. Despite the extreme care taken in the design phase of these devices, the practice has shown a number of significant failures occur. Among the just causes include mechanical stress or effort observed in the internal structures of the devices due to the additional effort caused by the transient inrush currents. The investigation of these harmful effects caused by the phenomena mentioned thus becomes imperative. From this perspective, this paper aims to describe and analyze the different effects such as tension and compression that is subject to external and internal coil under the action of radial and axial forces involving the coils of the transformer depending on the severity of the disorder, may compromise the physical integrity of the device causing loss of efficiency of the machine or even lead to disuse. Therefore, for this purpose will be used a computer modeling based on finite element method, which allows the simulation of phenomena of transitional and permanent besides enabling access to the quantities in electromechanical transformer windings.

Key-words: Inrush Currents, Mechanical Stress, Finite Element Method, Windings, Transient, Transformers

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Transformadores de potência são equipamentos importantes e de alto custo no contexto de sistemas elétricos. Estando amplamente ligadas a usinas, subestações e indústrias, são máquinas estáticas que transferem energia elétrica de um circuito para o outro mantendo a mesma frequência e normalmente variando os valores de tensão e corrente, permitindo a interligação entre os centros produtores e os consumidores, num sistema interligado, com limites de estabilidade que dependem da confiabilidade dos equipamentos (AZEVEDO, 2007). Logo, sabendo-se a importância de um transformador para a sociedade é fundamental entender o seu funcionamento e quais os fatores que podem influenciar em sua perda ou falha.

Alguns dos motivos que podem diminuir a vida útil de um transformador é o uso excessivo da máquina sem a manutenção prévia, gerando desgaste no mesmo, como fadiga térmica, fadiga mecânica, sobreaquecimento, altas tensões e vibrações, ocasionando perdas e conseqüentemente estragos na máquina, provocando aumento de custos. Porém, grande parte dos defeitos em transformadores é provocada por esforços mecânicos devido às condições de energização, as quais frequentemente os mesmos estão expostos, quando integrados à rede elétrica (FONSECA, 2010).

Tentando amenizar os defeitos ocasionados por esses esforços, no qual o transformador (em principal as bobinas) é submetido, são feitos estudos simulando as Forças de Lorentz¹. Os estudos desses esforços são importantes, pois são eles que irão apresentar as respostas do material à influência mecânica externa, de modo a indicar as deformações ocorrentes nos enrolamentos que, dependendo da severidade, podem comprometer a vida útil do equipamento. Para essa análise, portanto, é necessário ter conhecimento da natureza dessas forças, de como elas interagem e causam danos sobre a estrutura ativa do transformador.

Diante disso, é demonstrada neste estudo uma técnica de representação dos esforços que agem nas bobinas de transformador trifásico de três colunas, se valendo de um *software* comercial que utiliza para a solução de seus problemas o método de elementos finitos. Este método foi proposto em 1940, mas foi somente aplicado a quase dez anos depois em *desing* aeronáuticos e em análises estruturais (BIANCHI, 2005). Em 1970 P.

1-Forças de Lorentz: são forças eletromagnéticas que acometem os dispositivos elétricos devido à interação da corrente elétrica pelo campo magnético.

P. Silvester e M. V. K. Chari publicaram um artigo que propôs a utilização deste método em problemas de eletromagnetismo, incluindo a sua formulação e a resolução de problemas não lineares (BASTOS, 1996). Com o passar dos anos, o método de elementos finitos foi largamente adotado em quase todos os problemas físicos e matemáticos. A metodologia de cálculos do método de elementos finitos está estruturada em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento (MEEKER, 2006 *apud* SARAIVA, 2008).

Portanto, o principal intuito deste trabalho é demonstrar as possíveis características de um transformador a partir de atribuições de esforços do seu funcionamento em extrema capacidade com simulações computacionais. De tal modo, devem-se criar situações para estudo semelhantes às reais, situações estas essenciais para a modelagem de um transformador, principalmente quando se trata de estudos que envolvem a distribuição de fluxo magnético em todo o transformador. Com isso, usa-se uma técnica numérica onde se parte do princípio de que o domínio do estudo deve ser decomposto ou discretizado em pequenas regiões (BASTOS, 1996).

1.2 – JUSTIFICATIVA

A energia em suas formas diversas é um requisito indispensável de que dispõe a sociedade humana para mover o setor industrial atualmente. Neste sentido, a oferta de energia elétrica constituiu-se em um dos elementos centrais da estratégia de desenvolvimento brasileiro nos próximos anos e, para o sucesso desse desafio, é importante a intervenção do estado, com vultosos investimentos. Para isso, é de fundamental importância investimentos principalmente em pesquisas e desenvolvimento visando ampliar a infraestrutura do setor elétrico no país.

Com as tecnologias e o ritmo acelerado das mudanças na indústria de energia, novas referências que abordam as novas tecnologias estão vindo para o mercado. Com base nesse contexto, existe uma necessidade urgente de manter o controle e a qualidade dos equipamentos essenciais para os funcionamentos dos sistemas elétricos. Nesse sentido, vem crescendo, nos últimos anos, o interesse pelos índices de desempenho e de confiabilidade de transformadores.

Portanto, os transformadores de potência destacam-se entre os componentes de maior porte e valor em subestações e usinas. A ocorrência de uma falha nesse tipo de equipamento resulta em transtornos operacionais e financeiros significativos, uma vez que, nem sempre se dispõe de equipamento reserva, o custo de aquisição ou de reparo é elevado, principalmente para os equipamentos instalados em unidades distantes dos centros de produção. Como são equipamentos produzidos especificamente para uma determinada instalação, o tempo de fabricação e transporte é longo, podendo para equipamentos de grande porte levar de nove a doze meses. Assim, no sentido de aumentar a confiabilidade dos transformadores, além de critérios rigorosos de manutenção e operação, seria muito importante que os mantenedores conhecessem os tipos e as causas dos principais modos de falhas que podem ocorrer com esses equipamentos, na tentativa de bloqueá-las (SOARES, 2011).

1.3 – OBJETIVO GERAL

Conforme abordado sobre a importância do assunto e as necessidades em se chegar a alternativas tecnicamente viáveis para a solução do problema em transformadores, tem-se como objetivo geral deste trabalho elaborar modelos matemáticos através de métodos de simulações numéricas de esforços eletromecânicos de transformadores quando em regime permanente ou quando expostos a condições severas de correntes transitórias, tanto com enrolamentos alinhados como desalinhados.

1.4 – OBJETIVO ESPECÍFICO

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver o modelo numérico, através do qual, seja possível uma análise tridimensional dos esforços mecânicos ocasionados pelas correntes transitórias de *inrush* para que se possa conhecer melhor a interação entre as grandezas que caracterizam o comportamento operacional destas unidades tais como, principalmente, as deformações nos enrolamentos que levam a falha do equipamento.

Em termos específicos espera-se:

- Construir um modelo geométrico do equipamento através do programa *SolidWorks*;

- Utilizar o Método de Elementos Finitos no modelo empregando o programa **ANSYS Workbench**
- Simular os esforços nas condições de operação
- Verificar o modelo, comparando os resultados obtidos da simulação numérica, com os dados analíticos determinados.

1.5 – METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido como parte de um projeto de pesquisa, intitulado como “Análise dos Esforços Eletromecânicos nos Enrolamentos de Transformadores Ocasionalmente por Transitório Eletromagnéticos Utilizando Método de Simulação Numérica” e como tal, segue uma metodologia construtiva, que será descrita brevemente neste momento para posterior aprofundamento. A referida metodologia pode ser entendida facilmente a partir de um fluxograma, (Figura 1), onde temos como etapa inicial o conhecimento do problema físico e a partir deste a concepção do modelo matemático, que será em seguida submetido às etapas de simulação, resumidas em pré-processamento, solução (ou análise) e pós-processamento; sendo que ao fim desta última etapa obtêm-se os resultados, neste caso referente à análise estrutural do transformador, que deverão ser verificados, a fim de validar o modelo numérico.

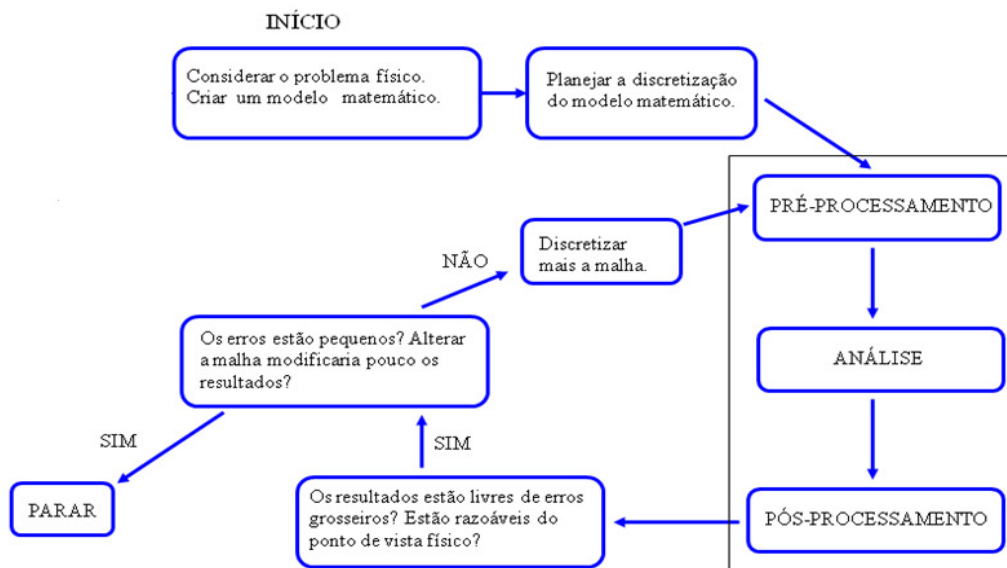


Figura 1 - Fluxograma descritivo do processo de modelagem

FONTE: LIMA, 2011, p. 18.

1.6 – ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

No **capítulo 1** é realizada uma breve introdução a respeito da importância de transformadores no contexto da transmissão e distribuição de energia. Em seguida é feito um apanhado básico sobre as principais causas de falhas nesses equipamentos, realçando a importância das correntes transitórias de *inrush* nesse assunto. Além disso, a justificativa deste trabalho, bem como os objetivos geral e específicos também são discriminados neste capítulo, sendo estes seguidos por uma descrição básica da metodologia utilizada para o desenvolvimento desse trabalho.

No **capítulo 2** é desenvolvida a fundamentação teórica e a revisão bibliográfica, na qual este trabalho está fundamentado. O desenvolvimento da fundamentação teórica inicia-se a partir de uma breve revisão do assunto abordado dentro do contexto do presente trabalho e do embasamento introdutório sobre o método de elementos finitos. Na abordagem realizada neste capítulo, são expostas algumas considerações referentes ao transformador que será utilizado nesse estudo, assim como as características física e geométrica de seus componentes. Uma rápida conceituação sobre a resistência dos materiais é apresentada nesse capítulo, além do desenvolvimento de uma abordagem analítica das causas de falhas devida às correntes de *inrush*, de forças e dos esforços gerados devido à ação dessas forças que afetam a estrutura dos dispositivos. Uma descrição detalhada da modelagem numérica do problema estudado é apresentada nesse capítulo também.

O **capítulo 3** apresenta a descrição do problema estudado, evidenciando as inconveniências para o setor elétrico, devido às perdas com esses equipamentos e aos altos custos. É apresentado nesse capítulo o gráfico da curva de banheira do comportamento da taxa de falhas para esses dispositivos, decorrentes principalmente das altas correntes transitórias, em especial as correntes de energização de *inrush* que afetam os condutores dos transformadores. As justificativas para o uso das correntes de *inrush* utilizada neste trabalho para simulação dos esforços também estão presentes neste capítulo igualmente.

No **capítulo 4** apresenta uma explanação detalhada a cerca dos resultados obtidos, a partir das simulações no MEF, realizadas com base no modelo numérico gerado, objetivando mostrar a contribuição e eficiência do modelo numérico na simulação dos esforços mecânicos nos enrolamentos do transformador.

O **capítulo 5**, finalmente, apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros, tomadas como importantes, neste trabalho a partir dos resultados obtidos na análise dos esforços mecânicos nos enrolamentos do transformador.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – INTRODUÇÃO

A fundamentação teórica da análise dos esforços mecânicos em transformadores é relativa às elevadas correntes de energização, que afetam principalmente os enrolamentos do equipamento. Neste sentido, foram pesquisados vários trabalhos que investigaram a influencia desse transitório e suas consequências para o dispositivo. Nestes estudos, buscou-se o entendimento das principais características do transformador, das perdas para setor elétrico e as forças eletromagnéticas que interagem com as estrutura ativa do transformador, em suas diferentes partes, quando modelados numericamente.

Dessa forma será apresentada uma síntese das publicações consideradas como de maior relevância e que de alguma forma, serviram para consolidar a fundamentação teórica utilizada para permitir a realização deste trabalho.

2.2 – BREVE REVISÃO SOBRE O ASSUNTO

Os transformadores de potência estão submetidos constantemente a grandes esforços mecânicos, originados principalmente pela interação dos campos magnéticos de seus enrolamentos (WINDERS, 2002). Esses defeitos ocorrem principalmente nas partes ativa do equipamento, e constituem-se da deformação e/ou desalinhamento dos enrolamentos (AGUIAR, 2007).

Segundo Pena (2003), em sua dissertação o transformador que foi introduzido comercialmente no final do século XIX vem sofrendo avanços expressivos ao longo das últimas décadas, que vão desde a aplicação de novos materiais à utilização de programas computacionais no projeto e novos métodos de ensaios. Entretanto, todos estes avanços conseguidos não produziram reduções significativas na taxa de falha. Vale ressaltar que, com o crescimento dos sistemas elétricos ao longo dos anos, ocorreram elevações substanciais nos níveis de tensão, corrente e potência dos transformadores, o que, por certo, aumentou o nível de complexidade dos fatores causadores de falhas.

De acordo com Azevedo (2007), o projeto de transformadores é realizado prevendo-se as situações mais críticas a que possam ser submetido no local destinado para sua instalação. Para assegurar a sua integridade física na fase de projeto, os critérios de dimensionamentos das partes ativas e das estruturas de sustentação dos transformadores levam em consideração as correntes transitórias mais severas e os maiores picos passíveis de ocorrência. Apesar do extremo cuidado observado na fase de projeto destes dispositivos, a prática tem mostrado um número de ocorrências de falhas significativo, o que se traduz em prejuízos consideráveis. As falhas podem ser atribuídas a fatores diversos, dentre os quais se destacam: pequenos defeitos na fase de montagem, estimativa incorreta/desatualizada das máximas correntes transitórias, qualidades dos materiais empregados, ferramentas e técnicas de cálculo sem a devida precisão, dentre outros.

Guimarães *et al* (2008) apresentaram um estudo das falhas internas em enrolamentos de transformadores, que são em geral, causadas pelo enfraquecimento do isolamento dos seus condutores ocasionado por diversos fatores. Um deles pode ser a tensão gerada pelas forças eletromecânicas axiais e radiais produzidas pelas correntes de energização. O trabalho apresenta os resultados de uma investigação sobre as tensões eletromecânicas em transformadores causadas pelas correntes de *inrush*, através da análise matemática de uma unidade trifásica com dois enrolamentos concêntricos de dupla camada. Tal investigação foi mostrada tanto pelo método analítico quanto pelo método dos elementos finitos, utilizando-se o software Flux em sua versão 3D.

Rosentino *et al* (2011) investigaram as falhas eletromecânicas em transformadores. Constataram que sob condições normais de operação, as forças eletromecânicas, bem como os campos magnéticos de dispersão que ocorrem no transformador, são relativamente pequenas e, por conseguinte, os esforços são perfeitamente suportáveis pelas estruturas mecânicas de suporte dos enrolamentos. No entanto, sob condição de curto-circuito, os campos de dispersão associados às elevadas correntes alcançam valores relativamente altos e, por conseguinte, os esforços decorrentes podem destruir total ou parcialmente o transformador, caso os condutores não estejam adequadamente sustentados pelas estruturas mecânicas.

Fonseca (2010), em sua dissertação apresenta uma modelagem computacional utilizando o método de elementos finitos, utilizando o *software* FEMM (*Finite Element Method Magnetics*), para um transformador trifásico com núcleo amorfo com objetivo

de analisar esforços eletromecânicos quando o mesmo é submetido a correntes transitórias de curto-circuito.

No estudo apresentado por Raffo (2010) os fenômenos transientes em transformadores de potência são aspectos importantes a serem analisados, a corrente de *inrush* é um destes fenômenos. O trabalho desenvolve uma comparação entre a corrente de *inrush* e a corrente de curto circuito, utilizando-se o mesmo parâmetro para ambas. Esta comparação é pertinente devido às duas correntes apresentarem amplitudes de pico semelhante. É utilizado um circuito simplificado para o ensaio da corrente de *inrush* no *software* ATP (*Alternative Transient Program*).

A corrente de *inrush* pode apresentar uma amplitude de 8 a 10 vezes o valor da corrente nominal do transformador de acordo com Mañana apud Ahn *et al* (2012). Porém, outros autores caracterizam esta relação de uma forma mais detalhista, como por exemplo, em Harlow (2006), que afirma que a corrente de *Inrush* é de aproximadamente 25 vezes a corrente nominal em 0,01s e aproximadamente 12 vezes a corrente nominal em 0,1s.

De acordo com Raffo (2010) a corrente de *inrush* transiente é necessária para estabelecer o campo magnético do transformador, porém este fenômeno gera muitos efeitos indesejáveis, já que a amplitude da corrente de *inrush* está na faixa da amplitude da corrente de curto circuito. Este fenômeno segundo ele pode causar diversos danos à máquina, como estresses dinâmicos nas bobinas do transformador, falha da operação da proteção diferencial do transformador, deterioração do isolamento, da estrutura de suporte mecânico do enrolamento e redução na qualidade da energia do sistema.

Nesta seção foi apresentado um breve relato sobre o estudo de transformadores e os fenômenos envolvidos, destacando as principais falhas e os problemas que o envolvem, juntamente com a metodologia abordada por cada autor.

2.3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise dos esforços mecânicos em transformadores é baseada nas forças dinâmicas causadas por correntes transitórias. Neste sentido, foram pesquisados vários trabalhos que investigam a análise dos esforços mecânicos em transformadores nos mais variados tipos. Para tanto, buscou-se o entendimento das falhas que ocorrem nesses dispositivos, bem como as causas que levam a falha do mesmo devido à influência das

correntes transitórias. Dessa forma, os estudos das falhas e causas são de fundamental importância para a vida útil do transformador.

Segundo Azevedo (2007) a corrente de energização em transformadores é um fato conhecido desde a última década do século XIX. Por outro lado, as investigações referentes aos esforços eletromecânicos originadas pelas elevadas correntes de *inrush* são mais recentes. Somente a partir das últimas décadas, observou-se um crescente interesse da comunidade científica do mundo, bem como de concessionárias de energia elétrica, na averiguação das forças eletromagnéticas e das tensões mecânicas precedentes das altas correntes provenientes deste fenômeno.

Wang *et al* (2002), em seu artigo, apresentam um estudo de falhas em transformadores que são decorrentes de diferentes causas e condições tanto de instalação como operativas. De um modo geral, no entanto, estas podem ser classificadas como sendo de origens elétricas, mecânicas e térmicas. Nessa linha de pensamento, a Tabela 1 relaciona causas típicas de falhas em transformadores, utilizando como forma de classificação a sua natureza, ou seja, se devido a causas internas ou externas.

Tabela 1 – Causas típicas de falhas em transformadores.

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

FONTE: AZEVEDO, 2007

Na pesquisa realizada por Bechara (2010), foram relacionados e descritos os principais modos de falha, normalmente verificados em transformadores de potência, a partir de perícias realizadas entre os anos de 2000 e 2008 para companhias seguradoras. A análise de falhas elaborada pelo autor do estudo foi realizada em cerca de uma centena de transformadores com diferentes tipos de aplicações, classes de tensão e níveis de potência.

Pena (2003) destaca que o número muito elevado de falhas vem ocorrendo em transformadores de potência de alta e extra-alta tensão, associadas a fenômenos

transitórios, em várias partes do mundo inclusive no Brasil, causando enormes prejuízos e sendo motivo de preocupação para fabricantes e empresas concessionárias de energia. Muitas dessas falhas catastróficas levam à perda parcial ou total do equipamento ou ainda a vultosos recursos financeiros para repará-los e têm origem nas elevadas correntes transitórias, provocando deslocamento ou deformação na geometria das bobinas.

Técnicas numéricas para previsão das correntes de partidas estão presentes nos trabalhos desenvolvidos por Steurer (2002) e Faiz (2008), onde o MEF é aplicado na versão 2D e 3D a transformadores de potência, para avaliação das forças eletromagnéticas nos enrolamentos devido ao aparecimento da corrente de *inrush* e sua comparação com a força do respectivo curto-circuito. No entanto, a maior parte dos métodos usados para simulações atuais baseiam-se na determinação de circuitos equivalentes apropriados, tendo em conta a geometria do núcleo de acordo com Sáinz (2007), características estruturais segundo Chen (2005) e o material do núcleo não linear de acordo com Abdulsalam (2005) e Vanti (2008), usando medições em tempo real para adoção de parâmetros adequados para o núcleo magnético do modelo de histerese Jiles-Atherton (WANG, 2002) ou por simulação adequada dos afundamentos de tensão causados por correntes de *inrush* (NAGPAL, 2006). Outros modelos levam em conta o efeito da energização do transformador para outros transformadores ligados em paralelo (BRONZEADO, 1995). Técnicas de solução de domínios foram também proposta para simulação de variação da corrente de entrada, a fim de superar problemas numéricos devido à natureza transitória do fenômeno (RICO, 2001). As redes neurais artificiais têm sido utilizadas para o cálculo de corrente de pico e as forças resultantes sobre os enrolamentos do transformador (ADDLY, 2001).

Fonseca (2010) realizou um estudo em que grande parte dos defeitos que ocorrem em transformadores são provocados por esforços mecânicos devido às condições de curto-circuito, as quais frequentemente estão expostos quando integrados à rede elétrica. Diante disso, foram realizados estudos em transformadores que possuem seu núcleo construído a partir de liga amorfa em regime transitório, utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF), visto que os mesmos estão tendo bastante aceitação no mercado e por apresentarem baixas perdas no núcleo, podendo substituir os transformadores com núcleos de materiais ferromagnéticos cristalinos tradicionais (*FeSi*) em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Addly (2001) estudou que na ocorrência de altas correntes de *inrush* o núcleo satura e sua permeabilidade efetiva é reduzida, com as componentes produzidas pelo fluxo de dispersão podendo ser negligenciadas, bem como as correntes no secundário, caso existam. Assim, na investigação das forças sob condições de *inrush*, apenas as componentes de campo produzidas pelas correntes nos condutores dos enrolamentos primários são consideradas.

Guimarães *et al* (2008), mostra que em relação aos valores de pico, as correntes de *inrush* se assemelham às correntes de curto-circuito “passantes” em um transformador. No entanto, as características das tensões eletromecânicas nos enrolamentos causados por esses dois tipos de correntes são diferentes. Enquanto as correntes de curtos-circuitos “passantes” provocam forças envolvendo os vários enrolamentos do transformador que alimenta o curto-circuito, a corrente de *inrush* envolve somente o enrolamento que está sendo energizado. É importante ressaltar, no entanto, que este enrolamento pode ser constituído de mais de uma bobina.

Segundo Brunke (2001) correntes de *inrush* de grande magnitude que acometem os transformadores, são correntes harmônicas geradas quando o núcleo do dispositivo é exposto para a saturação durante a energização. Além disso, de acordo com Steurer (2002) essas correntes geram impactos significativos sobre a estrutura dos enrolamentos dos transformadores devidos aos esforços mecânicos gerados. Wiszniewski (2008) mostra também que, sob condições especiais de funcionamento, as correntes observadas após ligar o transformador não contem informações de restrição suficiente (por exemplo, segundo harmônico), resultando em um mau funcionamento dos relés de proteção e causando um grande problema para proteção desses relés para transformadores de potência.

Nesta seção foi apresentado o levantamento bibliográfico sobre o estudo das investigações das análises dos esforços mecânico em transformadores, ocasionado pelas correntes transitórias passantes e pelas correntes de partidas de *inrush*, justamente com a contribuição de cada autor para esse projeto. Das contribuições abordadas pelos diversos autores, para caracterização da análise desses esforços mecânicos (em principal nos enrolamentos) nos transformadores pode-se destacar o estudo apresentado por Azevedo (2007), que trata da análise dos esforços mecânicos em transformadores causados por curto-circuito passantes e correntes de energização, empregando a técnica do FEMM, como ferramenta computacional de simulação numérica. Este estudo foi de fundamental importância para o desenvolvimento desta etapa do projeto, por auxiliar na

modelagem das principais partes que compõe o dispositivo, tais como, o núcleo ferro magnético e os enrolamentos interno e externo.

2.4 – INTRODUÇÃO AO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma forma de resolução numérica de um sistema de equações diferenciais parciais. É uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, para que sejam obtidos os resultados desejados. A origem do desenvolvimento deste recurso ocorreu no final do século XVIII, entretanto, a sua viabilização tornou-se possível somente com o advento dos computadores, facilitando a resolução das enormes equações algébricas. O MEF pode ser utilizado em diversas áreas das ciências exatas e biológicas e, devido à sua grande aplicabilidade e eficiência, existem trabalhos com esta metodologia nas diversas especialidades, quando se deseja analisar cargas, tensões ou deslocamentos (LOTTI, 2006).

Antes do aparecimento do MEF, a análise dos meios contínuos era efetuada por resolução direta dos sistemas de equações de derivadas parciais que regem o fenômeno, tendo em consideração as necessárias condições de fronteira. Para facilitar a aplicação desta técnica aos problemas não elementares, era comum recorrer a série de Fourier (TIMOSHENKO, 1988). Com o grande desenvolvimento que o MEF teve na década de 60 e com a banalização do recurso ao computador, passou a ser prática corrente a análise de estruturas de geometria arbitrária, constituídas por múltiplos materiais e sujeitas a qualquer tipo de carregamento. Este avanço é tão significativo que os outros métodos, atrás referidos, deixaram praticamente de ser utilizados. Atualmente, o seu interesse restringe-se ao de fornecer soluções teóricas de problemas simples para validar métodos aproximados (AZEVEDO, 2003).

Quando surge a necessidade de resolver um problema de análise estrutural, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas. O modo como o MEF é formulado e aplicado depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema. Seguindo essa

linha de raciocínio, têm-se algumas análises necessárias que antecedem a análise estrutural (AZEVEDO, 2003):

- Análise dinâmica ou estática;
- Análise linear ou não linear;
- Tipo de estrutura;

Nas análises dinâmicas, as ações sobre as estruturas devem ser analisadas levando em consideração as forças de inércia associadas a acelerações a que cada um dos seus componentes fica sujeito. Por outro lado, em muitas situações é razoável considerar que as ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezíveis as forças inerciais. Considerando-se, assim, uma análise estática. Neste trabalho apenas será considerada para o problema simplificações inerente a uma análise estática.

Em uma análise linear a estrutura sofre apenas pequenas deformações e deslocamentos, tendo comportamento linear elástico, obedecendo, portanto assim, a Lei de Hooke. Quando os deslocamentos e a deformação aumentam ou o comportamento do material apresenta fenômenos como plasticidade e fissuração, os efeitos não lineares ganham importância e a análise passa a se chamar de análise não linear. A análise não linear se distingue da análise linear não somente por exigir maiores esforços tanto na formulação teórica de modelos matemáticos e nos tratamentos numéricos necessários na resolução dos sistemas discretos resultantes, como por exigir também uma grande experiência de análise.

No caso mais geral, tanto a não linearidade geométrica (devido aos grandes deslocamentos) como a não linearidade física (causada pelo comportamento mecânico do material) precisam ser consideradas. No nível do material que constitui a estrutura, a relação entre tensão e deformação é linear. Nos casos em que esta simplificação não é considerada, é necessário recorrer a algoritmos específicos de análises não linear do material (AZEVEDO, 2003). Para este trabalho apenas se aborda o caso da análise linear, tanto em relação ao aspecto geométrico quanto ao de material.

Quanto à análise do tipo de estrutura no que diz respeito à geometria, podemos classificar como: reticuladas, laminares ou sólidas. Estas últimas são as mais genéricas, sendo classificadas como sólidas as que não apresentarem características que as permitam enquadrar no grupo das laminares ou das reticuladas (AZEVEDO, 2003).

As estruturas reticuladas são as constituídas por barras prismáticas, cujas dimensões transversais são muito menores do que o comprimento do respectivo eixo. Neste tipo de estruturas é habitual distinguir os pórticos das treliças, conforme é ou não considerada a compatibilidade de rotações nas extremidades de barras adjacentes (AZEVEDO, 2003).

As estruturas laminares são as que se desenvolvem para ambos os lados de uma superfície média, mantendo-se na sua vizinhança. É o caso de uma lâmina cuja espessura é muito inferior às restantes dimensões. Quando a superfície média é plana, a estrutura laminar pode ser classificada como parede, laje ou casca plana. Uma parede apenas se encontra sujeita a ações paralelas ao seu plano médio. Uma laje pode ter aplicadas forças perpendiculares ao plano médio e momentos cujo vetor está contido no plano médio. Uma estrutura laminar plana sujeita a outros tipos de ações é designada casca plana. Quando a superfície média não é plana, tem-se uma casca tridimensional (AZEVEDO, 2003).

O método de elementos finitos (MEF) é baseado em dois conceitos principais que ajudam a contornar o problema:

- Solução baseada numa “Integral” da equação;
- Aproximação da solução por uma função definida num subdomínio resultante da discretização do domínio.

A ideia básica é supor que ao invés de tentar obter a solução exata do problema, nós tenhamos uma solução aproximada que reduz a um mínimo o erro na aproximação da equação. Dessa forma, existem vários métodos para se definir a forma como o erro será minimizado, um deles, bastante usado, e é o chamado Método dos Resíduos Ponderados. Neste trabalho somente será estudado o método de resíduos ponderados, e dentre esses será abordado o Método de Galerkin e o Método dos Mínimos Quadrados de modo a facilitar o entendimento do MEF.

2.4.1 – MÉTODO DE RESÍDUO PONDERADOS

O Método dos Resíduos Ponderados estabelece uma condição natural para a obtenção de soluções aproximadas de vários problemas de engenharia. Segundo ASSAN (2003), o Método dos Resíduos Ponderados, difere dos métodos ditos variacionais por não necessitar de um funcional, utilizando diretamente a equação diferencial (forma forte) do problema a ser resolvido (ALVES, 2008).

O método dos resíduos ponderados parte de uma abordagem radicalmente diferente da que foi empregada pelos outros métodos até agora. Em vez de tentar aproximar a função que é a solução da equação, o método tenta aproximar alguns valores da função a partir de funções conhecidas. A solução é dada por uma função, e não por um conjunto de pontos.

Para conceituar melhor o método, considere a equação diferencial de um problema genérico representado da seguinte forma (ALVES, 2008):

$$A(u) = f \quad (1)$$

Onde (A) representa um operador diferencial sobre a função (u) (solução exata), responsável por gerar as parcelas contendo diferentes ordens de derivadas que podem aparecer em um problema específico.

Uma solução aproximativa deve verificar as condições de contorno essenciais e naturais do problema a ser analisado, e pode ser descrita da seguinte maneira:

$$\tilde{u}(x) = \alpha_i \cdot \phi(x)_i + \tilde{u}_0(x) \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

Sendo ($\tilde{u}_0(x)$) uma função que satisfaz as restrições essenciais e naturais do contorno, ($\phi(x)_i$) são funções homogêneas naquelas restrições, e (α_i) são os parâmetros incógnitos do problema.

Em se tratando da adoção da função aproximativa \tilde{u} , resulta que:

$$A(\tilde{u}) \neq f \quad (3)$$

Uma vez que a aproximação descrita pela equação acima, não corresponde à solução exata, pode-se definir o resíduo da aproximação como sendo:

$$R(\tilde{u}) = A(\tilde{u}) - f \neq 0 \quad (4)$$

O método do resíduo ponderado estabelece que os coeficientes α_i que constam na função aproximativa sejam determinados mediante a condição de anulação do resíduo em forma ponderada no domínio da solução. Essa condição é expressa pela seguinte integral:

$$\int_{\Omega} R(\tilde{u}) \cdot v d\Omega = 0 \quad (5)$$

Onde (v) é uma função homogênea nas condições de contorno essenciais em todo o domínio Ω do problema.

A função ponderada ou função peso pode ser expressa na forma de uma combinação linear de funções base:

$$v(x) = \beta_j \cdot \Psi_j(x) \quad c / j = 1, \dots, n \quad (6)$$

Sendo: $(\Psi_j(x))$ uma base de função linearmente independente e (β_j) um coeficiente quaisquer.

Substituindo a Equação (6) na Equação (5), tem-se uma somatória de n parcelas com coeficientes β_j :

$$\beta_j \cdot \int R(\tilde{u}) \cdot \Psi_j d\Omega = 0 \quad c / j = 1, \dots, n \quad (7)$$

A condição anterior também é atendida para qualquer combinação de β_j (não nulos simultaneamente) se:

$$\int_{\Omega} R(\tilde{u}) \cdot \Psi_j d\Omega = 0 \quad c / j = 1, \dots, n \quad (8)$$

Admitindo-se a linearidade do operador A e considerando-se a Equação (2), pode-se então expressar a forma geral do Método dos Resíduos Ponderados da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} R(\tilde{u}) \cdot \Psi_j d\Omega = 0 &\Rightarrow \int (\alpha_i \cdot A(\phi_i) + A(\tilde{u}_0) - f) \cdot \Psi_j d\Omega = 0 \\ &\Rightarrow \alpha_i \int_{\Omega} A(\phi_i) \cdot \Psi_j d\Omega = \int_{\Omega} [f - A(\tilde{u}_0)] \cdot \Psi_j d\Omega \end{aligned} \quad (9)$$

Introduzindo-se a notação:

$$A_{ij} = \int_{\Omega} A(\phi_i) \cdot \Psi_j d\Omega \quad (10)$$

$$f_j = \int_{\Omega} [f - A(\tilde{u}_0)] \cdot \Psi_j d\Omega \quad (11)$$

O sistema que permite determinar os coeficientes α_i pode ser representado da seguinte maneira:

$$\alpha_i \cdot A_{ij} = f_j \quad (12)$$

Reunindo-se os coeficientes α_i num vetor coluna $\vec{\alpha}$, os coeficientes f_j em um outro vetor coluna \vec{f} e os coeficientes A_{ij} nas posição de linha i e coluna j de uma matriz A , pode-se ainda representar o mesmo sistema na forma matricial:

$$A^T \cdot \vec{\alpha} = \vec{f} \quad (13)$$

Os métodos de resíduos ponderados variam de acordo com a função Ψ_j adotado. Dentre estes métodos, abordam-se a seguir o Método de Garlerkin e o Método dos Mínimos Quadrados.

2.4.2 – MÉTODO DE GARLERKIN

O Método de Garlerkin tornou-se o mais conhecido e o mais potente dos Métodos dos Resíduos Ponderados em virtude do advento e rápido desenvolvimento dos computadores e de sua combinação com o Método dos Elementos Finitos, que introduziu uma forma engenhosa de construção de funções de aproximação (ALVES, 2008).

Basicamente, o Método de Garlerkin propõe que as funções base da função ponderadora sejam a mesmas da função aproximativa. Pode-se representar esta condição da seguinte maneira (ALVES, 2008):

$$\Psi_j = \phi_j \quad (14)$$

Dessa forma, o Método de Garlerkin pode ser descrito da seguinte forma:

$$\alpha_i \cdot \int_{\Omega} A(\phi_i) \cdot \phi_j d\Omega = \int_{\Omega} [f - A(\tilde{u}_0)] \cdot \phi_j d\Omega \quad (15)$$

Segue da relação anterior que para fins de utilização da forma matricial, defini-se:

$$A_{ij} = \int_{\Omega} A(\phi_i) \cdot \phi_j d\Omega \quad (16)$$

$$f_j = \int_{\Omega} [f - A(\tilde{u}_0)] \cdot \phi_j d\Omega \quad (17)$$

2.4.3 – MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

No Método dos Mínimos Quadrados a aproximação é obtida por meio da minimização da norma ao quadrado do resíduo, ou seja, (ALVES, 2008):

$$\frac{d\|R\|^2}{d\alpha_j} = 0 \quad (18)$$

Onde: $\|R\|^2$ pode ser definido como:

$$\|R\|^2 = \int_{\Omega} [R(\tilde{u})]^2 d\Omega = \int_{\Omega} [R(\alpha_j \cdot \phi_j + \tilde{u}_0)]^2 d\Omega \quad (19)$$

De modo que:

$$\frac{d\|R\|^2}{d\alpha_j} = 2 \cdot \int_{\Omega} R(\tilde{u}) \cdot \left[\frac{dR(\alpha_j \cdot \phi_j + \tilde{u}_0)}{d\alpha_j} \right] d\Omega = 0 \quad (20)$$

Esta última equação é equivalente à condição de anulação do resíduo e dela pode-se definir a função peso por:

$$\Psi_j = \frac{dR(\alpha_j \cdot \phi_j + \tilde{u}_0)}{d\alpha_j} = \frac{d[A(\alpha_j \cdot \phi_j + \tilde{u}_0) - f]}{d\alpha_j} = A(\phi_j) \quad (21)$$

Diante disso, o Método do Mínimo Quadrado passa a ser descrito por:

$$\alpha_i \cdot \int_{\Omega} A(\phi_i) \cdot A(\phi_j) d\Omega = \int_{\Omega} [f - A(\tilde{u}_0)] \cdot A(\phi_i) d\Omega \quad (22)$$

Para fins de utilização da Equação (12), têm-se as Equações (16) e (17). No caso deste método, deve-se observar que a matriz A_j é simétrica.

2.5 – SOFTWARE ANSYS

ANSYS é um dos softwares comerciais mais usados na engenharia para resolução de problemas que envolvem o MEF.

Atualmente, o ANSYS pode ser usado em muitos ramos da engenharia, abrangendo a aeroespacial, automotiva, eletrônica e nuclear. No entanto, para se usar o ANSYS ou qualquer outro programa que trabalhe com o MEF inteligentemente, é imperativo que se entenda conceitos básicos e limitações do Método dos Elementos Finitos (MEF), que já foram discutidos (VINHAIS, 2004).

Para o uso do ANSYS, é preciso conhecer os passos básicos que envolvem uma análise no MEF. Em seguida será descrito passo a passo o procedimento para implementação do MEF utilizando o ANSYS para solução de um problema de uma equação diferencial parcial linear algébrica.

2.5.1 – FASE DE PRÉ-PROCESSAMENTO

Criar e discretizar o domínio no MEF, ou seja, ao modelá-lo, subdividir o problema em nós e elementos.

Assumir uma função de forma para representar o comportamento físico de cada elemento, ou seja, uma função de aproximação contínua é assumida para representar a solução do elemento.

Desenvolver equações para um elemento. Juntar os elementos para representar o problema inteiro. Construir a matriz de rigidez global. Aplicar condições de contorno, condições iniciais e carregamento.

As definições e conceitos básicos já citados que envolvem as etapas da fase de pré-processamento no MEF está descrito a seguir.

2.5.1.1 – DISCRETIZAÇÃO

Consiste na divisão em elementos finitos. Idéia bastante utilizada na engenharia, onde usualmente tenta-se resolver um problema complexo, subdividindo-o em uma série de problemas mais simples. O intuito principal consiste em se dividir o domínio (meio contínuo) do problema em sub-regiões de geometria simples (formato triangular, quadrilateral, cúbico, etc.), conforme ilustra esquematicamente a Figura 2 (SOUZA, 2005).

Os elementos finitos utilizados na discretização (subdivisão) do domínio do problema são conectados entre si através de determinados pontos, denominados nós ou nodais, conforme indica a Figura 2. Ao conjunto de elementos finitos e pontos nodais, dá-se, usualmente o nome de malha de elementos finitos (SOUZA, 2005).

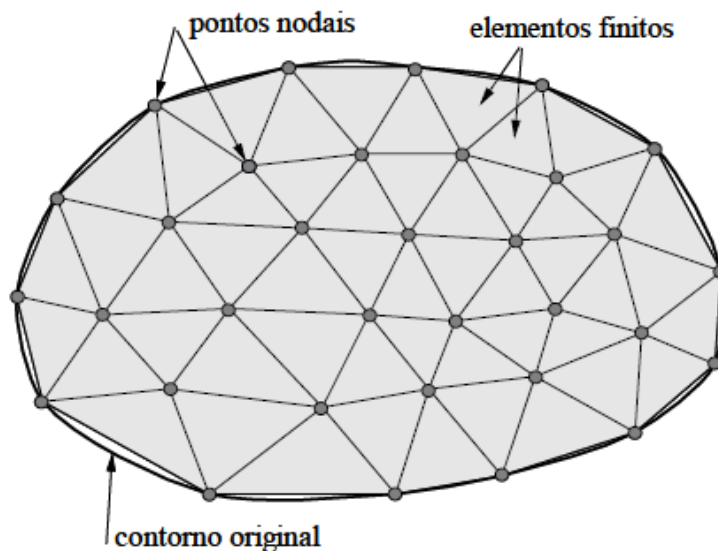


Figura 2 – Malha de elemento finito (para problema plano)

FONTE: SOUZA, 2005, p. 1.

2.5.1.2 – CONCEITO DE GRAU DE LIBERDADE NO MEF

Além dos conceitos de “elementos finitos” e “nós” no MEF, outro conceito muito importante refere-se ao “Grau de Liberdade” ou “GDL”. A idéia de grau de liberdade tem sua origem no movimento de partículas em problemas da Mecânica, onde se considera que, conforme ilustra a Figura 3 (SOUZA, 2005):

- Um ponto apresenta, no espaço tridimensional, três graus de liberdade, quais sejam três possíveis movimentos de translação.
- Mais genericamente, um corpo rígido apresenta, no espaço tridimensional, seis graus de liberdade, quais sejam três possíveis de translação e três possíveis de rotação.

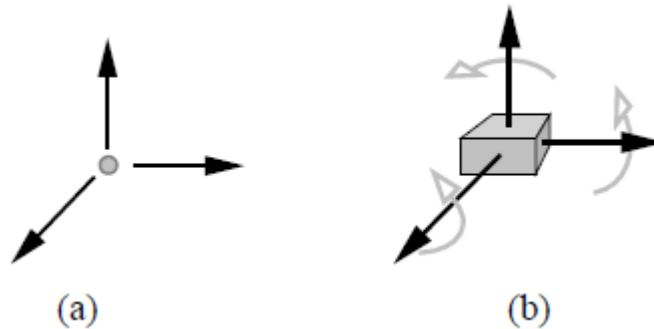


Figura 3 – Graus de liberdade. a) graus de liberdade de um ponto; b) graus de liberdade de um corpo rígido.

FONTE: SOUZA, 2005, p. 5.

O comportamento de um elemento é praticamente definido pelo número e posicionamento dos nós, e pelo número de graus de liberdade (GDL) por nó. O mesmo elemento finito (com a mesma forma e mesmo número de nós), como por exemplo, o elemento triangular de três nós pode ser utilizado com diferentes graus de liberdade, dependendo da dimensão e tipo do problema em questão.

Em problemas de mecânica dos sólidos (análise de tensões), os graus de liberdade dos nós correspondem aos possíveis movimentos que estes podem sofrer. Por exemplo, o problema de análise de tensões em um meio tridimensional apresenta três graus de liberdade por nó (três translações). No caso plano, existem dois graus de liberdade por nó (duas translações).

Portanto, estes movimentos ou deslocamentos dos nós são as incógnitas principais da análise pelo método tradicional de Elementos Finitos do problema geral da Mecânica dos sólidos.

2.5.1.3 – FORMULAÇÃO DO ELEMENTO

Diversos tipos de elementos finitos já foram desenvolvidos. Estes apresentam formas geométricas diversas (por exemplo, triangular quadrilateral, cúbico, etc) em função do tipo e da dimensão do problema (se é uni, bi ou tridimensional). A Figura 4 apresenta a geometria de vários tipos de elementos finitos (SOUZA, 2005).

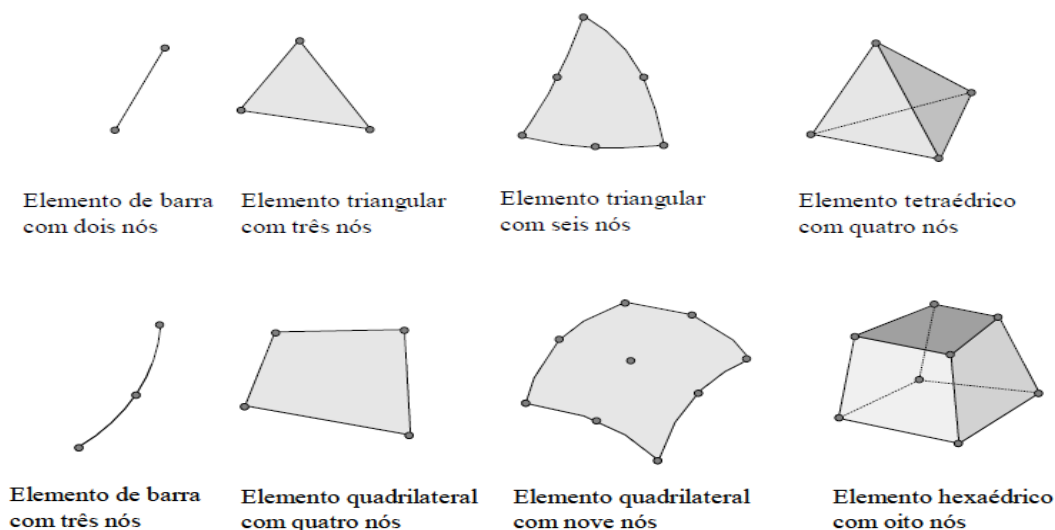


Figura 4 – Diferentes tipos de elementos finitos

FONTE: SOUZA, 2005, p. 2.

Deve-se escolher a função aproximadora para representar a solução dentro de cada elemento (ou subdomínio). Essa função deve conter coeficientes não conhecidos que serão determinados de forma a minimizar o erro na solução. Esses coeficientes devem ser escritos em função dos valores nos "nós" da grandeza em estudo (por exemplo, estado de tensões). As funções aproximadoras mais comuns são os polinômios. Note que escrevendo os coeficientes do polinômio em função dos valores nodais, se aumentarmos o grau do polinômio serão necessários mais nós na definição do elemento para poder representar o novo polinômio. No caso unidimensional esses nós podem ser definidos no interior do elemento, por exemplo (SILVA, 2012).

2.5.1.4 – MONTAGEM DO SISTEMA MATRICIAL PARA O ELEMENTO

Seguindo o procedimento descrito anteriormente procede-se a montagem do sistema matricial em função das grandezas nodais. Os coeficientes desse sistema dependem do polinômio aproximador escolhido para o elemento. São determinados inicialmente a matriz de rigidez e o vetor de efeitos externos para cada elemento isolado (SILVA, 2012).

$$[K]_e \cdot \{T\}_e = \{C\}_e + \{F\}_e \quad (23)$$

Onde $[K]_e$ é a matriz de rigidez, $\{T\}_e$ é o vetor de efeitos externos e $\{C\}_e$ e $\{F\}_e$ são vetores oriundos da resposta do sistema.

2.5.1.5 – MONTAGEM DAS MATRIZES DOS ELEMENTOS

Posteriormente realiza-se a montagem das matrizes dos elementos de forma a constituir as matrizes e vetores globais. Nessa montagem deve-se observar a numeração dos valores nodais (graus de liberdade) em cada elemento (SILVA, 2012):

$$[K] \cdot \{T\} = \{C\} + \{F\} \quad (24)$$

2.5.1.6 – APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO

Antes da Equação (24) ser resolvida ela deve ser modificada para levar em conta as condições de contorno do sistema (SILVA, 2012):

$$[\bar{K}] \cdot \{\bar{T}\} = \{\bar{C}\} + \{\bar{F}\} \quad (25)$$

2.5.2 – FASE DE SOLUÇÃO

O sistema matricial da Equação (25) deve ser resolvido utilizando métodos diretos ou iterativos para a solução de sistemas lineares simultaneamente para se obter soluções nodais, como valores de deslocamentos de diferentes nós, ou temperatura, ou tensão mecânica, etc. No caso de matrizes esparsas deve-se tirar vantagem do grande número de termos nulos para tornar a solução do sistema mais eficiente.

2.5.3 – PÓS-PROCESSAMENTO

A solução obtida (valores nodais) deve ser organizada na forma de tabelas, plotagens de gráficos bi e tridimensionais, curvas de contorno para poder ser interpretada. Além disso, variáveis secundárias também podem ser determinadas. Essas variáveis são dadas pelas derivadas dos valores nodais (nesse caso para este trabalho tensões mecânicas) e podem ser plotadas usando vetores.

2.5.4 – PLATAFORMA ANSYS WORKBENCH

A plataforma ANSYS Workbench é a estrutura sobre a qual o conjunto mais amplo e profundo da indústria de tecnologia avançada em engenharia de simulação é construído. Esta plataforma possui como de finalidade interligar os diversos

subprogramas da *Ansys Corporation* que atua em todas as áreas da engenharia, respaldado pela aplicação do método numérico de solução, conhecido como Método de Elementos Finitos. Em outras palavras, o programa ANSYS Workbench consiste em um conjunto de sistemas computacionais, cujos procedimentos de análises e cálculo se baseia no MEF.

Cada sistema computacional acoplado no programa se destina a um determinado tipo de análise. Os diversos tipos de análises que podem ser procedidos, de modo a simular o comportamento de um conjunto real mediante a utilização do programa ANSYS Workbench, são dependentes da geometria do componente, das condições de contorno e hipóteses simplificadoras empregados na modelagem. Portanto, dado a importância e versatilidade do uso da plataforma ANSYS Workbench no desenvolvimento de simulações numéricas para engenharia, este foi software escolhido no trabalho para consubstanciar as análises dos esforços mecânicos nos enrolamentos de transformadores ocasionados por transitórios.

2.6 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM TRANSFORMADOR

Todo transformador é uma máquina elétrica cujo princípio de funcionamento está baseado nas leis de Faraday e Lei de Lenz. É constituído de duas ou mais bobinas de múltiplas espiras enroladas no mesmo núcleo magnético, isoladas destas, não existindo conexão elétrica entre a entrada e a saída do transformador. Uma tensão variável aplicada à bobina de entrada (primário) provoca o fluxo de uma corrente variável, criando assim um fluxo magnético variável no núcleo. Devido a este é induzido uma tensão na bobina de saída (ou secundário), que varia de acordo com a razão entre o número de espiras dos dois enrolamentos (Figura 5).

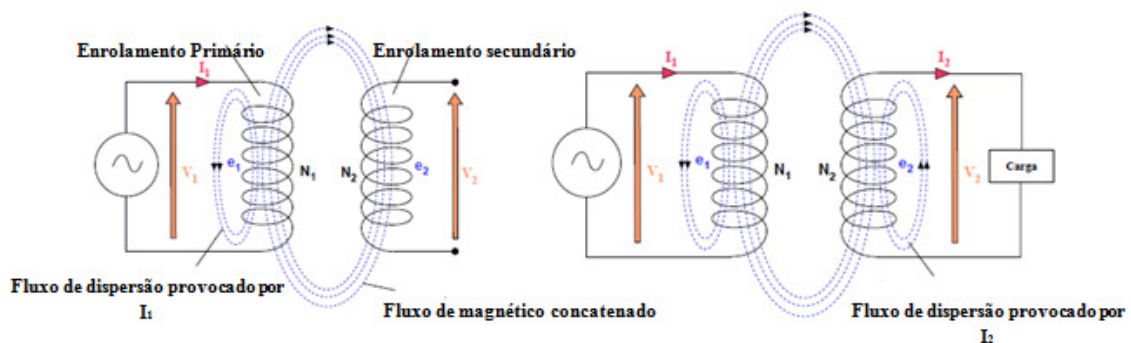


Figura 5 – Princípio de funcionamento de um transformador

FONTE: AGUIAR, 2007, p. 13.

Os transformadores monofásicos possuem em geral pequena (1000 VA) capacidade de potência aparente (chamada capacidade de transformação). Quando se necessita de maiores potências utilizam-se transformadores trifásicos. Um transformador trifásico é constituído de pelo menos três enrolamentos no primário e três enrolamentos no secundário, os quais podem ser conectados tanto em “Y” quanto em “ Δ ”. Essas várias formas de conexão dão origem aos quatro tipos de ligação dos transformadores trifásicos: Y-Y, Y- Δ , Δ -Y, Δ - Δ . Cada um desses tipos possui propriedades diferentes que determinam o uso mais adequado conforme a aplicação. A Figura 6 mostra um banco trifásico com os principais tipos de ligação.

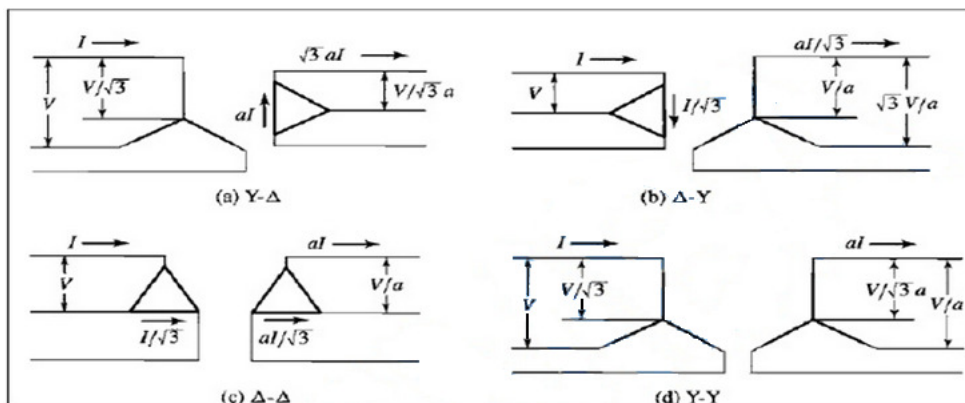


Figura 6 – Principais ligações do transformador trifásico

FONTES: MOURA, 2012.

Essa forma de construção resulta em transformadores menores e mais baratos, porém com menor flexibilidade e mais dificuldade de manutenção. Dado a importância desse dispositivo, o transformador trifásico será o alvo do estudo desse trabalho.

2.7 – CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR

O modelo utilizado para esse trabalho é um transformador isolador trifásico 15 kVA. Esse tipo de transformador é muito utilizado em locais onde se deseja isolar eletricamente duas redes. Seus enrolamentos com ligação em estrela são concêntricos de dupla camada, dispondo-se sobre cada coluna os dois enrolamentos de alta e baixa tensão, separados entre si por meio de material isolante. O núcleo construído com laminas de ferro silício com espessura de 0,5 mm e 0,3 mm será do tipo envolvido com os enrolamentos colocados sobre a coluna envolvendo o respectivo circuito magnético sem serem envolvidos por este.

Para obtenção de um modelo experimental por meio do MEF, é necessário definir o objeto de pesquisa que será analisado que nesse caso será o transformador. No primeiro passo, define-se a geometria da estrutura que se deseja analisar, como por exemplo, o núcleo e os enrolamentos do dispositivo. Em seguida, o objeto é desenhado graficamente em um programa de computador específico, que neste caso é o SolidWorks.

Na Figura 7, tem-se a vista superior do transformador detalhando os enrolamentos interno e externo, o núcleo magnético, as três colunas e algumas dimensões físicas necessárias para a implementação computacional da modelagem do transformador com a utilização do método de elementos finitos tridimensionais.

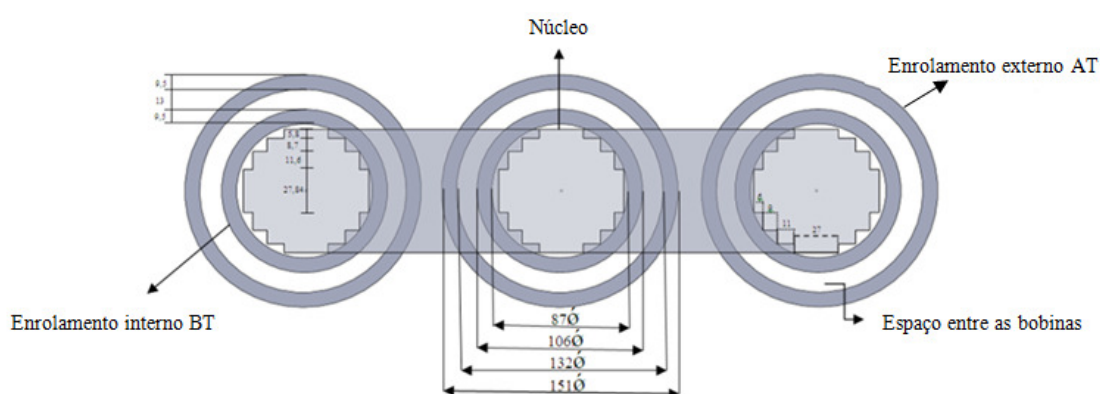


Figura 7 - Vista superior de um transformador de 15 kVA, modelados pelo software CAD SolidWorks (dimensões em mm)

Dessa forma, para implementação computacional utilizando o método dos elementos finitos, será necessário o conhecimento da geometria e das características elétricas e magnéticas do dispositivo, para completa caracterização do equipamento. Nesse sentido, apresenta-se na Tabela 2:

Tabela 2 – Características geométrica, elétrica e magnética do transformador em estudo

Potencia do Transformador	15kVA	
	Externo	Interno
Enrolamentos	Externo	Interno
Tensão (V)	220	220
Dimensão do cobre (mm)	3,5x4,5	3,5x4,5
Densidade de corrente	2,58	2,58
Numero de espiras	66	66
Perdas nos enrolamentos (W)	190	132
Resistência (Ω)	0,040	0,029
Diâmetro externo (mm)	106	87
Diâmetro interno (mm)	151	132
Altura dos enrolamentos (mm)	167	167

FONTE: AZEVEDO, 2007.

2.8 – INTRODUÇÃO À RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

Em um projeto de engenharia, seja ele de grande ou pequeno porte, é de suma importância o conhecimento do comportamento do material empregado no projeto, isto é, suas propriedades mecânicas, em diversas condições de uso. Estas condições de uso envolvem uma gama de variáveis, tais como a temperatura, tipo de carga aplicada e sua frequência de aplicação, desgaste, deformabilidade, atmosfera corrosiva, entre outros.

Na construção mecânica, as peças e componentes de uma determinada estrutura devem ter dimensões e proporções adequadas para suportarem esforços impostos sobre elas. Essas características são geralmente avaliadas por meios de ensaios em corpos de prova que indicam a capacidade do material de se deformar reversivelmente ou irreversivelmente, ou ainda de resistir à ruptura. A execução desse tipo de teste consiste em submeter uma amostra do material a um contínuo e unidimensional aumento de força de tração ou compressão. Os resultados desses ensaios executados no material são traduzidos em curvas em um digrama chamado “*tensão x deformação*” (Figura 8).

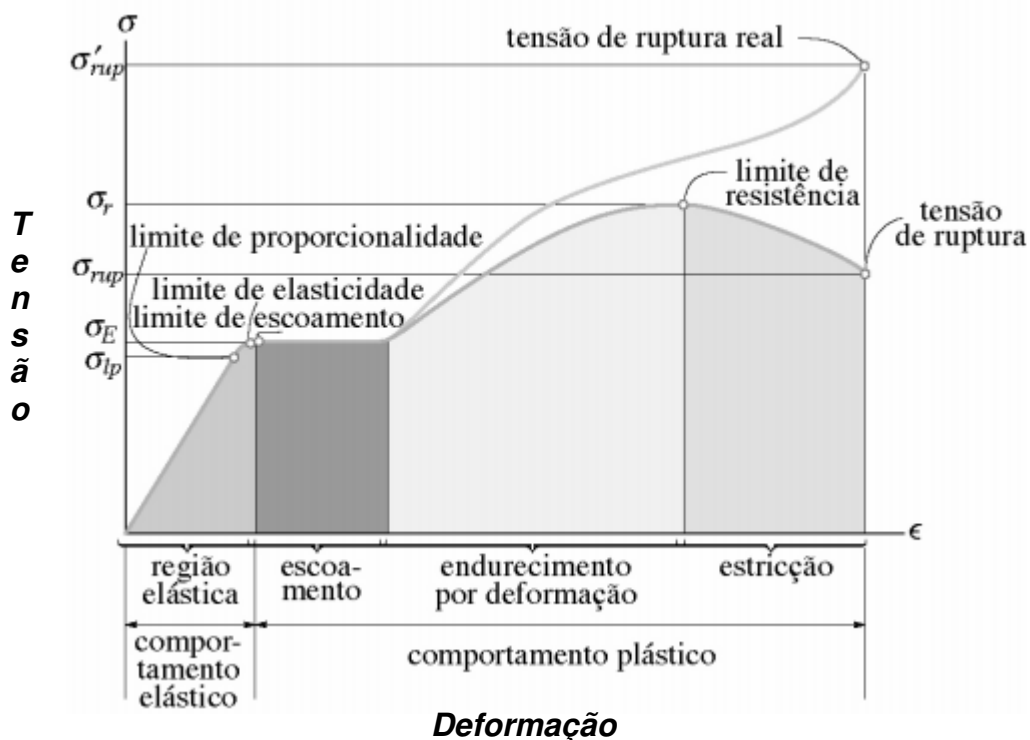


Figura 8 – Diagrama tensão-deformação em um ensaio de tração

FONTE: HIBBELER, 2006, p.64.

Na Figura 8, tem-se o diagrama tensão-deformação de um corpo de prova submetido a ensaio de tração. Nota-se que é possível identificar regiões bem distintas de

seu comportamento no gráfico. A primeira delas, a região elástica, onde ocorre o alongamento do material diretamente proporcional à tensão mecânica aplicada sem alterações nas propriedades mecânicas, ou seja, cessada a aplicação do esforço o material volta a seu estado natural. Na segunda região, o material tem seu comportamento não linear e a carga de tração começa a exceder a um determinado limite (limite elástico ou de escoamento). Passado a região elástica, começa então a ocorrer deformação permanente (comportamento plástico), não mais recuperando as suas dimensões originais se a carga for retirada. Em muitos materiais, esse ponto não é bem definido e convencionou-se adotar um percentual de alongamento para sua determinação. Dessa forma, a relação matemática que nos permite determinar a deformação (ou percentual de alongamento) de um corpo no regime elástico é dada pela Equação (26) (HIBBELER, 2006).

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (26)$$

Onde: (ε) é a deformação sofrida, (Δl) é o alongamento ocorrido e (l_f e l_0) são os comprimentos finais e iniciais respectivamente para o alongamento.

Se o material usado for ainda linear-elástico, ou seja, se a tensão for proporcional à deformação dentro da região elástica, a Lei de Hooke se aplica e o declive da curva é chamado de módulo de elasticidade E dado pela Equação (27) (HIBBELER, 2006).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (27)$$

Sendo: (σ) tração ou estresse aplicado, (E) o módulo de elasticidade do material e ε a deformação resultante.

Para determinar a resistência mecânica do enrolamento de um transformador, além do módulo de elasticidade já definido anteriormente, outra propriedade de importância direta do material condutor é o seu limite de escoamento ou limite elástico. Em outras palavras, é a tensão máxima (também chamada de tensão de escoamento) que o material suporta ainda no regime elástico de deformação, se houver algum acréscimo de tensão o material não segue a Lei de Hooke e começa a sofrer a deformação plástica.

Na engenharia, com base no limite de escoamento do material é possível restringir a tensão do material a um nível seguro. Nesse caso, portanto, é comum o uso de um fator de segurança. O fator de segurança, nada mais é do que a relação entre o

carregamento útil e o carregamento admissível (ou tensão de escoamento) dado pela Equação (28) (HIBBELER, 2006).

$$FS = \frac{\sigma_{util}}{\sigma_{adm}} \quad (28)$$

Na Figura 8, têm-se o diagrama *tensão deformação* utilizando-se o cobre como corpo de prova para diferentes níveis de “dureza” do material condutor.

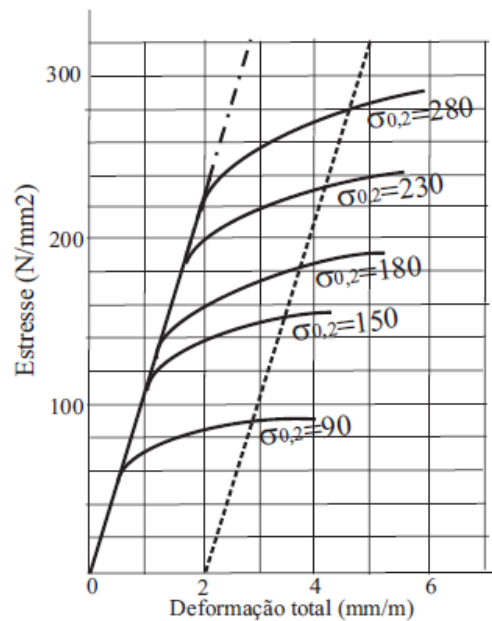


Figura 9 – Carga de prova do cobre para vários níveis de “dureza”
FONTE: BROCHURE, 2002.

Conforme mostrado na Figura 9, pode-se observar que para cada amostra de cobre há uma deformação 0,2% do material. Nesse sentido, a carga de prova pode ser entendida como o valor de esforço que produz uma deformação permanente no condutor de 0,2%. Todavia, para fins práticos é comum usar somente 80% desse valor, embora se utilizem de 85% de carga de prova de 0,1%.

Dessa forma, portanto, encerra-se esta parte sobre a introdução à resistência dos materiais, salientando-se que o nível crítico de deformação de um material é um função da área da seção transversal, do tipo do material e do tipo do condutor utilizado na construção dos enrolamentos. As várias formas e tipos de condutores disponíveis comercialmente, requerem também equações distintas para o cálculo dos esforços permissíveis correspondentes.

2.9 – ABORDAGEM ANALÍTICA

Neste tópico, será apresentado os marcos teóricos com respeito ao assunto proposto, ou seja, a análise dos efeitos das correntes de energização de *inrush* sobre a integridade de transformadores. Nesse sentido, são apresentados os tipos e origem de falhas a que são comumente submetidos estes dispositivos, bem como também a definição teórica e a caracterização dos componentes de forças e esforços eletromagnéticos que se estabelecem nos enrolamentos dos transformadores.

2.9.1 – CORRENTES DE ENERGIZAÇÃO (*INRUSH*)

Sabe-se que as correntes de alta magnitude que ocorrem durante a energização de transformadores, denominadas “correntes de *inrush*”, podem gerar uma série de efeitos danosos para o sistema elétrico suprir, como também para o próprio transformador. A ocorrência desse tipo de falhas degrada a qualidade da energia elétrica fornecida pelo sistema elétrico e pode também reduzir a vida útil do transformador (GUIMARÃES, 2008).

O fenômeno da corrente de *inrush* em transformadores de potência é resultado da energização da máquina, ou seja, quando um transformador entra em operação ele precisa ser magnetizado, o que por sua vez, resulta em uma corrente de magnetização de grande amplitude e forma distorcida, conhecida como a corrente de *inrush* (RAFFO, 2010).

Estudos revelam que o fator agravante para os esforços mecânicos máximos verificados nas estruturas do transformador ocorrem durante o primeiro pico de corrente. Dada à importância desse fenômeno, tem-se que para correntes de *inrush* para um transformador monofásico o valor do primeiro pico de corrente pode ser calculado matematicamente pela Equação (29) (KULKARNI, 2004).

$$I_{0\max} = \frac{(H \times h_w)}{n} \quad (29)$$

Sendo: ($I_{0\max}$) o pico de corrente de *inrush*, (H) intensidade do campo magnético, (n) é o número de espiras do enrolamento energizado e (h_w) altura do enrolamento energizado.

Ao contrário do que acontece com as correntes de curto circuito passantes em que o tempo de exposição à falta pode ser eliminado em dezenas de milissegundos, para

correntes de *inrush* podem ter duração de dezenas de segundos. A seguir a figura 10 ilustra a forma de onda dos primeiros picos para corrente de *inrush*.

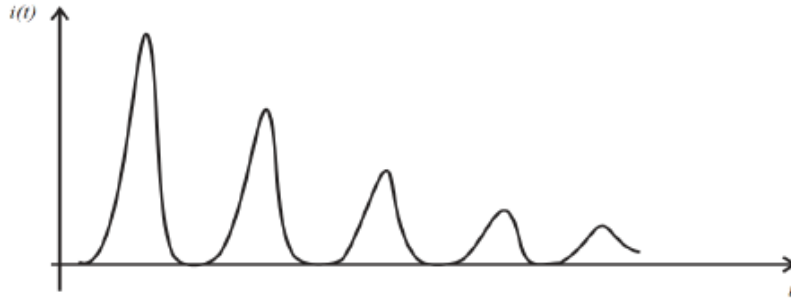


Figura 10 – Forma de onda típica da corrente transitória de energização (corrente de *inrush*)
 FONTE: GUIMARÃES, 2008, p. 3

É interessante salientar que, para transformadores trifásicos, o primeiro pico da corrente de *inrush* é direcionado apenas para o enrolamento energizado. Tendo em vista que a análise aqui abordada será feita considerando o valor do primeiro pico da corrente de *inrush* para um transformador do tipo trifásico 15 kVA e considerando apenas uma coluna do equipamento, tem-se que $I_{0max} = 1428 A$ (GUIMARÃES, 2008).

2.9.2 – ANÁLISE DAS FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS

As forças que acometem os dispositivos elétricos podem ser determinadas, através do produto vetorial da densidade de corrente da bobina pela densidade do fluxo magnético de dispersão, também conhecida como forças de Lorentz, assim demonstrada na Equação (30) (AGUIAR, 2007).

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (30)$$

Onde: (\vec{f}) é a densidade volumétrica de força magnética [N/m^3], (\vec{J}) a densidade superficial de corrente [A/m^2] e (\vec{B}) a densidade de fluxo magnético de dispersão [T].

O processo de interação dessas duas grandezas vetoriais acontece da seguinte forma: a densidade de fluxo magnético de dispersão axial interage com a densidade de corrente do enrolamento, dando origem a uma força radial. Esta é responsável pela mútua repulsão entre os enrolamentos interno e externo do transformador. Por outro lado, a interação entre o campo de dispersão radial com a corrente dá origem à uma força axial, responsável pelo esforço de compressão axial (Figura 11) (AZEVEDO, 2007).

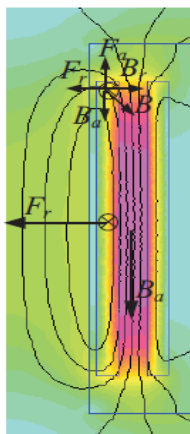


Figura 11 – Campo de dispersão e forças axiais e radiais
 FONTE: AZEVEDO, 2007, p. 36.

2.9.3 – DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS RADIAIS NOS ENROLAMENTOS

Segundo Rosentino (2011) a ocorrência da deformação radial no enrolamento interno é mais frequente que no enrolamento externo, sendo caracterizada por duas maneiras distintas. Uma delas, chamada de “*curvatura forçada*”, ocorre quando o enrolamento interno está firmemente sustentado por espaçadores localizados na direção axial com os condutores. Isso acontece quando o valor da tensão mecânica excede o limite elástico do material condutor. A outra forma de deformação é chamada “*curvatura livre*”, com o condutor se deformando livremente nos dois sentidos radiais em um ou mais pontos da espira do enrolamento. Esses tipos de falhas estão ilustrados na Figura 12.

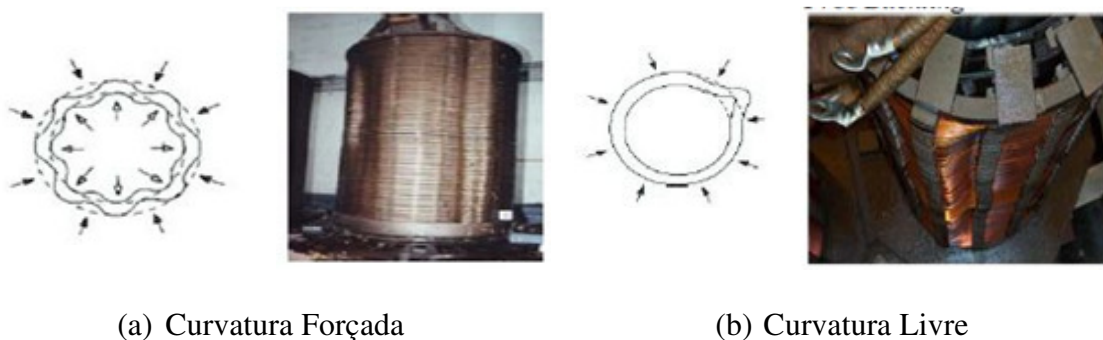


Figura 12 – Em a e b efeitos típicos dos esforços eletromecânicos nos enrolamentos causados pelas forças radiais

FONTE: ROSENTINO, 2011, p. 3.

Antes de se determinar as forças que agem nos enrolamentos do dispositivo, deve-se primeiro calcular o valor médio do fluxo de dispersão magnética nos

enrolamento. Esse valor médio do fluxo de dispersão magnética é dado pela Equação (31) (AZEVEDO, 2007).

$$B_a = \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot n I_n}{h} \cdot [T] \quad (31)$$

Onde: (B_a) é o fluxo magnético de dispersão, (n) é o número de espiras do enrolamento, (I_n) corrente nominal do enrolamento para corrente de *inrush*, (h) altura do enrolamento e (μ_0) permeabilidade do vácuo [$4\pi 10^{-7}$].

Dessa forma, pode-se determinar a magnitude total da força radial que age em cada enrolamento para $\frac{1}{2} B_a$ conforme a Equação (32) (FONSECA, 2010).

$$F_r = \frac{2\pi^2 \cdot (n \cdot I_n)^2 \cdot D_m}{h} \cdot 10^{-7} \cdot [N] \quad (32)$$

Sendo: (F_r) a força radial total no enrolamento [N] e (D_m) é o diâmetro médio do enrolamento [m]. Para o modelo do transformador adotado a força radial total nos enrolamentos interno e externo são respectivamente $F_{inr} = 10132 N$ e $F_{exr} = 14853 N$ (GUIMARÃES, 2008).

Dividindo-se a Equação (32) pelo valor de π , obtém-se a expressão que permite determinar o valor da força radial média, conforme a Equação (33). De acordo com essa equação a força radial média que agirá nos enrolamento interno e externo serão respectivamente $F_{i(med)} = 3225 N$ e $F_{e(med)} = 4728 N$ (GUIMARÃES, 2008).

$$F_{med} = \frac{F_r}{\pi} = \frac{2\pi \cdot (n \cdot I_{0max})^2 D_m}{h} \cdot 10^{-7} [N] \quad (33)$$

Segundo Aguiar (2007) a ação dessas forças atuando sobre os enrolamentos pode ser ilustrada na Figura 13. Observa-se na figura, que o enrolamento externo fica sujeito a uma força radial que age para fora e tende a esticar o condutor, produzindo um esforço de tração nas espiras. Por outro lado, o enrolamento interno experimenta forças radiais similares, porém dirigidas na direção do núcleo e cuja ação é de comprimir as espiras, produzindo dessa forma, esforço responsável pela compressão. Isso se deve devido as correntes em cada enrolamento possuir sentidos opostos, fazendo assim, com que os enrolamentos experimentem força de repulsão entre si.

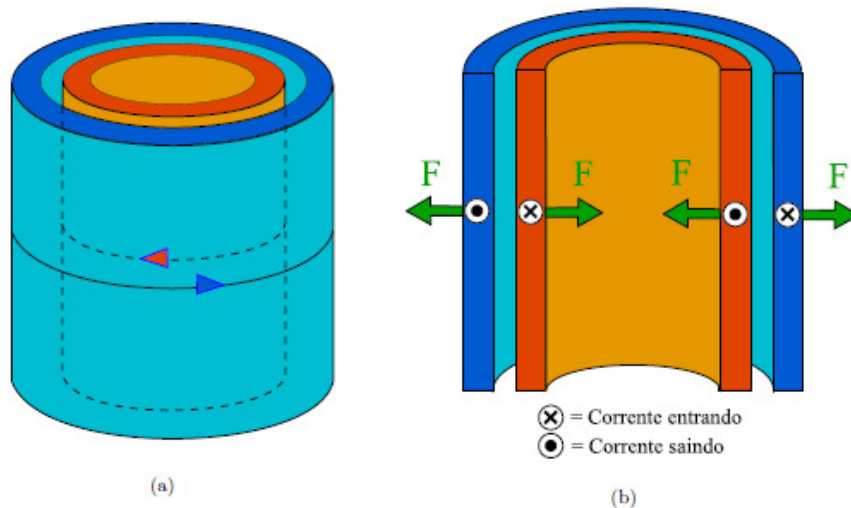


Figura 13 – (a) Sentido das correntes nos enrolamentos; (b) Forças nos enrolamentos
 FONTE: AGUIAR, 2007, p. 37.

Para o cálculo do esforço de tração médio que atua no enrolamento externo, o mesmo será considerado como uma camada cilíndrica, conforme a Figura 14, à qual o enrolamento pode ser comparado. Muito embora a força não seja aplicada no interior do enrolamento, mas sim distribuída linearmente através de suas dimensões, a força equivalente pode ser obtida fazendo o produto da pressão exercida vezes à área da superfície interna total.

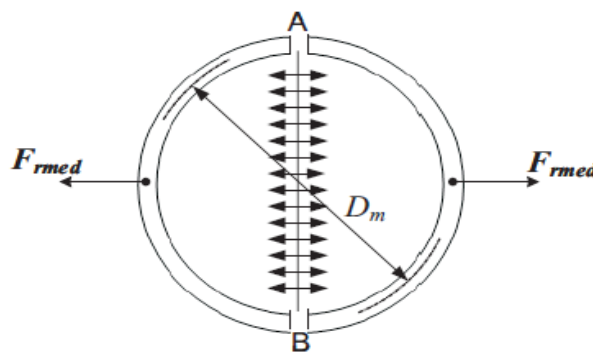


Figura 14 – Esforço de tração médio no enrolamento externo
 FONTE: FONSECA, 2010, p. 38.

Dessa forma, a partir da força radial média e das dimensões físicas do condutor, a tensão de tração média pode ser calculado de acordo com a Equação (34) (GUIMARÃES, 2008).

$$\sigma_{med} = \frac{I_{max}^2}{h} \cdot \frac{n \cdot \pi \cdot D_m}{S} \cdot 10^{-6} \cdot [N/m^2] \quad (34)$$

Onde: (S) é secção transversal da espira. Logo a tensão média para o enrolamento interno e externo será $\sigma_{i(\text{med})} = 15,51 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ e $\sigma_{e(\text{med})} = 22,74 \times 10^6 \text{ N/m}^2$.

Pode-se notar ainda que $n\pi D_m$ é o comprimento total do condutor do enrolamento. Assim multiplicando-se o numerador e o denominador da Equação (34) pela resistividade do condutor na temperatura de 75°C , chega-se na Equação (35) (AZEVEDO, 2007).

$$\sigma_{\text{med}} = \frac{I_{\text{max}}^2}{\rho \cdot h} \cdot \frac{R_{cc}}{10^7} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \quad (35)$$

Onde: (R_{cc}) é resistência em corrente contínua do condutor [Ω] e (ρ) resistividade do condutor na temperatura de 75°C [$\Omega \cdot \text{m}$].

2.9.4 – DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS AXIAIS NOS ENROLAMENTOS

As forças axiais são forças originadas como consequência da interação da densidade de fluxo magnético de dispersão radial pela densidade de corrente, responsável pelo esforço de compressão. Até onde se conhece sobre esse tipo de força, sabe-se que elas são máximas nas extremidades e dirigidas para o ponto médio do enrolamento.

Rosentino (2011) comenta que sob ação desse tipo de força, os condutores dos enrolamentos podem curva-se entre os espaçadores isolantes localizados radialmente entre os enrolamentos conforme a Figura 15. A ocorrência deste tipo de fenômeno é uma das características nos enrolamentos do tipo disco geralmente utilizados em grandes transformadores.

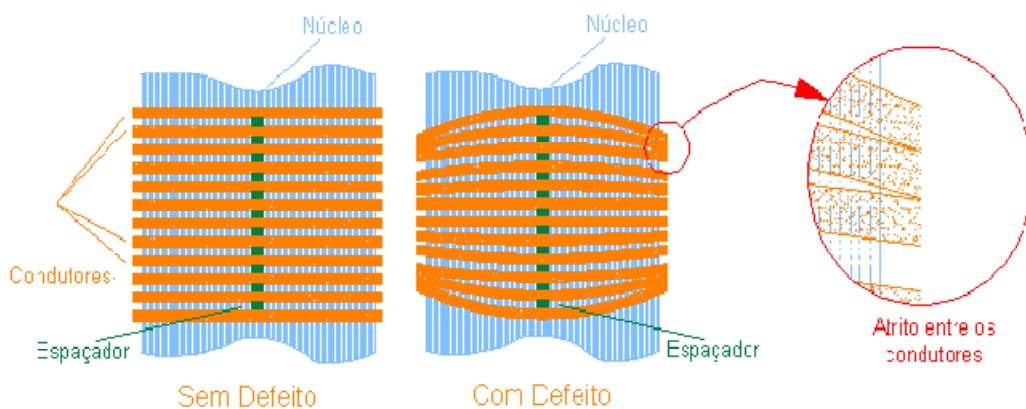


Figura 15 – Esforço de compressão axial nos enrolamentos

FONTE: GUIMARÃES, 2008, p. 2.

Além disso, o desalinhamento axial dos enrolamentos e o uso de derivações (tapes) contribuem consideravelmente para aumento das forças axiais nas bobinas.

Na abordagem desse tipo de força, serão consideradas bobinas com 2, 4 e 8 espaçadores radiais. Os espaçadores dentre suas funções permitem a circulação do fluido para que este possa retirar o calor gerado pelos enrolamentos. Será considerada também a ação do mesmo sobre as estruturas de sustentação dos enrolamentos no que diz respeito aos esforços gerados pelas forças axiais.

As análises sobre esse tipo de força se dá através de duas situações bem distintas também chamadas de situações ideal e real. (GUIMARÃES, 2008). No estudo realizado por esse trabalho, porém, só será considerada o caso da condição ideal para o cálculo das forças axiais no enrolamento do transformador. A seguir serão apresentadas as duas situações de análise para esse tipo de força.

2.9.4.1 – CONDIÇÃO IDEAL

Nessa condição, a força axial total pode ser calculada considerando o ponto médio do enrolamento definido pela Equação (36) (WATERS, 1953).

$$F_a = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_{\max})^2 \cdot D_m}{10^{11} \cdot h^2} \cdot \left[d_0 + \frac{d_1 + d_2}{3} \right] \cdot [N] \quad (36)$$

Onde: (nI_{\max}) é a força magnetomotriz do enrolamento [$A - espiras$], (D_m) diâmetro médio do transformador, considerando ambos os enrolamentos [m], (h) altura do enrolamento [m], (d_0) espaço entre os enrolamentos [m] e $(d_1$ e $d_2)$ espessura radial dos enrolamentos [m]. Nesse caso, portanto, para as correntes de energização de *inrush* o valor total das forças compressivas que agem nos enrolamento interno e externo será de $F_{i(atotal)} = 970,71 N$ e $F_{e(atotal)} = 1423,37 N$.

2.9.4.2 – CONDIÇÃO NÃO IDEAL

Para condição não ideal, o método para o cálculo analítico da força axial torna-se mais complexo e impreciso. Apesar das dificuldades que o método analítico impõe, será utilizado um método analítico que produz resultados satisfatórios no que diz respeito às forças axiais. Esse método, também conhecido como método ampère-espiras residual, disponibiliza através de formulas razoáveis resultados confiáveis.

De acordo com Azevedo (2007), para se efetuar o cálculo das forças axiais de compressão pelo método mencionado, será necessária a determinação da densidade de fluxo magnético radial. Assim, pode se efetuar o cálculo do fluxo magnético radial, com base no diâmetro médio do transformador que é dado pela Equação (37).

$$B_r = \frac{4\pi}{10^4} \cdot \frac{a(nI_{\max})}{2h_{\text{eff}}} \cdot [T] \quad (37)$$

Onde: (nI_{\max}) é a força magnetomotriz do enrolamento [A – espiras], (h_{eff}) é o comprimento efetivo do caminho do fluxo radial, o qual é diferente para cada arranjo de tap e (a) o comprimento do tap, expresso como uma fração do comprimento total do enrolamento sem derivação.

Por conseguinte à força axial no transformador utilizando o método ampère-espiras máxima é determinada com base na Equação (38) (HEATHCOTE, 1998).

$$F_a = \frac{2\pi a \cdot (nI_{\max})^2}{10^7} \cdot \frac{\pi D_m}{h_{\text{eff}}} \cdot [N] \quad (38)$$

O arranjo desse tipo de força pode ser ilustrado na Figura 16, nota-se que os ampère-espiras radiais origina os fluxos radiais e, por conseguinte, as forças axiais entre os enrolamentos. É possível observar também que, a concentração do fluxo do magnético devido ao desequilíbrio causado pela assimetria, aumenta a intensidade dessas forças nas extremidades dos enrolamentos.

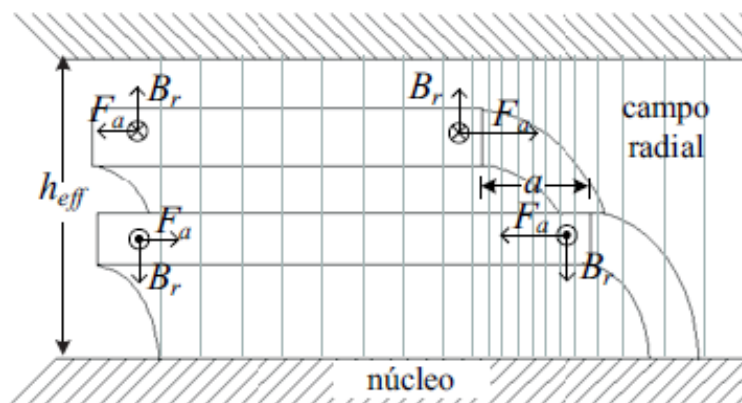


Figura 16 – Seção transversal de um lado do transformador mostrando as forças axiais nos enrolamentos e a distribuição da densidade de fluxo de dispersão radial

FONTE: AZEVEDO, 2007, p. 52.

2.9.5 – FALHAS DEVIDO AO ESFORÇO DAS FORÇAS RADIAIS

Como já dito anteriormente as forças radiais produzem efeitos diferentes nas bobinas interna e externa do transformador. Os enrolamentos externos sujeitos às forças que tendem a puxá-lo para fora, experimentam esforços de tração, enquanto que os enrolamentos internos experimentam forças dirigidas para dentro de suas circunferências fazendo com que o mesmo fique sujeito aos esforços de compressão (ver figura 12). Para enrolamentos concêntricos, a suportabilidade mecânica do enrolamento externo, depende da resistência à força de tração do condutor. Contudo, a resistência mecânica do enrolamento interno, depende das estruturas de suporte providenciadas para os condutores. Em virtude disso, é comum a prática da ocorrência da deformação radial do enrolamento interno, enquanto que o rompimento do enrolamento externo é mais difícil de ocorrer.

A intensidade da tensão de tração experimentado na bobina externa do transformador pode ser estimada de acordo com a Equação 34. Esse esforço, dependendo de seus valores, poderá causar danos à isolamento do condutor, caso a tensão de tração exceda o limite de escoamento do material do condutor. No entanto, a possibilidade de falha nos enrolamentos sujeitos a esse tipo de esforço é considerada pequena, uma vez que, normalmente são usados condutores dimensionados para um valor de carga de prova de 0,2%.

Por outro lado, os enrolamentos internos em decorrência das cargas de compressão radial ficam mais expostos às falhas. Essas falhas devido a esse tipo de carregamento podem manifestar-se de duas maneiras distintas. A primeira delas quando o enrolamento interno está firmemente sustentado por espaçadores (ver Figura 17), onde nesse caso, os espaçadores estão localizados axialmente, e a estrutura de suporte como um todo tem rigidez mecânica maior que os condutores. Neste caso, os condutores podem apresentar uma deformação entre todos os suportes ao longo da circunferência da bobina, com a curvatura voltada para dentro, desde que o valor da tensão atinja o regime plástico do material do condutor. Esse tipo de falha, denominada “deformação forçada”, está ilustrada na Figura 12(a).

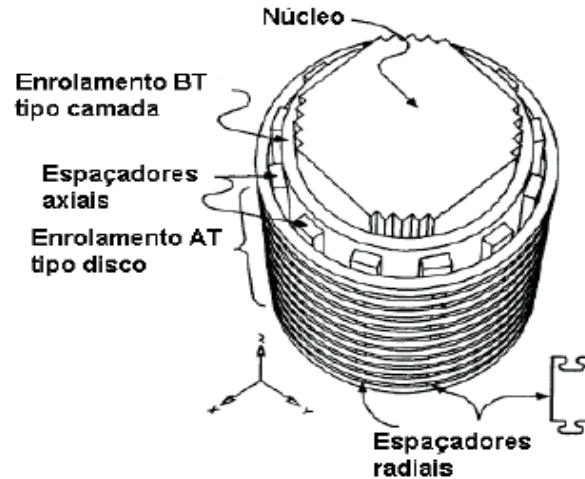


Figura 17– Ilustração dos espaçadores axiais e outros componentes do transformador
 FONTE: FONSECA, 2010, p. 48.

A outra forma de falha que afeta a bobina interna é chamada de “deformação livre”. Para este 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 aquelas proporcionadas pela de suporte. Diante disso, a projeção do condutor pode ser dar tanto para dentro quanto para fora, em um ou mais pontos da circunferência, conforme ilustra a Figura 12(b). Para simulação desse tipo de esforço no trabalho, será considerado o caso da deformação livre nos condutores, desprovidos dos espaçadores axiais.

Um condutor sujeito às forças radiais normalmente é modelado como um anel circular, sujeito a uma carga radial uniformemente distribuída. Neste caso, o valor da tensão crítica é determinado com base na utilização ou não de suporte axiais. Dessa forma, portanto, para os casos de enrolamentos desprovidos de estruturas de sustentação axial, ou seja, que não possuem espaçadores axiais para aumentar a resistência aos esforços adicionais de compressão, o valor da tensão crítica pode ser calculado pela Equação (39) (BROCHURE, 2002).

$$\sigma_{crit} = \frac{E \cdot e^2}{4 \cdot R^2} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (39)$$

Onde: (σ_{crit}) é o valor do estresse crítico [N/m^2], (E) é o módulo de elasticidade [N/m^2], (e) é a espessura do condutor [m] e (R) é o raio do enrolamento [m]. Para o modelo do transformador aqui estudado o valor da tensão critica será de $\sigma_{(crit)i} = 144,70 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ para bobina interna.

Por outro lado, para os enrolamentos providos de suporte axiais, os esforços de compressão podem ser estimados de acordo com a Equação (40) (AZEVEDO, 2007).

$$\sigma_{crit} = \frac{E(\delta) \cdot (ke^2) \cdot N^2}{12 \cdot D^2} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (40)$$

Sendo: ($E(\delta)$) o modulo de elasticidade incremental no valor crítico [N/m^2], (e) a espessura do condutor, (k) constante para espessura equivalente, D diâmetro do enrolamento [m] e (N) é o número de suportes axiais.

É importante lembra que para os enrolamentos internos sujeitos às forças radiais que experimentam as deformações do tipo “forçada” (ver Figura 12(a)), é necessário o uso de suportes internos, de maneira a prevenir qualquer movimento do enrolamento para dentro. O esforço, portanto, verificado para essa situação é função da distância entre os suportes e da dimensão dos condutores, cujo valor é dado pela Equação (41) (AZEVEDO, 2007).

$$\sigma_{crit} = \frac{F_{réd} \cdot l^2}{2 \cdot h \cdot e^2} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (41)$$

Onde: (σ_{crit}) é a tensão crítica do enrolamento [N/m^2], ($F_{réd}$) é a força radial, (l) é distância entre os suportes, (h) é a altura do condutor e (e) é a espessura do condutor.

O projeto de enrolamentos que suportem os esforços de tração é relativamente mais fácil do que o projeto dos esforços de compressão. Isso se deve, devido ao fato da tensão de tração ser mantido abaixo do limite de escoamento do material condutor. Contudo, o mesmo não é tão simples para os enrolamentos sujeito aos esforços de compressão, que para assegurar sua integridade física e mecânica é necessário o uso de estruturas de suporte interno, como os espaçadores axiais. Em outras palavras, as técnicas para o estabelecimento de critérios de projetos para a determinação da resistência mecânica dos enrolamentos internos sujeitos à compressão é complexa e pode variar de fabricante para fabricante.

Deve-se considerar ainda que, as expressões das forças radiais e dos esforços de tração radial evidenciado anteriormente, podem ser utilizadas para o cálculo analítico das forças e tensões tanto no enrolamento interno quanto no externo, devendo-se apenas atentar para o uso do diâmetro correto do enrolamento que estiver sendo analisado (AZEVEDO, 2007).

2.9.6 – FALHAS DEVIDO AOS ESFORÇOS DAS FORÇAS AXIAIS

As altas forças de compressão axial nas extremidades das bobinas podem causar deformação nas estruturas de fixação das extremidades dos enrolamentos. Os elementos de fixação, dentre outras funções, tem como objetivo exercer uma pressão efetiva sobre os enrolamentos durante as passagens de transitórios elevados para garantir a resistências mecânicas aos esforços axiais.

A Figura 18 descreve a ação dos esforços atuante entre os enrolamentos devido à ação dessas forças. Conforme se pode observar na figura, o esforço de compressão provocado pela força F_1 atua em direção ao centro dos enrolamentos e provoca deslocamento desses condutores (ver Figura 15). Esse tipo de esforço é maior nas extremidades da bobina, pois é onde há mais intensidade da componente radial do campo magnético.

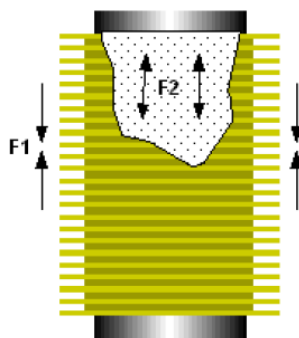


Figura 18 – Esforço eletromecânico sobre os enrolamentos devido à passagem de transitório elevados

FONTE: BECHARA, 2010, p. 38.

Quanto ao esforço provocado pela força F_2 atua na direção dos elementos de prensagem do bloco de bobinas, provocando o deslocamento e quebra das partes. Além disso, havendo a possibilidade de danos ao núcleo em função do contato dos condutores energizados dos enrolamentos contra os mesmo. A intensidade desses esforços é dependente da simetria das bobinas que compõem o bloco, tornando-se maiores quando há diferenças no tamanho ou de alinhamento entre os enrolamentos.

Conforme já mencionado anteriormente, as tensões relacionadas à inclinação dos enrolamentos entre os espaçadores radiais podem ser facilmente calculadas utilizando-se a Equação (42) (BROCHURE, 2002).

$$\sigma = \frac{F_a \cdot L^2}{2 \cdot e \cdot h^2} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (42)$$

Onde: (F_a) é a força axial, (L) a distância entre os espaçadores radial, (e) dimensão radial do condutor e (h) a dimensão axial do condutor. Desse modo, tem-se

que é possível determinar analiticamente os valores das tensões axiais para enrolamentos 2, 4 e 8 espaçadores conforme listados na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 – Valores dos esforços axiais para as condições 2, 4 e 8 espaçadores.

	Esforço axial interno	Esforço axial externo
Bobina 2 espaçadores	$95,83 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	$302,13 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$
Bobina 4 espaçadores	$23,96 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	$70,53 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$
Bobina 8 espaçadores	$5,99 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	$18,88 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$

Outro tipo de falha devido à ação das cargas axiais, que é também umas das principais causas de defeito em grandes transformadores é a inclinação dos condutores em forma de zig-zag conforme podemos observa na Figura 19. Esse tipo de deformação se dá, devido à compressão cumulativa, aplicada aos condutores que é transmitida através dos espaçadores e das estruturas de fixação do transformador.

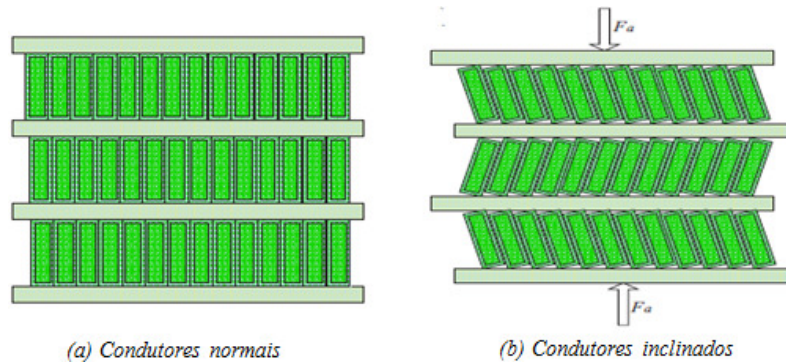


Figura 19 – Inclinação de condutores devido à força axiais – seção transversal

FONTE: AZEVEDO, 2007, p. 62.

Diante disso, a carga crítica que o enrolamento pode suportar, é, portanto, não somente em função dos parâmetros do condutor, mas também, da construção do enrolamento, incluindo a isolamento entre condutores. Esta carga crítica para esse tipo de falha pode ser determinada pela Equação (43) (BROCHURE, 2002).

$$\sigma_{crit} = \frac{E \cdot h^2}{14 \cdot R^2} + \frac{m \cdot s \cdot c \cdot e^2}{12 \cdot \pi \cdot R \cdot h^2} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (43)$$

Sendo: (E) o módulo de elasticidade [N/m^2], (h) dimensão axial do condutor [m], (R) raio do enrolamento [m], (m) número de cunhas, (s) comprimento dos espaçadores, (c) modulo equivalente de elasticidade do papel [N/m^2] e (e) a dimensão radial do condutor. O valor do esforço nessa região não deve ultrapassar o limite suportável pelo condutor que nesse caso é cerca de 1200 kg/cm^2 ($117,72 \times 10^6 \text{ N/m}^2$) para o cobre (AZEVEDO, 2007).

2.10 – MODELAGEM NUMÉRICA

A simulação numérica pode resolver problemas complexos, com condições de contorno gerais e geometrias complexas. A utilização deste método auxiliado do experimental vem sendo usado para validação dos modelos numéricos e matemáticos, para o entendimento dos fenômenos associados ao problema real, apresentando, na maioria dos casos, boa precisão e viabilidade econômica, promovendo resultados satisfatórios, tanto para o meio industrial, como para o científico (LIMA, 2011).

Dessa forma, portanto, serão apresentadas as etapas inerentes à modelagem numérica do modelo do transformador adotado. É oportuno, que se descreva mais detalhadamente algumas das etapas para montagem e solução do problema de um transformador.

2.10.1 – CRIAÇÃO DA GEOMETRIA

As características gerais do transformador em estudo estão descritos na Tabela 2. A principal justificativa para o uso deste transformador de pequeno porte está alicerçada na riqueza dos detalhes construtivos do equipamento à disposição dos pesquisadores. Não obstante a isto, outra justificativa, prende-se ao fato de que é possível uma comparação entre os valores obtidos analiticamente e computacionalmente com aqueles oriundos dos ensaios experimentais, sendo esta etapa uma das contribuições deste trabalho.

As informações geométricas, fornecidos por determinados trabalhos em principal as de Azevedo (2007) e Guimarães *et al* (2008), foram de fundamental importância, pois possibilitaram a concepção do modelo geométrico do transformador. A construção do modelo foi realizada em plataforma CAD e em escala real, no qual foi reproduzida com a máxima fidelidade possível. Em seguida, tem-se a Figura 20 do transformador com seus principais componentes.

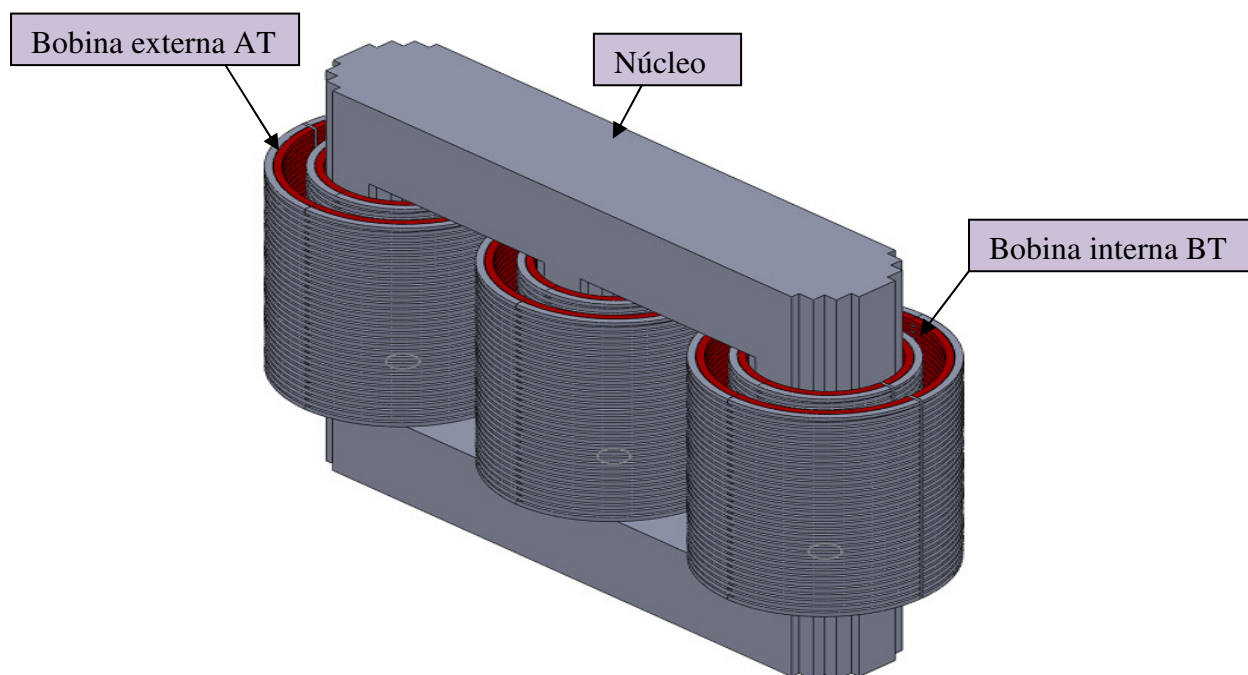


Figura 20 – Desenho em CAD do transformador (vista 3D)

2.10.2 – SELEÇÃO DOS MATERIAIS

Criada a geometria do modelo, segue-se então a fase de seleção do material que compõe cada elemento que constitui o dispositivo. A escolha do material é uma das etapas fundamentais em simulações numéricas, pois é através dela que serão definidas as propriedades mecânicas que irão caracterizar a resposta do material aos esforços impostos ao mesmo. Além disso, vale ressaltar também que uma escolha inadequada ou indevida do material implicará diretamente na qualidade das propriedades mecânica do sistema podendo este até mesmo vir à falhar, uma vez que, não consigam suportar os esforços aplicados a ele.

Os materiais utilizados na simulação serão: cobre eletrolítico, material que constitui as bobinas por ser simultaneamente resistente e maleável além de um bom condutor elétrico de secção reta retangular por ter melhor superfície de apoio e assim poder transferir melhor os esforços mecânicos com mais uniformidade; liga de ferro silício ou aço-silício, material que compõe o núcleo do transformador é um material que combina grande permeabilidade magnética e resistência mecânica e por fim cartão prensado ou madeira seca material do qual é feitos os espaçadores dos enrolamentos. A Tabela 4 retrata melhor as principais propriedades físicas e mecânicas do cobre que serão importantes no estudo aqui proposto.

Tabela 4 – Propriedades física e mecânica do cobre

Propriedades	
Peso específico/ Densidade (g/cm³)	8,94
Resistividade elétrica	1,673 x 10 ⁻⁶
Condutibilidade térmica (Ω m) a 20 °C	1,67 10 ⁻⁸
Condutibilidade elétrica (% IACS)	101,00
Modulo de Elasticidade (GPa)	130
Estrutura Cristalina	Cúbica de Face Centrada
Coefficiente de Poisson	0,34

FONTE: SILVA, 2005

Definida, portanto, a etapa de construção do modelo geométrico e da seleção do tipo de material será realizada a construção da malha de elemento finito.

2.10.3 – DEFINIÇÃO DA MALHA DE ELEMENTO FINITO

Segundo Lima (2011) a criação da malha é uma das principais etapas iniciais a ser definida em uma simulação. A qualidade da definição da malha reflete diretamente na precisão dos resultados, além de influenciar diretamente na convergência do modelo analisado.

O software utilizado para criação da malha de elementos finitos foi o ANSYS Workbench. Este software utiliza elementos tetraédricos, prismáticos e piramidais para geração de malhas.

A criação da malha do modelo geométrico foi realizada levando em consideração o tipo de análise em questão. De modo que, para geração da malha das forças radiais apenas a coluna central do transformador junto com seus enrolamentos foram inseridos na simulação. Quanto que para as forças axiais apenas os enrolamentos interno e externo junto com os seus respectivos espaçadores radiais foram utilizados para gerar a malha. Essa metodologia se justifica, pois diminui consideravelmente o tempo de processamento da simulação. Possibilitando assim, um refinamento detalhado do dispositivo. Na Figura 21, portanto têm-se as malhas utilizadas neste trabalho, com suas respectivas características.

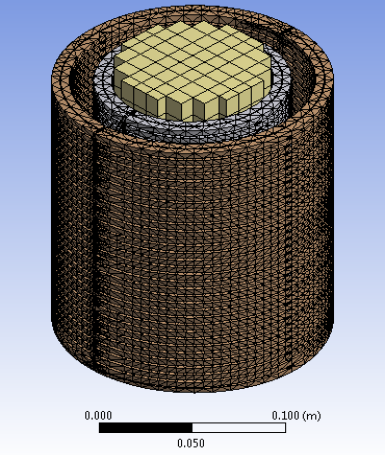
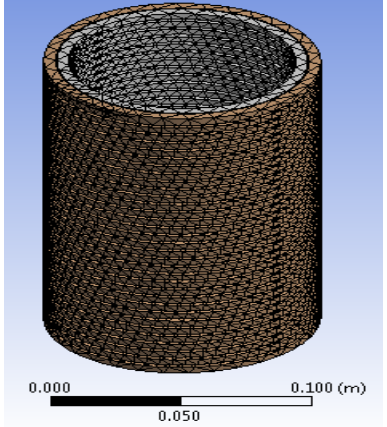
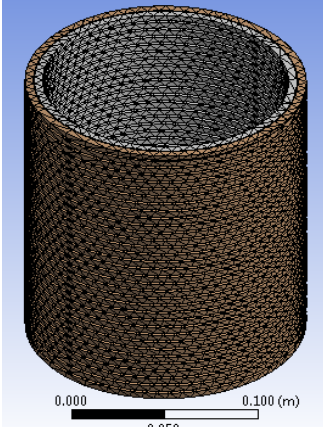
	<p align="center"><u>Coluna Central do Transformador para Força Radial</u></p>	
	<p align="center"><u>Bobina Interna do Transformador para Força Axial</u></p>	
	<p>Para 2 espaçadores</p>	<p>Numero de elemento: 24665 Numero de nós: 95269</p>
	<p>Para 4 espaçadores</p>	<p>Numero de elemento: 29101 Numero de nós: 125899</p>
	<p>Para 8 espaçadores</p>	<p>Numero de elemento: 31721 Numero de nós: 150369</p>
	<p align="center"><u>Bobina Externa do Transformador para Força Axial</u></p>	
	<p>Para 2 espaçadores</p>	<p>Numero de elemento: 28487 Numero de nós: 108344</p>
	<p>Para 4 espaçadores</p>	<p>Numero de elemento: 34767 Numero de nós: 142963</p>
	<p>Para 8 espaçadores</p>	<p>Numero de elemento: 37835 Numero de nós: 167914</p>

Figura 21 – Malha de elementos finitos, análise computacional.

2.10.4 – APLICAÇÕES DAS FORÇAS

Nessa etapa, feito a importação da geometria para o *software* a ser feito a análise, bem como a definição das características mecânicas do material que envolve o dispositivo (como descrito no subitem seleção materiais), além da criação da malha e dos dados referentes ao refinamento dessa malha (ver Figura 21) é feito então o carregamento de forças para o modelo. Dessa forma, portanto, têm-se de acordo com figura 22 o carregamento de forças axiais e radiais para as bobinas interna e externa do dispositivo de acordo com a análise.

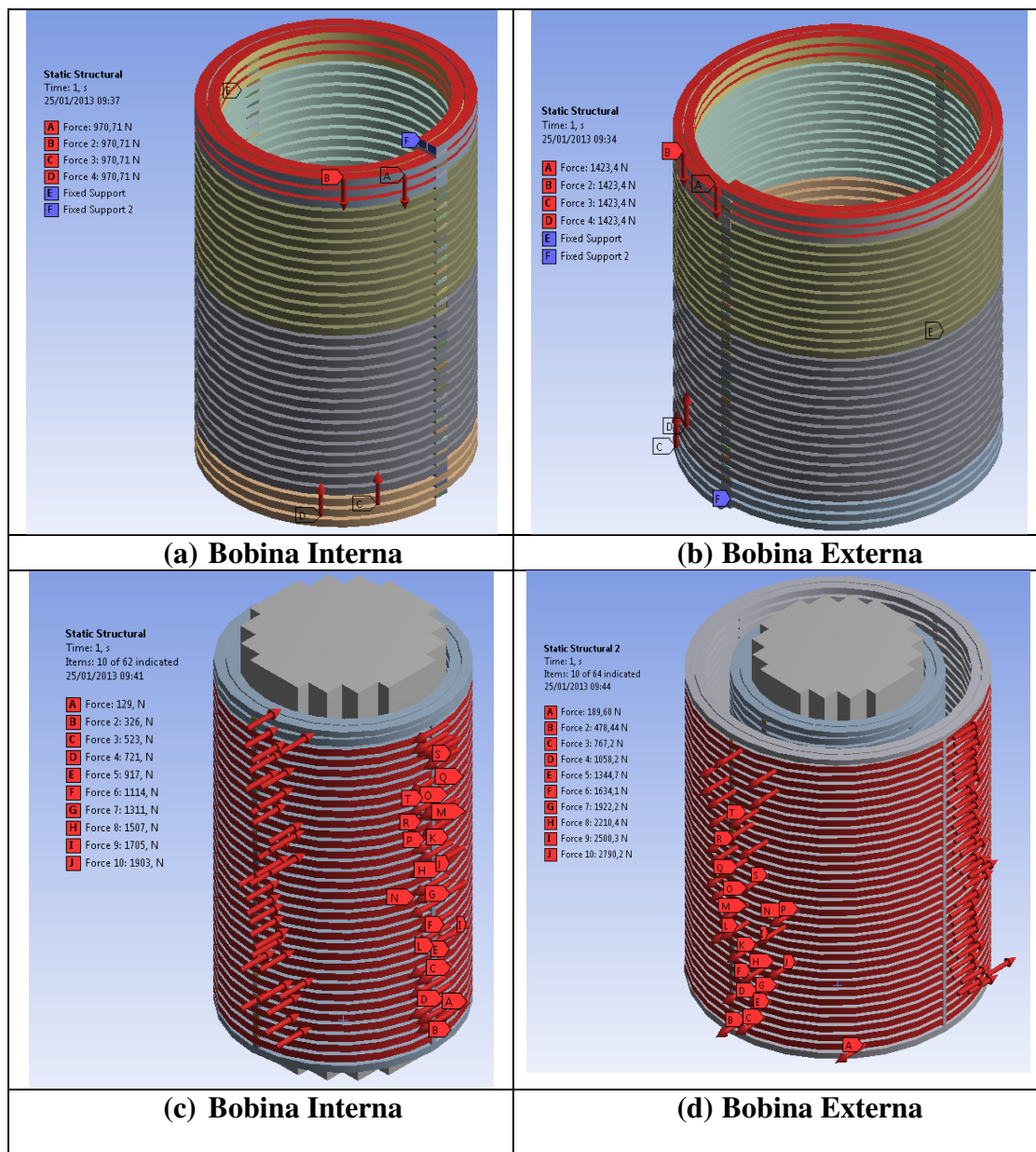


Figura 22 - (a) e (b) Aplicação das forças axiais e (c) e (d) aplicação das forças radiais, sendo todas para os enrolamentos internos e externos respectivamente.

2.10.5 – CONDIÇÕES DE CONTORNO

Nessa demonstração, vale ressaltar que, foram utilizadas fixações de suportes entre os espaçadores e o núcleo como condições de contorno. De modo que na hora da aplicação e distribuição das forças o modelo não ficasse livre no espaço “flutuando”. Além disso, também para as forças axiais e radiais seccionou-se o arame das bobinas interna e externa, com um corte da ordem de Imm afim de se obter uma distribuição uniforme da aplicações das forças nas enrolamentos.

2.10.6 – FASE DE SOLUÇÃO DO MODELO

A fase de solução consiste na preparação matricial de cada elemento, a formação da matriz de coeficientes global e na imposição das condições de contorno. Contudo, esta fase é realizada internamente pelo próprio *software*.

2.10.7 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Onde ocorre a disponibilização e demonstração dos resultados gráficos e numéricos para análise e estudos com interesses diversos, a partir das atribuições aferidas inicialmente. Essa fase, contudo, só será comentada a seguir no Capítulo 4 em “Análise e Discursão de Resultados das Simulações do Transformador de 15 kVA”.

Dessa forma, portanto, encerrasse-se a parte inerente à modelagem numérica do problema proposto nesse trabalho, juntamente com as etapas do processo de implementações das análises no MEF. Em seguida, é apresentado o Capítulo 3 “A Descrição do Problema Estudado”, onde descreve e justificar a importância da investigação desses fenômenos transitórios para os transformadores.

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA ESTUDADO: FALHAS EM TRANSFORMADORES

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O Sistema Interligado Nacional - SIN é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país encontram-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica.

Segundo Soares (2011) dentre inúmeros equipamentos que compõe o SIN, tais como geradores, transformadores, reatores, compensadores, disjuntores, seccionadores, destacam-se os transformadores de potência que são os elementos essenciais e de grande valor do sistema de geração, transmissão e distribuição de energia. Uma falha em um transformador de uma usina ou subestação pode resultar na interrupção do fornecimento de energia, com penalidade e elevados custos com a manutenção ou substituição do equipamento.

Ainda segundo Soares (2011) a quantidade de falhas recentes em transformadores e suas consequências à confiabilidade do Sistema Elétrico de Potência – *SEP* provocam grande preocupação para os agentes do setor de energia elétrica. Diversas falhas envolvendo os enrolamentos dos transformadores de potência estão associadas a transitórios eletromagnéticos não convencionais, como as falhas atribuídas às sobretensões transitórias de frente muito rápida.

Os custos relacionados com reparo/substituição das unidades avariadas, principalmente as de potência, são muito altos. Para ilustrar essa questão, foi realizado um levantamento entre os anos de 1997 a 2001 com objetivo de obter informações sobre a desativação de transformadores de potencia associando-se a causas e custos. Concessionárias de diversos países participaram dessa pesquisa enviando as informações requeridas. Do total de casos obtidos junto às empresas colaboradoras, 94 continham informações conclusivas que propiciaram a criação de um banco de dados e os registros de desativação foram convertidos em gastos anuais. A tabela 5 associa o custo total de cada causa de falhas ao número de ocorrência (AZEVEDO, 2007).

Tabela 5 – Custo de falhas

Causa das falhas	Número	Dólares pagos (\$)
Falhas na isolação	24	149.967.277,00
Projeto/material	22	64.696.051,00
Desconhecido	15	29.776.245,00
Contaminação do óleo	4	11.836.367,00
Sobrecarga	5	8.568.768,00
Fogo/explosão	3	8.045.771,00
Sobretensão	4	4.959.691,00
Manutenção incorreta	5	3.518.783,00
Inundação	2	2.240.198,00
Perda de conexão	3	2.186.725,00
Descarga atmosférica	3	657.935,00
Umidade	1	175.000,00
Total	94	286.628,811,00

FONTE: BARTLEY, 2003

A figura 23 é um gráfico de dispersão, ou por sua vez, referido como uma curva FN (curva frequência - número), onde é possível visualizar melhor os dados mostrados na Tabela 5. O número de falhas para cada uma das causas está sobre o eixo de “X”, e os dólares pagos por cada causa no eixo “Y”.

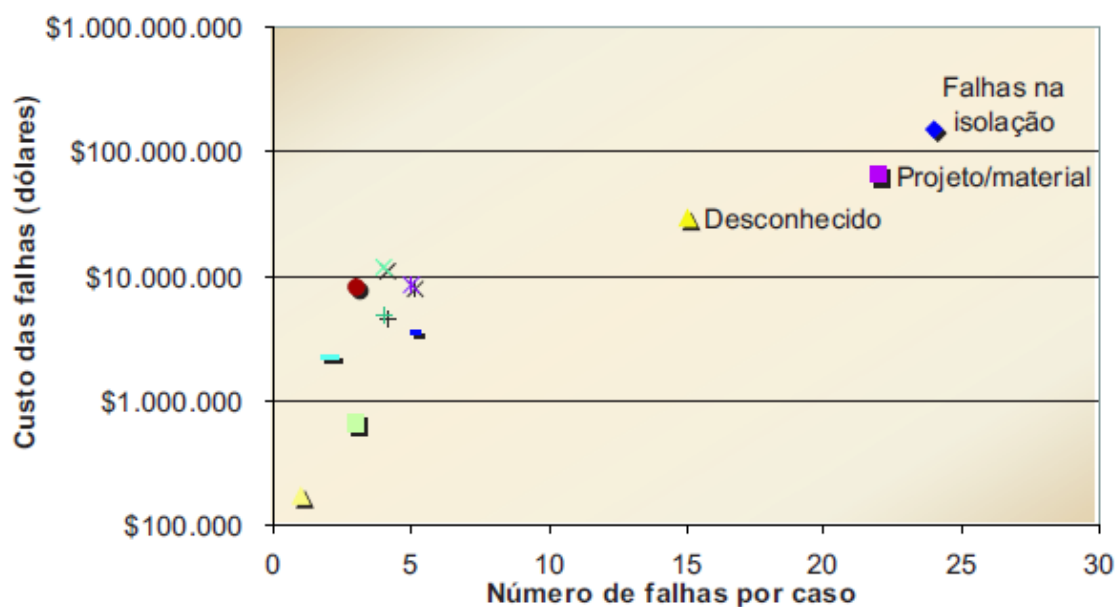


Figura 23 – Gráfico de custo em relação ao numero de falhas

FONTE: BARTLEY, 2003

Nota-se de acordo com o gráfico que os maiores riscos estão no canto direito superior. Segundo essa análise, a falha no isolamento é a maior para todos os tipos de falhas em transformadores. A referencia considera ainda que as causas na isolação podem ser de origem externa ou interna devido à isolação inadequada ou defeituosa. O custo total envolvendo todas as categorias de falhas, no período de realização da pesquisa, ultrapassou 280 milhões de dólares (AZEVEDO, 2007).

Na Figura 24, têm-se as características do comportamento de taxa de falhas em função do tempo de vida para transformadores de potência conhecido como curva de banheira. De acordo com este gráfico, a ocorrência de falha nesses dispositivos é maior durante seus primeiros anos de uso (região 1), decrescendo exponencialmente no decorrer dos anos até ficar constante, fase que é conhecida como vida útil (região 2) e aumenta novamente (região 3), de acordo com a obsolescência do mesmo, representado pela fase de fadiga. Com isso, fica evidente que o período mais crítico, em termos de probabilidade de falha de um transformador, ocorre no início de sua operação e depois de muito anos de funcionamento do equipamento.

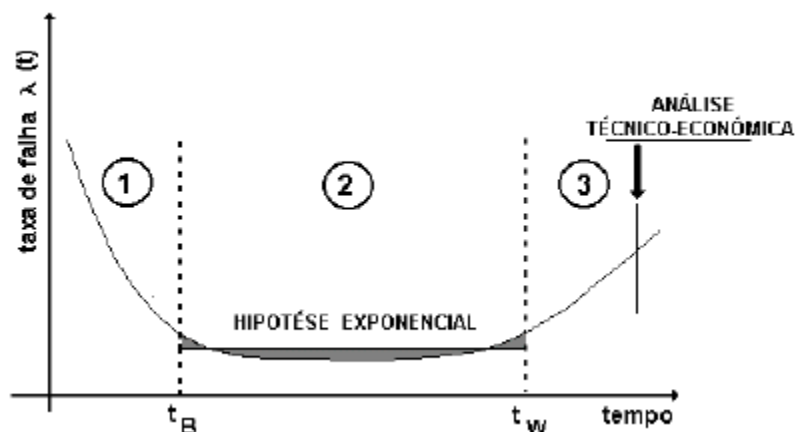


Figura 24 – Curva de banheira
 FONTE: PENA, 2003, p. 16

Nos estudo realizado por Raffo (2010) a inserção de novas unidades transformadoras de potência no sistema elétrico, bem como o desligamento e religamento deste na rede elétrica ocasiona um fenômeno transiente chamado de *inrush*. Este fenômeno é responsável por causar alguns transtornos para os operadores do sistema elétrico e também para as máquinas deste sistema.

Nesse sentido, focando-se os primeiros anos de operação como uns dos mais críticos de falha em transformadores conforme já mencionado, têm-se que dentre os diversos fatores de projetos que levam a falha do equipamento, podemos citar o

momento de energização do dispositivo e destacar as elevadas correntes de *inrush* a que está exposto. Mesmo com picos de cerca de 30% menores que os provocados pelas correntes de curto-circuito, as correntes de *inrush* podem produzir forças com amplitudes semelhantes às provocadas pelas correntes de curto-circuito. Isto se justifica levando em conta o tempo de exposição das correntes de energização que, em geral, é consideravelmente maior que o das correntes de curto-circuito. Além disso, outro fator a ser considerado é que as correntes de *inrush* podem ocorrer com mais frequência do que as correntes de curto-circuito, uma vez que a energização de transformadores faz parte da operação normal do serviço (STEURER, 2002).

Guerra (2012) destaca que os transformadores usados nos sistemas elétricos de potência requerem em regime permanente, correntes de excitação da ordem de 0,5% a 2% da corrente nominal. Entretanto durante o processo de energização, podem ocorrer surtos de correntes com valores de pico inicial que pode superar vinte vezes o valor de pico da corrente nominal, nas condições mais severas. Dentre os principais efeitos dessas correntes podemos citar:

- Atuação indevida de fusíveis e relés de proteção;
- Afundamento temporário de tensão, com deterioração da qualidade de energia;
- Solicitações de naturezas eletromecânicas e daí pode-se citar os esforços mecânicos nos enrolamentos dos transformadores e demais componentes do sistema, o que incorre em redução de vida útil.

Portanto, a investigação desses efeitos danosos causados pelos fenômenos mencionados, torna-se imperativo. A possibilidade de simular os esforços mecânicos adicionais provocados pelas altas correntes de *inrush* permitirá antever um potencial de risco para o equipamento. Com isso, de posse de informações com essas, antecedente a ocorrência do fato, poder-se-á tomar decisões técnicas e/ou gerenciais quanto a melhor oportunidade de se reparar e/ou substituir o equipamento.

Sendo assim, dado a importância do assunto, formulou-se um projeto de pesquisa, do qual esse trabalho faz parte, que tem como finalidade desenvolver modelos matemáticos que sejam capazes de reproduzir, com a maior fidelidade possível, o comportamento de um transformador trifásico de 15 kVA, quando submetido à condições severas de operação às altas correntes de *inrush*.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE E DISCUSSÕES DE RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO TRANSFORMADOR DE 15 kVA

4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados a partir das análises dos esforços mecânicos nos enrolamentos do transformador de 15 kVA, ao mesmo tempo em que se faz uma interpretação e discussão destes resultados. Assim sendo, em virtude dos conceitos concernentes à análise estrutural do problema, apresenta-se a resposta do modelo do conjunto, em termos de seus parâmetros principais, tensões e deformações.

Para este trabalho foram realizadas simulações com características semelhantes às reais de operação para o transformador. Salienta-se que os resultados obtidos por este método, na realidade, são utilizados apenas como balizamento no processo de validação da análise estrutural aqui proposta nesse trabalho. Não se prende a inclusão de inovações na estrutura de modelagem utilizando o MEF, mas sim na implementação e simulação dos esforços gerados e fazer uso de suas facilidades e, sobretudo, da eficácia oferecida por essa técnica numérica de maneira a servir como parâmetro para fins de comparação, conferindo assim uma maior confiabilidade aos resultados almejados.

A seguir serão mostrados os resultados obtidos para as referidas condições operacionais, para correntes de energização de *inrush*, no intuito de avaliar o comportamento do dispositivo a possíveis severidades existentes em seus enrolamentos. Os resultados mostrados a seguir foram validados a partir de dados e medições experimentais, extraídos de outros trabalhos como a do estudo realizado por Azevedo (2007) e Guimarães *et al* (2008) que embasaram essa pesquisa conforme citados na referência do mesmo, validando assim o modelo aqui proposto.

4.2 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Devido às elevadas correntes de partida ou de curto-circuito que interagem com campo magnético do transformador, esforços eletromecânicos são gerados e expõem os enrolamentos do dispositivo a condições severas de operação. Esses esforços são responsáveis pelas deformações que ocorrem em seus enrolamentos. Sendo assim, umas das principais causas de falhas nesses equipamentos.

Durante as simulações feitas, foi considerada a corrente do primeiro pico de *inrush* para análise das grandezas mecânicas tais como as forças axiais e radiais. Na Figura 25, têm-se o comportamento dos enrolamentos interno e externo do transformador quando os mesmos são submetidos a carregamentos radiais de magnitude igual a 3227 N e 4728 N respectivamente. Nota-se, que de acordo com os resultados da simulação para o enrolamento interno o esforço experimentado é de compressão e que tende a deformar a estrutura da bobina contra o núcleo ferromagnético do transformador. Ainda para o enrolamento interno é possível notar, que os valores máximos dos esforços gerados para esse tipo de carregamento é abaixo da tensão crítica calculada, como visto no subitem 2.9.5 ($\sigma_{(crit)i} = 144,70 \times 10^6 \text{ N/m}^2$), mostrando que não há falha, mas que por outro lado trás danos irreversíveis para os enrolamentos no decorrer das fases em que estiver em operação. Quanto ao enrolamento externo, este fica sujeito a uma força radial que age para fora e tende a tracionar o enrolamento que, da mesma forma, gera significativas deformações na bobina externa. Como já era previsto, também os valores desses esforços é mais intenso no meio de cada enrolamento e vai diminuindo ao longo das extremidades dos mesmo.

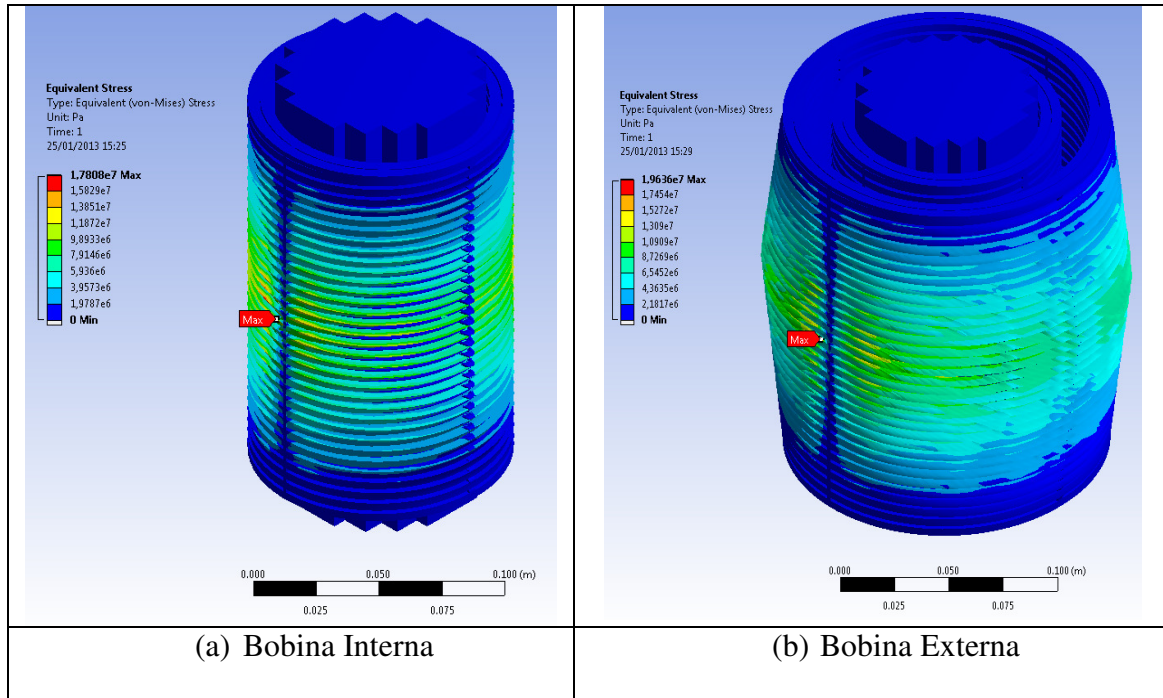


Figura 25 - (a) e (b) Resultados das forças radiais nos enrolamentos (esforço de compressão)

Além disso, é importante frisar, de acordo com a Tabela 6, que comparando os valores dos esforços obtidos analiticamente com os da simulação para esse tipo de carregamento nota-se que a diferença entre eles é tolerável, validando o modelo.

Tabela 6 – Valores dos esforços das forças radiais para condição de *inrush*

Variável	Método analítico	Simulação	Erro [%]
Estresse Radial Enrolamento Interno	$15,51 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	$17,81 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	14,83
Estresse Radial Enrolamento Externo	$22,74 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	$19,64 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	13,63

O resultado no MEF dos ensaios feito pela simulação para as deformações radiais estão mostrada na Figura 26. É possível perceber, de acordo com os resultados da simulação que o enrolamento interno fica mais exposto à falha do que o enrolamento externo. Como se pode observar ainda, a ocorrência dessa deformação radial para o enrolamento interno é mais severa do que para o enrolamento externo, isso se explica pelo fato da suportabilidade mecânica do enrolamento externo depender da resistência à força de tração bem definida do condutor. Enquanto, por outro lado, para a bobina interna o mesmo não acontece, visto que as técnicas para determinação da resistência mecânica dos condutores internos à compressão são mais complexo, como já discutido anteriormente. Efeitos como estes, causados pelos esforços decorrentes de transitório, são responsáveis pela deterioração na isolamento, fadiga mecânica nos condutores, além é claro de danos as estrutura de sustentação dos enrolamentos.

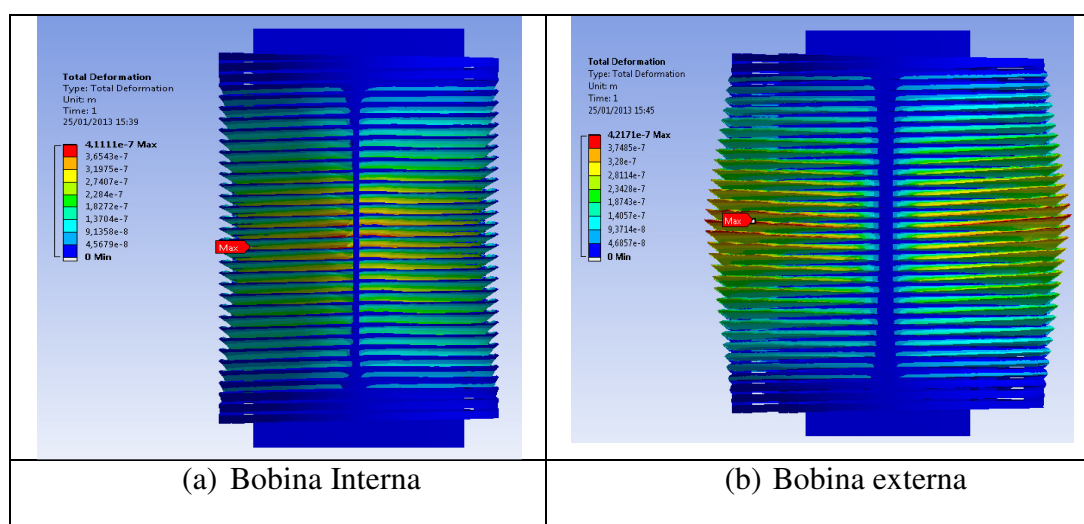


Figura 26 - (a) e (b) Deformação nos enrolamentos devida forças radiais

Por outro lado, a Figura 27 mostra o resultado da simulação da ação das forças axiais nos enrolamento interno e externo do transformador, juntamente com a influência de cada arranjo de espaçadores isolantes localizados radialmente ao condutor. Nestas condições, foram analisados pontos estratégicos, nos quais os esforços estão diretamente relacionados com a inclinação dos enrolamentos. Como se pode observar na figura, verificou-se que a ação dessas forças é no sentido de comprimir os enrolamentos, sendo assim, responsável pelo esforço de compressão axial nas bobinas. Além disso, sob ação desse tipo de carregamento, como já era previsto, é possível notar que os condutores dos enrolamentos curvam-se entre os espaçadores (ver Figura 29). Isso faz com que haja o estiramento e/ou esmagamento do material isolante que reveste os condutores, devido ao movimento relativo entre os enrolamentos e os espaçadores isolantes localizados radialmente, além da diminuição da rigidez do disco de compressão ou quebra do mesmo, reduzindo assim, a vida útil do transformador.

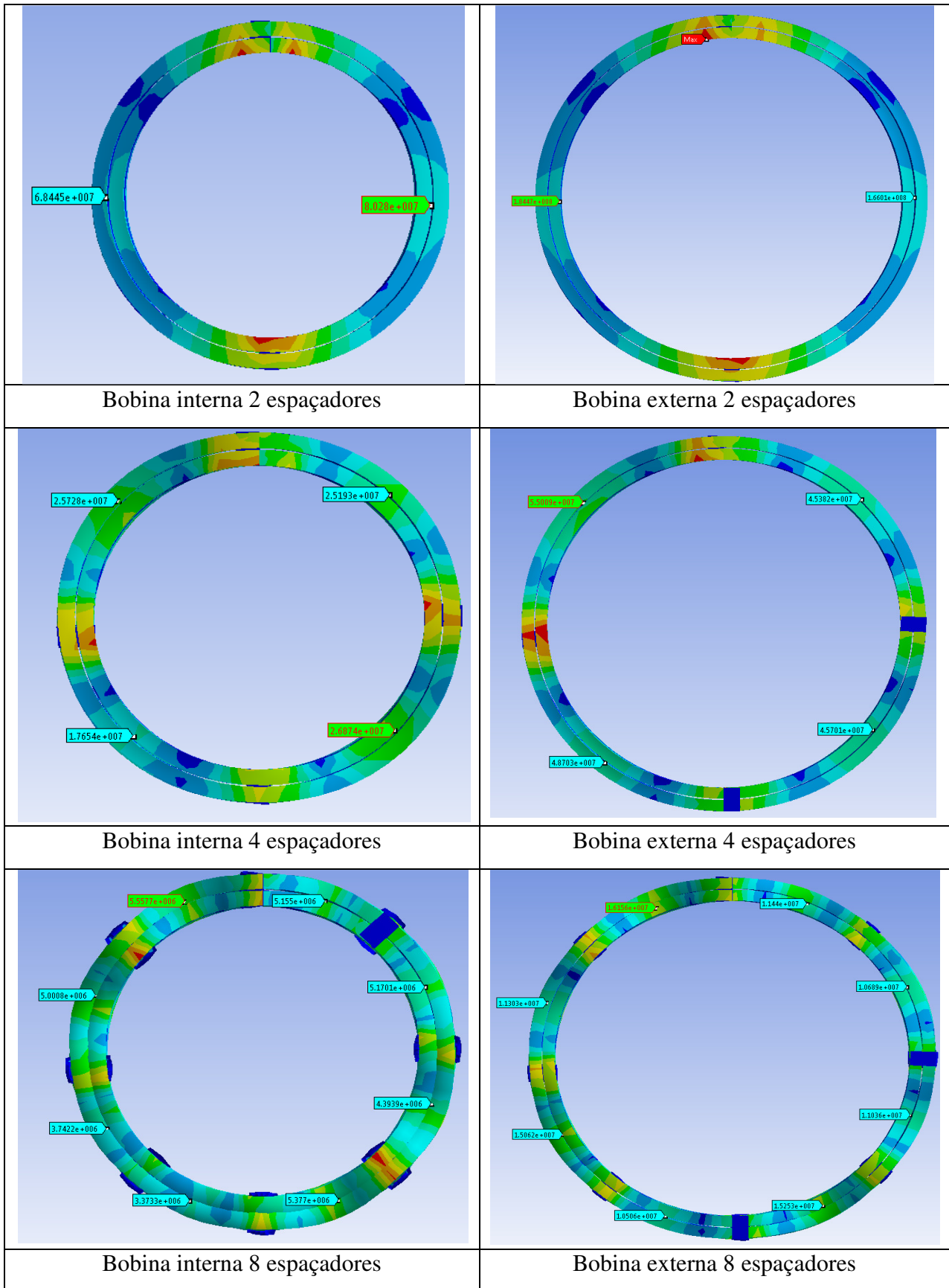


Figura 27 – Resultado no MEF dos esforços de compressão das forças axiais nos enrolamentos.

Observa-se também, como já constatado anteriormente, que esse tipo de força é mais intenso nas extremidades e dirigido para o ponto médio do enrolamento energizado. É importante destacar, que o valor da força usado para simular o esforço gerado é levado em conta considerando a situação ideal para o cálculo da força axial. Portanto, para a tensão de compressão utilizou-se as forças de intensidade $970,71\text{ N}$ e $1423,37\text{ N}$ para bobina interna e externa respectivamente.

Outro fator importante a ser considerado com relação aos espaçadores é que a máxima tensão que ocorre nos condutores é devido à inclinação dos mesmos em relação aos cantos desses espaçadores. Para o caso da bobina externa com 2 espaçadores, o valor máximo do esforço nessa região é superior ao limite suportável pelo tipo de condutor usado que nesse caso é cobre ($117,72 \times 10^6\text{ N/m}^2$), o que leva a falha do mesmo. A Figura 28, extraída da simulação da bobina externa com 2 espaçadores ilustra bem o caso.

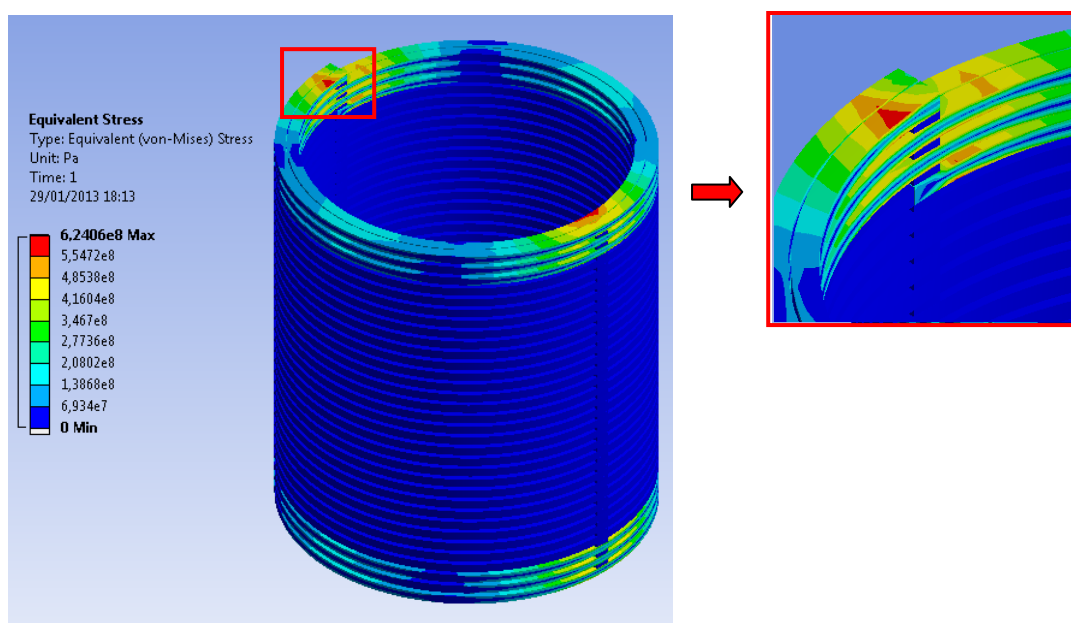


Figura 28 – Máximo esforço nos condutores devido à inclinação dos mesmos em relação aos cantos dos espaçadores.

Da mesma forma, que para análise das forças radiais, os resultados obtidos na simulação dos esforços de compressão gerados pelas forças axiais foram próximos das obtidas analiticamente, com exceção da bobina externa com 2 espaçadores onde de posse dos resultados da simulação, de acordo com a tabela 7, seu resultado divergiu aproximadamente cerca de 38,51% do valor calculado analiticamente. Essa divergência pode ser explicada, uma vez que a configuração do computador usado para essa

simulação não forneceu suporte necessário para um refinamento mais adequado da malha gerada no modelo. Além disso, outro fato preponderante, a ser considerado no momento das simulações para os enrolamentos submetidos a esses dois tipos de carregamento (tais como a força radial e axial), é de que foi feita uma análise considerando unicamente esforços simples, ou seja, onde os carregamentos agiam separadamente para cada tipo de análise. No entanto, o que se verifica na prática é que os condutores estão sujeitos aos dois tipos de esforços simultâneos de tração e compressão devido à ação combinada dessas forças nos enrolamentos, fato este, que não foi levado em consideração na hora da definição e aplicação das forças no software ANSYS o que justificaria também os erros da simulação.

Cabe destacar também a importância que os espaçadores exercem sobre a estrutura de fixação dos enrolamentos, afinal esse foi o objetivo do trabalho quando propôs-se simular bobinas com 2, 4 e 8 espaçadores. Desse modo, é possível notar que esses espaçadores exercem uma pressão efetiva sobre a estrutura de sustentação dos enrolamentos durante a passagem da força de modo a garantir a resistência mecânica ao condutor. Além disso, observa-se que, quando maior se faz o número de espaçadores menor é a tensão que atua nos condutores. Isso se explica pelo fato do número de espaçadores disponíveis distribuírem melhor o carregamento quando da passagem da força. Os detalhes dessa análise esta mostrada na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores dos esforços das forças axiais nos pontos de inclinação para condição de *inrush*

Variável	Método analítico	Simulação	Erro [%]
Estresse axial Enrolamento Interno 2 espaçadores	$95,83 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	$80,28 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	16,23
Estresse axial Enrolamento Interno 4 espaçadores	$23,96 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	$26,87 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	12,15
Estresse axial Enrolamento Interno 8 espaçadores	$5,99 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	$5,56 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	7,18
Estresse axial Enrolamento externo 2 espaçadores	$302,13 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	$184,47 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	38,51
Estresse axial Enrolamento externo 4 espaçadores	$70,53 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	$55,01 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	21
Estresse axial Enrolamento externo 8 espaçadores	$18,88 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	$16,16 \times 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$	14,52

É importante ressaltar, que para o modelo do transformador utilizado neste trabalho o fabricante especifica usualmente 8 espaçadores radiais entre os enrolamentos, porém o objetivo básico de se demonstrar uma análise com um número inferior ao especificado pelo fabricante foi explicitar o quanto os enrolamentos ficariam expostos

aos esforços eletromecânicos durante sua energização com um número inferior de espaçadores radiais, como demonstrado e comentado anteriormente nos resultados das simulações a exemplo da bobina externa com 2 espaçadores (ver Figura 28).

A seguir tem-se na Figura 29 o resultado da deformação total para os enrolamentos interno e externo do transformador para passagem da força axial. Assim como ocorre para os esforços axiais, a maior deformação que se verifica nos enrolamentos é justamente em suas extremidades, exatamente por ser a parte mais afetada e por apresentar maior densidade de fluxo de dispersão radial. Ao contrário do que se verifica com os esforços devido às forças radiais, neste caso, a curvatura da deformação se dá num plano vertical e não na horizontal como ocorre para aquela situação. E devido justamente às altas forças de compressão axial atingirem e/ou afetarem principalmente, as extremidades dos enrolamentos, que as deformações geradas danificam as estruturas de fixação do mesmo.

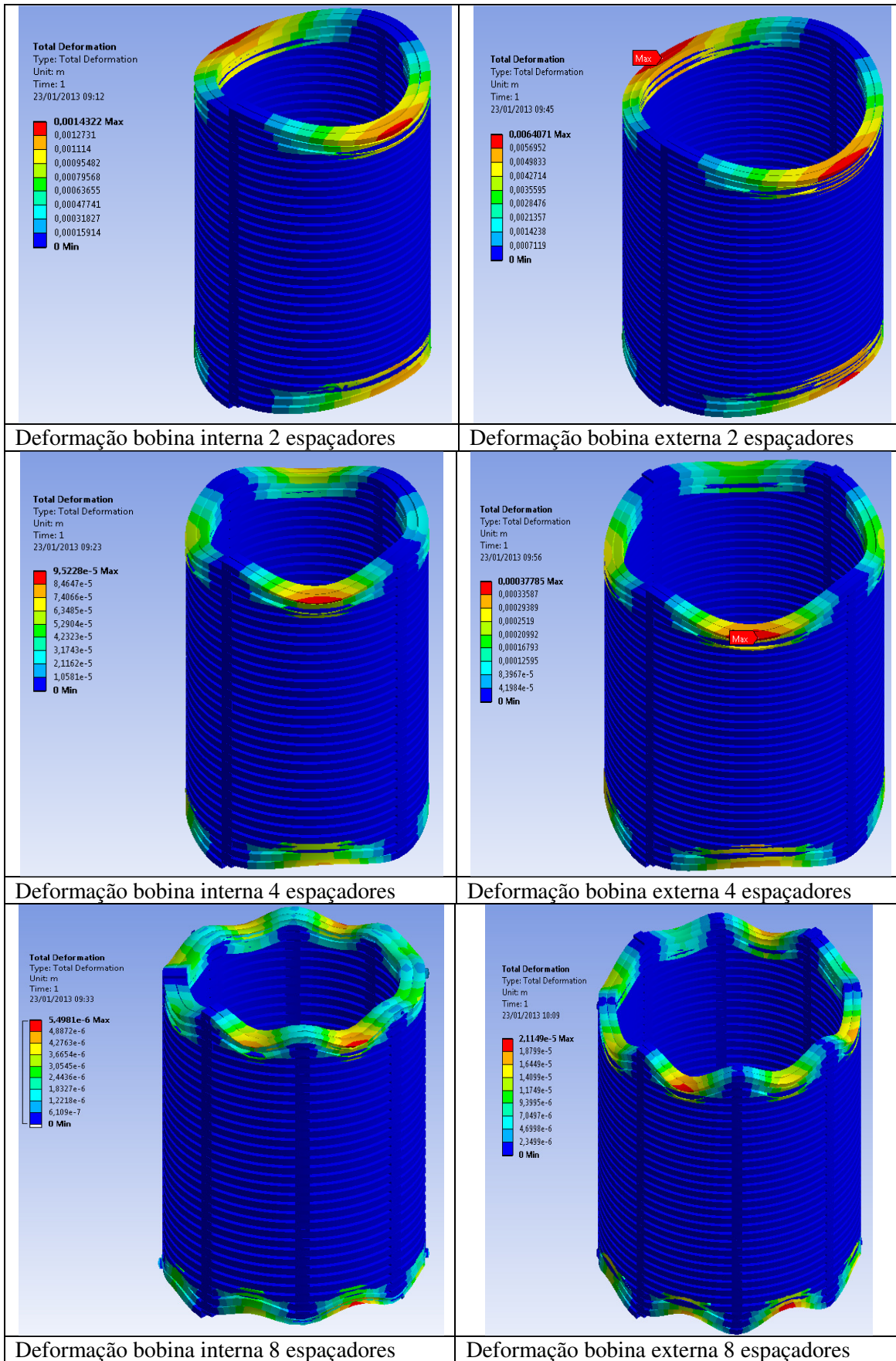


Figura 29 – Resultado da deformação total para as forças axiais

4.3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo foi dedicado a apresentação dos resultados dos esforços mecânicos que agem nos enrolamentos do transformador utilizando a ferramenta computacional ANSYS Workbench. Para tanto, o capítulo foi iniciado destacando-se os procedimentos para análise e discussão dos resultados obtidos na simulação.

Os resultados encontrados para o estudo da corrente de *inrush* foram obtidos seguindo uma metodologia para estimar os primeiros picos da corrente de energização. Desenvolveu-se assim, uma metodologia analítica para a estimativa dos esforços eletromecânicos axiais e radiais e fez-se uso de uma modelagem matemática baseada na técnica do método de elementos finitos, do modelo do transformador adotado, realizando as simulações computacionais com o objetivo de conhecer os esforços radiais e axiais nos enrolamentos do transformador, causados pelas altas correntes de energização.

Os resultados da simulação foram disponibilizados em forma de gráfico e tabelas, constatando-se o quanto danosas é a ação dessas forças devido às altas correntes de *inrush* e suas consequências para as estruturas do transformador. Além de mostrar a importância que os espaçadores exercem nas estruturas de fixação dos condutores para suportarem os esforços decorrentes da passagem das forças. Contudo, é importante frisar que essa análise foi uma análise puramente estrutural do problema estudado, onde foram analisadas apenas as condições mecânicas dos enrolamentos tais como: a resistência mecânica, deformações e estruturas de suporte que constituem fatores preponderantes na vida útil dos dispositivos. Por outro lado, não se levou em consideração as grandezas eletromagnéticas em questão no problema o que já fugiria do escopo do objetivo desse trabalho.

Portanto, os objetivos delineados para esse capítulo foram atingidos graças ao estabelecimento, de uma base teórica definida sobre as forças eletromagnéticas e esforços mecânicos. Com isso, após a verificação, constatou-se que os resultados obtidos durante a simulação para os esforços mecânicos foram satisfatório com relação a análise das grandezas de forças. Tendo como parâmetro para validação dos cálculos dos esforços gerados, a utilização das grandezas analítica e simuladas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 – CONCLUSÃO

No presente trabalho foi demonstrada a modelagem computacional utilizando o método de elementos finitos para um transformador trifásico convencional de Ferro Silício (*FeSi*), com objetivo de analisar esforços mecânico nos enrolamentos do mesmo quando submetido a correntes de *inrush*. Para esta análise, foram feitos cálculos analíticos a partir da aplicação dos esforços na bobina, para uma resolução simples e rápida, simplificou-se a geometria, obtendo os resultados esperados com maior rapidez.

Os esforços ocasionados pela corrente de energização, assim como descritos nos subitens 2.9.5 e 2.9.6, levam a deformações nas bobinas do transformador. As deformações exemplificadas neste trabalho são geralmente oriundas de pequenas deformações que ocorrem ao logo dos anos de operação do dispositivo. . A ocorrência desse tipo de defeito muitas vezes não é imediatamente perceptível, por isso geralmente estas faltas não retiram o transformador de operação. Entretanto, o transformador com alterações mecânicas em seus enrolamentos tem menor robustez, o que pode precipitar o final de sua vida útil.

Além do mais, pode-se também observar, que para as forças radiais descritas de acordo como subitem 2.9.3, dependendo do tipo de enrolamento solicitado, os mesmos podem experimentar esforço de tração ou compressão. Por outro lado, a força axial, como já discutido (subitem 2.9.4) anteriormente age no sentido de “esmagar” ou comprimir os enrolamentos gerando o esforço axial nas bobinas do transformador. Após a verificação e a partir das análises, pode-se concluir que as grandezas mecânicas nos enrolamentos representam uma das mais frequentes causas de falhas em transformadores, que ocasionadas pelas correntes de energização trazem impactos severos sob a estrutura do transformador, com deformações responsáveis pela danificação que podem levar até mesmo ao desuso do equipamento se traduzindo em enormes prejuízos para o setor elétrico.

Portanto a presente pesquisa procurou contribuir no estudo da investigação desses fenômenos, de modo a mostrar os impactos gerados pelo mesmo. Diante disso, este trabalho foi direcionado para o desenvolvimento de um modelo computacional, utilizando-se técnicas de simulações numéricas, o que permitiu a análise dos esforços

mecânicos provocados nos enrolamento do transformador pelas elevadas correntes de *inrush*.

5.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As proposições a seguir tem como finalidade o desenvolvimento de um modelo numérico mais completo, bem como visa um aproveitamento maior dos resultados obtidos neste trabalho, não somente no planejamento de ações e/ou intervenções, mas como ferramentas de apoio para simulações e análises de outros cunhos, que não o comportamento estrutural, mas que sejam diretamente influenciados por este, como o comportamento eletromecânico de um referido componente do transformador em função dos campos eletromagnéticos e da densidade de corrente, por exemplo. Portanto seguem as proposições:

- ✓ Desenvolver um modelo matemático, embasado no que foi apresentado neste trabalho capaz de representar o comportamento dinâmico de um transformador;
- ✓ Utilizar o modelo desenvolvido para simulações dos esforços mecânico nas partes ativa do dispositivo quando submetidos a correntes de curto circuito;
- ✓ Desenvolver um modelo numérico capaz de reproduzir o comportamento térmico do transformador quando submetido a correntes transitórias.
- ✓ Tirar proveito do foi desenvolvido neste trabalho e desenvolver uma análise experimental do dispositivo com base nos resultados apresentados.

REFERÊNCIAS

- ABDULSALAM, S. G.; XU, W. and DINAHAHI, V. “Modelling and simulation of three-phase transformers for inrush current studies,” Proc. Inst. Elect. Eng., Gen. Transm. Distrib., vol. 152, no. 3, pp. 328–333, May 2005.
- ADDLY, A. A. “Computation of Inrush Current Forces on Transformer Windings”. IEEE Transactions on Magnetics, v. 37, n. 4, p. 2855 – 2857, July 2001
- AGUIAR, Ezequiel Rabelo. “Análise de Resposta em Frequência Aplicada em Transformadores de Potência”. Dissertação (Mestrado). Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Março de 2007.
- AHN, Hyun-Mo.; OH, Yeon-Ho.; KIM, Joong Kyong.; SONG, Jae Sung Son and HAHN, Sung Chin. “Experimental Verification and Finite Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force for Dry-Type Transformer”. IEEE Transactions on Magnetics, Vol.28, NO. 2, February 2012.
- ALVES, Michell Marcedo e PROENÇA, Persival Baroncini. “Emprego do Método de Resíduos Ponderados para Análise de Tubos”. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 10, n. 44, p. 19-48, 2008.
- AMOIRALIS, I. Eleftherios.; TSILI, A. Mariana.; KLADAS, G. Antonios. “Transformers Design and Optimization: A Literature Survey”. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 4, October 2009.
- ASSAN, A. E. “Método dos elementos finitos: primeiros passos”. 2.ed. Campinas: Editora da Unicamp. 2003
- AZEVEDO, Álvaro F. M. “Método de Elementos Finitos” – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Portugal, 1ª Edição Abril 2003.
- AZEVEDO, Ana Claudia. “Estresses Eletromecânicos em Transformadores Causados por Curto-circuito “Passantes” e Correntes de Energização”. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica. 2007
- BARTLEY, W. H. “Analysis of transformer failures”. 36th Annual Conference of IMIA – The International Association of Engineering Insurers, v. 1, n. 1, p. 1 – 12, September 2003.
- BASTOS, João Pedro Assupção. “Eletromagnetismo e cálculo de campos”. 3. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1996. 452 p, il.

BECHARA, Ricardo. “Análise de Falhas de Transformadores de Potência”. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Faculdade de Engenharia Elétrica, São Paulo 2010.

BIANCHI, Nicola, 2005, “Electrical Machine Analysis Using Finite Elements” Basic Principles of Finite Element Methods, Taylor & Francis Group, Nova York, EUA, pp. 25-28.

BROCHURE CIGRE WG 12.19. “The Short Circuit Performance of Power Transformers”. [S.I.], 2002.

BRONZEADO, H. and YACAMINI, R. “Phenomenon of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients,” Proc. Inst. Elect. Eng., Sci. Meas. Technol., vol. 142, no. 4, pp. 323–329, Jul. 1995.

BRUNKE, J. H. and FRÖHLICH, K. J. “Elimination of transformer inrush currents by controlled switching—Part I: Theoretical considerations,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 16, no. 2, pp. 276–280, Apr. 2001.

COOK, R. D.; Malkus, D. S.; Plesha, M. E.; Witt, R. J. – “Concepts and Applications of Finite Element Analysis”. Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2002.

CHEN, S. D.; LIN, R. L. and CHENG, C.-K. “Magnetizing inrush model of transformers based on structure parameters,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 3, pp. 1947–1954, Jul. 2005.

FAIZ, J.; EBRAHIMI, B. M. and NOORI, T. “Three- and two-dimensional finite-element computation of inrush current and short-circuit electromagnetic forces on windings of a three-phase core-type power transformer,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 5, pp. 590–597, May 2008.

FONSECA, W. Silva. “Modelagem de Transformador de Núcleo Amorfo Usando Método de Elementos Finitos”. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Maio 2010.

GUERRA, Francisco das Chagas F.; ARAÚJO, Leandro de Luna e MEDEIROS, Luydi Dandgelo C. Correntes Transitórias de magnetização em Transformadores de Potencia. Disponível em:

http://www.labplan.ufsc.br/congressos/CBQEE_VIII_2009/web/docs/026.pdf.

Acessado em 27 de Novembro de 2012

GUIMARÃES, R.; DELAIBA, A. C.; ROSNETINO, A. J. J. Pereira.; LYNCE, M.; BRONZEADO, H.S. e SIVAL, C. A. “Investigação sobre Estresses Eletromecânicos em Transformadores Causados pela Corrente de Energização (Inrush)”. Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

- HARLOW, J. H. “Electric Power Transformer Engineering” (2nd Ed.), Boca Raton, CRC Press, 2006. 536 p.
- HEATHCOTE, J. M. J. and P Transformer Book. Ed. 12. [S.I.]: Elsevier Science Ltd, Oxford, 1998.
- HIBBELER, R.C. “Resistência dos Materiais”, 5.º Ed., Editora Livros Técnicos e Científicos, 2006.
- KULKARNI, S. V. and KHAPARDE, S. A.” *Transformer Engineering*”. New York: Marcel Dekker, 2004.
- LIMA, Adry Kleber Ferreira. “Análise do Escoamento em uma Unidade Hidrogeradora da Usina Hidrelétrica de Tucuruí”. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Mecânica, Belém 2011.
- LOTTI, Raquel S., MACHADO, Wilson M., MAZZIEIRO, Ênio T., JÚNIOR, Janes L., “Aplicabilidade Científica do Método dos Elementos Finitos”. Artigo - PUC – Minas, 2006
- MAÑANA, M., et al, Effects of Magnetizing Inrush Current on Power quality and Distribution Generation. [S.I.].
- MEEKER, D., “Finite Element Method Magnetic” - Version 4.2 - User’s Manual, September 2006.
- MOURA, Dêdison Santos. Maquilas e Instalações elétrica I EMI 102. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/63803748/13/Principio-de-Funcionamento-do-Transformador>. Acessado em 27 de Novembro de 2012.
- NAGPAL, M.; MARTINICH, T. G.; MOSHREF, A.; MORISON, K. and KUNDUR, P. “Assessing and limiting impact of transformer inrush current on power quality,” IEEE Trans. Power Del., vol. 21, no. 2, pp. 890–896, Apr.2006.
- PENA, M. C. “Falhas em Transformadores de Potência: Uma Contribuição para Análise, Definição, Causa e Solução”. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, 2003.
- RAFFO, Gustavo Vianna. “Análise da Corrente de Inrush em Transformadores de Potência”. Projeto de Diplomação para Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Elétrica, Porto Alegre 2010.

ROSENTINO, Junior A. J. P., “Estresse eletromecânicos em transformadores causados por curtos-circuitos” Edição 69, outubro de 2011.

RICO, J. J.; ACHA, E. and MADRIGAL, M. “The study of inrush current phenomenon using operational matrices,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol.16, no. 2, pp. 231–237, Apr. 2001.

SÁINZ, L.; CÓRCOLES, F.; PEDRA, J. and GUASCH, L. “Theoretical calculation of inrush currents in three- and five-legged core transformers,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 2, pp. 986–995, Apr. 2007.

SARAIVA, Elise. “Modelagem de um transformador de 15KVA no FEMM, e metodologia para cálculos dos entreferros”, *Anais do 8º INDUSCON, Poço de Caudas, Brasil*, 06 p. 2008.

SILVA, C. Ribeiro. “Cobre”, Trabalho de Graduação em Arquitetura e Urbanismo. 2005

SILVA, Emilio Carlos Nelli e BUIOCHI, Flavio. “Capitulo IV - Introdução ao Métodos de Elementos Finitos (MEF)”. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2420/a9-2420.pdf>. Acessado em 27 de Novembro de 2012.

SOARES, José Carlos, “Avaliação da Superfície dos Ensaios Dielétricos Especificados para Aquisição de Transformadores Elevadores Submetida às Sobre Tensões de Frente Muito Rápida”. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Instituto de Engenharia do Paraná, 2011.

SOUZA, Remo Magalhães. “O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor”. Universidade Federal do Pará, Departamento de Engenharia Civil, Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia, Belém 05/2003.

SCHULZ, C. A.; ROGER, D.; DUCHESNE, S. and VINCENT, J.N. “Experimental characterization of interlamination shorts in transformer cores,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 2, pp. 614–617, Feb. 2010.

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

TIMOSHENKO, S. P.; Goodier, J. N. - *Theory of Elasticity*, Third Edition, McGraw-Hill, 1988.

VANTI, M. G.; BERTOLI, S. L.; CABRAL, S. H. L.; GERENT, A. G. and KUO, P. P. “Semianalytic solution for a simple model of inrush currents in transformers,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 6, pp. 1270–1273, Jun.2008.

VINHAIS, Humberto Ferreira. “Projeto Otimizado de um Micro-Motor Eletrostático”. Monografia de Trabalho de Formatura, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Faculdade de Engenharia Mecatrônica, São Paulo 2004.

WATERS, M. The Measurement and Calculation of Axial Electromagnetic Forces in Concentric Transformer Windings. The paper was first received 21 th May, and in revised form 5th September, 1953.

WANG, M.; VANDEMAAR, A.; SRIVASTAVA, K. “Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service”. Electrical Insulation Magazine, IEEE, v. 18, p. 12-25, December 2002.

WINDERS, J. J., Jr. Power Transformers - Principles and Applications. Marcel Dekker, Inc., 2002.

WISZNIEWSKI, A.; REBIZANT, W.; BEJMERT, D.; and SCHIEL, L.
“Ultrasaturation phenomenon in power transformers—Myths and reality,” IEEE Trans. Power Del., vol. 23, no. 3, pp. 1327–1334, Jul. 2008.