



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANTONIO RONIEL MARQUES DE SOUSA

**ANÁLISES MULTIFÍSICA VIA MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA O
AUXÍLIO À MANUTENÇÃO PREDITIVA EM TRANSFORMADORES DE
POTÊNCIA.**

DM - 33/2018

Belém/PA
2018

ANTONIO RONIEL MARQUES DE SOUSA

**ANÁLISES MULTIFÍSICA VIA MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA O
AUXÍLIO À MANUTENÇÃO PREDITIVA EM TRANSFORMADORES DE
POTÊNCIA.**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes

Belém/PA
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M357a Marques de Sousa, Antonio Roniel
ANÁLISES MULTIFÍSICA VIA MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA O AUXÍLIO À
MANUTENÇÃO PREDITIVA EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA / Antonio Roniel Marques de
Sousa. — 2018
130 f. : il. color
- Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Instituto de
Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
1. Método de Elementos Finitos (MEF). 2. Transformador de Potência. 3. Análise Multifísica. 4.
Manutenção Preditiva. I. Alves Nunes, Marcus Vinicius, *orient.* II. Título

CDD 621.3

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**"ANÁLISES MULTIFÍSICAS VIA MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA O AUXÍLIO À
MANUTENÇÃO PREDITIVA EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA"**

AUTOR: ANTONIO RONIEL MARQUES DE SOUSA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 21/09/2018

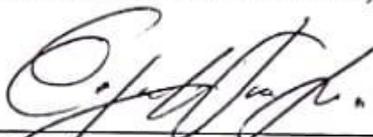
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Marcus Vinícius Alves Nunes
(Orientador – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

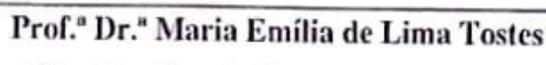


Prof. Dr. Eduardo Tannus Tuma
(Avaliador Externo ao Programa – FEEB/UFPA)



Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca
(Avaliador Externo ao Programa – ITEC/UFPA)

VISTO:



Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes
(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

Dedico à memória de minha mãe Raimunda Auzenir, a meu pai Antonio Marques, a meu irmão Israel Marques juntamente a sua família. Aos meus pais de criação Maria Luciana e Paulo Marques, à minha irmã Elziane Medeiros juntamente à sua família. E a todos que contribuíram com minha formação, diretamente ou indiretamente.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me tornar um pouco mais forte a cada desafio enfrentado.

À minha Mãe Raimunda Auzenir, pelo dom da vida e por me acompanhar enquanto Deus permitiu. A meu pai Antonio Marques, pelos incentivos, conselhos e eterna amizade. A meu querido irmão Israel Marques, pelo incentivo, exemplo de pessoa e amparo de irmão mais velho.

Aos meus pais de criação Maria Luciana e Paulo Marques, por todo cuidado que sempre tiveram. À minha amada irmã Elziane Medeiros, pelo apoio e pela confiança no meu potencial, juntamente a seu marido Antonio Ronns.

Aos meus padrinhos João Pereira e Ivonete Luciana, pela oportunidade de demonstrar meu potencial e pelo apoio na minha formação acadêmica.

Ao meu orientador, professor e amigo Marcus Vinicius, pela amizade, orientações, conselhos, discussões produtivas, pela oportunidade de mostrar meu potencial e por aceitar este desafio de me orientar.

Ao meu professor e grande amigo Wellington Fonseca, que acreditou no meu potencial e se empenhou ao máximo em me auxiliar na construção deste e de muitos outros trabalhos, além da dedicação, apoio, conselhos, discussões produtivas e também pelo exemplo de caráter.

Ao meu admirável primo Diorge Lima, pelo apoio em todos os momentos e pela amizade incondicional. Ao meu primo Marcelo Silva, pela amizade e por me acolher em sua residência. À minha prima Adriana Oliveira, por sua amizade sincera e apoio nos momentos de dificuldade.

Aos professores Ubiratan Bezerra e Eduardo Tuma, pela dedicação, apoio e valorosas contribuições que levaram à melhoria e finalização desta dissertação.

Ao meu amigo Jefferson Lima e sua namorada Ingrid Zahlouth, pela amizade sincera, apoio nos momentos difíceis e valorosas contribuições para a construção deste trabalho.

A todos os meus amigos do CEAMAZON, em especial, Carol Dias, Eng. Rodrigo Carvalho, M.Sc. Eng. Allan Manito, M.Sc. Eng. Thiago Mota Soares, pela amizade e apoio para minhas atividades dentro daquele espaço.

Ao meu amigo David Oliveira, pelo apoio e amizade. À minha amiga Priscila Lobato e a todos os meus amigos do laboratório LCADE.

À toda a minha família, agradeço pelo carinho e apoio. Da mesma forma a todos que contribuíram diretamente ou indiretamente com esta conquista.

RESUMO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é um sistema de fundamental importância no panorama brasileiro. Sua função é conectar eletricamente os centros geradores e os centros consumidores, sendo eles empresariais, comerciais ou residenciais. Os principais equipamentos responsáveis pela conexão e transmissão de energia elétrica dos centros geradores aos consumidores são os transformadores de potência. Esses equipamentos estão sujeitos a diversos tipos de falhas que podem afetar seus componentes chegando, em alguns casos, a comprometer a operação deste equipamento e, em consequência, o abastecimento de energia elétrica. Desta forma, neste trabalho é realizada uma análise multifísica nos transformadores de potência, acoplando simulações eletromagnéticas, térmicas e estruturais com o objetivo de fornecer ao operador informação sobre o momento ideal para a realização de manutenções preditivas, evitando paradas não planejadas. Para isso, foram utilizadas simulações computacionais por meio do Método de Elementos Finitos (MEF) e, a partir disso, foram analisadas as diversas situações as quais esses equipamentos podem ser submetidos, tanto na condição nominal, quanto em condições extremas de funcionamento, como corrente de *inrush* e corrente de curto-circuito. Nesta perspectiva, foram realizadas análises dos efeitos que a dilatação térmica e as forças axiais e radiais exercem, contribuindo para possíveis defeitos nesses equipamentos. Como objeto de estudo, as simulações foram realizadas em um transformador monofásico de 50 MVA, equipamento que encontra-se em funcionamento na região norte do país. Para melhor validação da metodologia utilizada neste trabalho, as simulações foram validadas com dados reais de medição e com resultados presentes em literaturas atuais. Desta forma, este trabalho apresenta uma metodologia que pode auxiliar o quadro técnico de uma indústria na decisão do momento adequado de parada em um transformador de potência para a realização de manutenções preditivas.

Palavras-chave: Método de Elementos Finitos (MEF). Transformador de Potência. Análise Multifísica. Manutenção Preditiva.

ABSTRACT

The National Interconnected System (NIS) is an organ of fundamental importance in the Brazilian panorama. Its function is to electrically connect generating centers and consumer centers, whether they are business, commercial or residential. The main equipment responsible for the connection and transmission of electric power from the generating centers to the consumers are the power transformers. This equipment is subject to several types of faults that can affect its components, in some cases compromising the operation of this equipment, and consequently the supply of electric energy. In this work, a multiphysical analysis is performed on power transformers, coupling thermal and structural electromagnetic simulations with the objective of providing the operator with information about the ideal moment for performing predictive maintenance, avoiding unplanned shutdowns. For this, computational simulations using the Finite Element Method (FEM) were used and from this, we analyzed the different situations that these equipments can be submitted, in the nominal condition, as well as extreme conditions of operation like current of inrush and current short-circuit. In this perspective, analyzes of the effects that the thermal expansion and the axial forces and radia exerted contributing to possible defects in these equipments were carried out. As a study object, the simulations were performed in a 50 MVA single-phase transformer, which is an equipment that is in operation in the northern region of the country. For a more validation of the methodology used in this work the simulations were validated with real measurement data and with results present in current literature. In this way, this work presents a methodology that can help the technical framework of an industry in the decision of the appropriate moment of stop in a power transformer for the accomplishment of predictive maintenance.

Keywords: Finite Element Method (FEM). Power Transformer. Multiphysics Analysis. Predictive Maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Processos de uma simulação física.	34
Figura 2 – Domínios físicos de simulações acopladas.	35
Figura 3 – Direcionamento do campo magnético nos enrolamentos um transformador.....	39
Figura 4– Sentido da força radial nos enrolamentos do transformador (a) corrente nominal e curto-circuito, (b) corrente de <i>inrush</i>	45
Figura 5– Curvatura forçada causada por forças radiais.	45
Figura 6 – Curvatura livre causada por forças radiais.	46
Figura 7 – Ilustração de uma deformação devido ação de forças axiais.	47
Figura 8 – Flexão dos condutores entre espaçadores radiais.....	48
Figura 9 – Tombamento devido a forças axiais – seção transversal.	48
Figura 10 – Curvas de compressão axial para enrolamentos concêntricos.	49
Figura 11 – Processos de solução da análise acoplada eletromagnético-térmico.....	52
Figura 12– Processos de solução da análise acoplada eletromagnético-estrutural.....	53
Figura 13 – Processos de solução da análise acoplada eletromagnético-térmico-estrutural. ...	55
Figura 14 – Definição básica do MEF, (a) problema de geometria complexa, (b) discretização do problema, (c) geometria simples (tetraédrico).....	58
Figura 15– Elemento tetraédrico.	58
Figura 16– Transformação de coordenadas, de global para local, em 3D.....	66
Figura 17 – Modelo típico de núcleo de transformadores.	72
Figura 18– Transformador tipo núcleo envolvente (<i>Shell type</i>).	72
Figura 19– Transformador tipo núcleo envolvido (<i>Core type</i>).....	73
Figura 20– Ilustração dos enrolamentos do transformador.	74
Figura 21– Configuração de enrolamentos concêntricos.	74
Figura 22– Enrolamentos com bobinas alternadas.	75
Figura 23– Funcionamento dos radiadores acoplado a um transformador.....	76

Figura 24– Esquema de um transformador simples.	77
Figura 25– Principais tipos de ligação de transformadores (a) Y Delta, (b) Delta Y, (c) Delta Dela e (d) Y Y.	78
Figura 26– Forma de onda característica da corrente de <i>inrush</i>	79
Figura 27– Curva característica da corrente de curto-circuito.	82
Figura 28– Implementação da metodologia proposta nos softwares Ansys e Maxwell.....	85
Figura 29 – Transformador em estudo.	86
Figura 30 – Modelagem do transformador utilizado nas análises, vista (a) frontal, (b) lateral e (c) superior.....	87
Figura 31– Malhas de elementos finitos utilizadas, (a) Ansoft Maxwell, (b) Ansys Workbench.....	87
Figura 32– Densidade de fluxo magnético de dispersão no núcleo do transformado em operação nominal.....	88
Figura 33 – Densidade de fluxo magnético de dispersão axial nos enrolamentos (a) externo, (b) interno.	89
Figura 34 – Densidade de fluxo magnético de dispersão radial nos Enrolamentos (a) externo, (b) interno.	90
Figura 35 – Força gerada no enrolamento externo.	90
Figura 36 – Força gerada no enrolamento interno.....	91
Figura 37 – Parâmetros para geração de calor.....	91
Figura 38 – Distribuição da temperatura nos enrolamentos.....	92
Figura 39 – Distribuição de temperatura ao longo da altura do enrolamento externo.	92
Figura 40 – Distribuição de temperatura ao longo da altura do enrolamento Interno.....	93
Figura 41 – Forças importadas da simulação eletromagnética.....	94
Figura 42 – Deformação gerada sob condição nominal.	94
Figura 43 – Deformação no enrolamento externo em condição nominal.....	95
Figura 44 – Deformação no enrolamento interno em condição nominal.	95

Figura 45 – Deformação na direção do eixo Y no enrolamento externo em operação nominal.	96
Figura 46 – Deformação na direção do eixo Y no enrolamento interno em operação nominal.	96
Figura 47 – Deformação na direção do eixo Z no enrolamento externo em operação nominal.	97
Figura 48 – Deformação na direção do eixo Z no enrolamento interno em operação nominal.	97
Figura 49 – Picos da corrente de <i>inrush</i>	98
Figura 50 – Densidade de corrente no enrolamento com corrente de <i>inrush</i>	99
Figura 51 – Densidade de fluxo magnético no núcleo com corrente de <i>inrush</i>	99
Figura 52 – Densidade de fluxo magnético (a) axial e (b) radial no enrolamento energizado	100
Figura 53 – Forças geradas durante a energização com correntes de <i>inrush</i>	101
Figura 54 – Temperatura que o enrolamento externo pode chegar durante a energização com correntes de <i>inrush</i>	102
Figura 55 – Comportamento da temperatura ao longo do enrolamento energizado.	102
Figura 56 – Deformação gerada nos enrolamentos do transformador com correntes de <i>inrush</i>	103
Figura 57 – Comportamento da deformação ao longo do enrolamento durante a energização.	104
Figura 58 – Deformação na direção do eixo Y no transformador durante a energização.	104
Figura 59 – Deformação na direção do eixo Z no transformador durante a energização.	105
Figura 60 – Densidade de corrente no enrolamento externo carregado com correntes de curto- circuito.	106
Figura 61 – Densidade de corrente no enrolamento interno carregado com correntes de curto- circuito.	107
Figura 62 – Densidade do fluxo magnético de dispersão no núcleo para a condição de curto- circuito.	107

Figura 63 – Densidade de fluxo magnético de dispersão axial nos enrolamentos (a) externo e (b) interno do transformador em condição de curto-circuito.....	108
Figura 64 – Densidade de fluxo magnético de dispersão radial nos enrolamentos do transformador em condição de curto-circuito.....	108
Figura 65 – Força gerada no enrolamento externo para a condição de curto-circuito.	109
Figura 66 – Força gerada no enrolamento interno para a condição de curto-circuito.	110
Figura 67 – Temperatura nos enrolamentos, (a) externo, (b) interno, para a condição de curto-circuito.....	110
Figura 68 – Comportamento da temperatura ao longo do enrolamento externo para a condição de curto-circuito.....	111
Figura 69 – Comportamento da temperatura ao longo do enrolamento externo para a condição de curto-circuito.....	112
Figura 70 – Deformação gerada nos enrolamentos, (a) externo, (b) interno, para a condição de curto-circuito.	112
Figura 71 – Comportamento da deformação ao longo do enrolamento externo para a condição de curto-circuito.....	113
Figura 72 – Comportamento da deformação ao longo do enrolamento interno para a condição de curto-circuito.....	114
Figura 73 – Deformação na direção do eixo Y no enrolamento externo para a condição de curto-circuito.	114
Figura 74 – Deformação na direção do eixo Y no enrolamento interno para a condição de curto-circuito.	115
Figura 75 – Deformação na direção do eixo Z no enrolamento externo para a condição de curto-circuito.	115
Figura 76 – Deformação na direção do eixo Z no enrolamento interno para a condição de curto-circuito.	116
Figura 77: Fluxograma do sistema de monitoramento virtual.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características construtivas do transformado.	86
Tabela 2– Comparação entre as temperaturas medidas e calculadas.	93
Tabela 3 – Comparação entre as deformações radiais.....	105
Tabela 4 – Resumo das deformações	116

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

ATP	Alternative Transient Program
CE	Cargas Equivalentes
<i>det</i>	Determinante
<i>div</i>	Divergente
EC	Estudos de Carregamento
<i>grad</i>	Gradiente
MEF	Método de Elementos Finitos
PVU	Perda de Vida útil
<i>rot</i>	Rotacional
SIN	Sistema Interligado Nacional

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{E}	Campo elétrico (N/C) ou (V/m)
\vec{F}	Força elétrica (N)
q	Carga de prova (C)
Q	Carga elétrica de uma esfera (C)
\vec{D}	Vetor densidade de fluxo elétrico (C/m ²)
\vec{a}_r	Vetor unitário de coordenadas esféricas
ϵ_0	Permissividade relativa no vácuo ($8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m)
r	Raio da esfera
\vec{H}	Vetor campo magnético (A/m)
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Henry/m)
i	Corrente elétrica (A)
n_s	Numero de espiras no solenoide.
l_s	Comprimento do solenoide (m)
$\vec{\Phi}$	Fluxo magnético (Wb)
\vec{B}	Densidade de fluxo magnético (T)
A_p	Área do plano perpendicular ao fluxo magnético (m ²)
μ	Permeabilidade magnética do meio (Henry/m)
μ_r	Permeabilidade magnética especifica do material (Henry/m)
\vec{J}	Densidade de corrente (A/m ²)
t	Unidade de tempo
ρ_v	Densidade volumétrica de carga (C/m ³)
P_T	Total de perdas no transformador
P_J	Perdas devido à corrente nos enrolamentos
P_h	Perdas no núcleo
P_a	Perdas adicionais produzidas pelas correntes induzidas
$P_J(t)$	Perdas pelo efeito Joule (W)

r_e	Resistência efetiva do enrolamento (ohms)
$I(t)$	Corrente circulante pelo enrolamento (A)
$[K]\{F\}$	Função genérica
$\{C_a\}$	Solução exata de $[K]\{F\}$
$\{C_b\}$	Solução aproximada de $[K]\{F\}$
R	Resíduo gerado pela diferença entre a solução exata e a solução aproximada
W	Função de ponderação
D	Domínio do problema estudado
N_i	Funções de forma
∇	Operador nabla
ξ	Coordenada local correspondente ao eixo x
η	Coordenada local correspondente ao eixo y
ω	Coordenada local correspondente ao eixo z
$\vec{V}_{(x,y,z)}$	Vetor potencial
V_T	Volume do tetraédrico
J	Matriz jacobiana
α	Relação de transformação
V_1	Tensão no primário,
V_2	Tensão no secundário,
I_1	Corrente no primário,
I_2	Corrente no secundário,
N_1	Número de espiras no primário
N_2	Número de espiras no secundário
\vec{f}_M	Densidade volumétrica de força magnética (N/m ³)
\vec{f}_{Ax}	Densidade volumétrica de força magnética axial (N/m ³)
\vec{f}_{Ra}	Densidade volumétrica de força magnética radial (N/m ³)
\vec{B}_{Ax}	Densidade de fluxo magnético axial (T)
\vec{B}_{Ra}	Densidade de fluxo magnético radial (T)

n	Número de espiras no enrolamento
I_{\max}	Corrente nominal do enrolamento (A)
h	Altura do enrolamento (m)
D_m	Diâmetro médio do enrolamento (m)
F_R	Força radial total no enrolamento (N)
F_{rmed}	Força radial média nos enrolamento (N)
S	Seção transversal
σ_{medio}	Estresse de tração médio no enrolamento (N/m ²)
F_A	Força axial total no enrolamento (N)
d_0	Espaços entre os enrolamentos (m)
d_1 e d_2	Espessuras radiais dos enrolamentos (m)
h_{eff}	Comprimento efetivo do fluxo radial (m)
a	Comprimento do condutor (m)
I_{cc}	Pico máximo da corrente de curto-circuito (A)
k	Fator de assimetria da corrente de curto-circuito
S_n	Potencia nominal do transformador (MVA)
V	Tensão nominal fase-fase do transformador (Volts)
Z	Impedância do transformador
$I_{0\max}$	Valor da corrente do pico máximo da corrente de <i>inrush</i>
h_w	Altura do enrolamento energizado
H	Fluxo magnético
k_1	Fator de correção para o ângulo de saturação
k_2	Coeficiene de ajuste para o calculo de pico máximo
k_3	Fator de correção para o decaimento de <i>inrush</i>
X_s	Reatância do núcleo
V	Tensão aplicada no enrolamento em RMS
θ	Ângulo para o calculo da atenuação de <i>inrush</i>
N	Número de voltas no enrolamento
f	Frequência da rede elétrica

B_s	Densidade de fluxo de saturação
B_{mp}	Valor de pico da densidade de fluxo projetado de estado estável no núcleo
B_R	Densidade do fluxo residual
P_f	Perdas por correntes parasitas (Watts/kg de núcleo);
K_f	Constante que depende do tipo de material [(kW.m ²)/(kg.Hz ² .Wb ²)]
B_m	Indução magnética máxima (Wb/m ²)
d	Espessura da chapa que compõe o núcleo (mm)
P_H	Perda por efeito de histerese (Watts/kg de núcleo)
K_S	Constante, que depende do material usado no núcleo
α	Expoente de Steinmetz (pode variar de 1,4 a 2,5)
R_p	Resistência do enrolamento primário (Ω)
I_p	Resistência do enrolamento secundário (Ω)
R_s	Corrente que circula no enrolamento primário (A)
I_s	Corrente que circula no enrolamento secundário (A)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Estado da arte	22
1.1.1	Método de elementos finitos	23
1.1.2	Corrente de <i>inrush</i>	24
1.1.3	Corrente de curto-circuito	26
1.1.4	Manutenção preditiva em transformadores	27
1.2	Objetivo geral	29
1.2.1	Objetivos específicos	30
1.3	Motivação	30
1.4	Estrutura do trabalho	31
2	FUNDAMENTOS DE ANÁLISES MULTIFÍSICAS EM TRANSFORMADORES	33
2.1	Considerações iniciais	33
2.2	Grandezas eletromagnéticas	35
2.2.1	Variáveis eletromagnéticas	35
2.2.2	Equações de Maxwell	37
2.2.3	Forças eletromagnéticas	38
2.3	Grandezas térmicas	40
2.3.1	Fontes de geração de calor no interior do transformador	41
2.3.2	Perdas por efeito Joule devido à corrente nos enrolamentos	41
2.3.3	Perdas no núcleo do transformador ou perdas no ferro	42
2.4	Grandezas estruturais	44
2.4.1	Forças radiais	44

2.4.2	Forças axiais	47
2.5	Análises acopladas	50
2.5.1	Eletromagnético-térmico	51
2.5.2	Eletromagnético-estrutural	53
2.5.3	Eletromagnético-térmico-estrutural.....	54
2.6	Considerações finais	55
3	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	57
3.1	Considerações iniciais.....	57
3.2	Elemento tetraédrico	57
3.3	Método de Galerkin	64
3.4	Modelagem matemática	65
3.5	Considerações finais	69
4	TRANSFORMADORES E TRANSITÓRIOS	70
4.1	Considerações iniciais.....	70
4.2	Transformadores	71
4.2.1	Núcleo.....	71
4.2.2	Modelos de núcleos	72
4.2.3	Enrolamentos	73
4.2.4	Modelos de enrolamentos.....	74
4.2.5	Radiador	75
4.2.6	Princípio de funcionamento.....	76
4.3	Principais transitórios	78
4.3.1	Corrente de <i>inrush</i>	78
4.3.2	Corrente de curto-circuito.....	81

4.4	Considerações finais	83
5	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	84
5.1	Considerações iniciais	84
5.2	Implementação da metodologia	84
5.3	Características do transformador sob estudo	86
5.4	Validação da metodologia proposta	88
5.5	Análise sob corrente de <i>inrush</i>	98
5.6	Análise sob corrente de curto-circuito	105
5.7	Aplicabilidade da Metodologia Proposta.....	117
5.8	Considerações Finais	118
6	CONCLUSÕES	120
6.1	Proposta de trabalhos futuros	121
	REFERÊNCIAS	122
	APENDICE A	128
	Artigos Publicados	128

1 INTRODUÇÃO

Transformadores de potência são dispositivos essenciais aos sistemas elétricos de potência e constituem-se em um dos seus componentes de maior custo. Quando um destes equipamentos é danificado ou apresenta algum tipo de falha, faz-se necessário seu reparo ou até mesmo sua substituição. Isto demanda custos financeiros altíssimos, primeiro pelo alto valor comercial destes dispositivos, segundo pela perda temporária da capacidade de transmissão de energia elétrica, já que a desativação de linhas de transmissão provocada pela troca/reparo de transformadores terá reflexo direto no atendimento às cargas do setor produtivo que, por sua vez, influenciarão no desempenho econômico do país como um todo (GUIMARÃES, 2013).

As falhas que acometem os transformadores são bem conhecidas, amplamente divulgadas e podem ser decorrentes de diferentes causas e condições tanto de instalação como operativas. De um modo geral, no entanto, estas falhas podem ser classificadas como sendo de origens elétricas, mecânicas, térmicas ou químicas (WANG; VANDERMAAR; SRIVASTAVA, 2002).

Obviamente, quando o equipamento é fabricado, este apresenta uma boa suportabilidade térmica, dielétrica, química e mecânica. Mas com o passar do tempo, há o enfraquecimento do isolamento dos seus condutores/bobinas causado pelos fenômenos eletroquímicos do líquido de resfriamento (óleo), pelas vibrações produzidas pelas forças eletromecânicas durante a sua operação normal, ou seja, em regime permanente, pelo aquecimento gerado devido as perdas de corrente e também pelas deformações dos enrolamentos causadas pelas altas correntes de curto-circuito e energização (SARAIVA, 2011).

Espera-se que um transformador experimente e suporte um determinado número de curtos-circuitos durante seu tempo de vida útil. Porém, mais cedo ou mais tarde, um novo evento causará algum leve movimento no enrolamento e a capacidade do transformador de suportar novos esforços eletromecânicos será, então, reduzida. Nesse sentido, torna-se importante a verificação periódica das suas condições mecânicas, principalmente nas unidades com muito tempo de operação (unidades mais antigas), de forma a se obter subsídios para impedir falhas catastróficas. Técnicas especiais são requeridas para o monitoramento e avaliação das condições mecânicas do enrolamento de um transformador. Apesar deste assunto ser uma preocupação constante dos projetistas e fabricantes de transformadores, bem

como dos profissionais de manutenção e operação das empresas de energia elétrica, há certa carência de metodologias e ferramentas robustas para se avaliar os efeitos dos esforços mecânicos decorrentes das elevadas correntes transitórias sobre estes dispositivos (CIGRE, 2002).

Os procedimentos para a sua substituição ou reparo são igualmente onerosos para a empresa proprietária, podendo comprometer sua receita. Quando há dano em um desses equipamentos, as concessionárias podem ter perdas financeiras, pois deixam de vender seu produto. Outro efeito negativo com a “parada” de um transformador, seja para manutenção ou substituição, é em relação aos clientes das concessionárias, sejam estes do ramo empresarial (indústrias, prédios comerciais, entre outros) ou o próprio consumidor residencial, que sofrem com a perda de qualidade no fornecimento da energia elétrica e/ou o desconforto em sua residência (FONSECA, 2016).

A partir desta perspectiva, a presente dissertação tem como principal contribuição a elaboração de uma metodologia baseada no MEF para representar análises acopladas, eletromagnética, térmica e estrutural, dos enrolamentos de transformadores quando estão sujeitos às correntes de *inrush* e correntes de curto-circuito. Desenvolvendo uma modelagem 3D com o intuito de auxiliar em análises de acoplamento entre forças eletromagnéticas, aquecimento e deformações que atuam nos enrolamentos desses transformadores. A realização destas análises através de simulações acopladas é de grande importância, pois é possível avaliar de forma mais precisa a influência que todos estes fenômenos têm sobre a integridade da parte ativa dos transformadores. Para isso, será realizado o estudo de um transformador de potência monofásico que está conectado a um banco trifásico.

1.1 Estado da arte

Dentro deste contexto, este tópico tem por objetivo realizar um levantamento bibliográfico, nos cenários nacional e internacional, de publicações que se julgam mais relevantes sobre o tema em questão. Tal pesquisa tem como principal objetivo subsidiar as metodologias e análises a serem realizadas nesta dissertação.

A incontestável importância dos transformadores para o sistema elétrico de potência, aliada à vasta quantidade de bibliografia e estudos encontrados na literatura sobre o equipamento em questão, evidencia que ainda existe certa carência de publicações sobre os efeitos combinados de dois ou mais fenômenos físicos em transformadores. Entretanto, mesmo reconhecendo esta escassez, as investigações bibliográficas citadas nesta dissertação

procuraram obter uma seleção das publicações mais relevantes sobre o tema. Para melhor compreensão, as referências foram agrupadas com a seguinte estruturação:

1.1.1 Método de elementos finitos

O aumento da complexidade das estruturas e da capacidade dos computadores favoreceu o aparecimento de novos métodos de análise, entre eles o método de elementos finitos, tornando seu crescimento exponencial na década de 80 e se destacando como um dos mais utilizados (TAVARES, 1998).

O MEF foi primeiramente proposto em 1940 para a análise de diversos fenômenos físicos que ocorrem em meios contínuos e que são descritos através de equações diferenciais parciais, com determinadas condições de contorno. O princípio do método consiste em dividir o domínio (meio contínuo) do problema em sub-regiões de geometria simples (BIANCHI, 2005). Nesta formulação, as resoluções de problemas de saturação em materiais ferromagnéticos não podiam ser obtidas até que Silvester e Chari (1970) publicaram um artigo que propôs a utilização de uma variação deste método em problemas não lineares adequados a análises eletromagnéticas.

Segundo Gesualdo (2010), o MEF surgiu com a seguinte cronologia: em 1943 um matemático chamado Courant apresentou solução polinomial de problema de torção, seguindo procedimentos considerados como MEF; em 1950 a indústria aeronáutica inicia o uso do MEF para avaliar asas de aviões; em 1960 foi então consolidado o nome de Método de Elementos Finitos atribuído por Clough; em 1970 começam a surgir os primeiros *softwares* que integraram o MEF como método de solução, alguns exemplos destes *softwares* são o ANSYS, o NASTRAN, o ASKA, entre outros; finalmente em 1980 ocorreu a disseminação do método entre grande variedade de áreas de pesquisa até alcançar o panorama que temos nos dias atuais.

Com o passar dos anos, o método de elementos finitos foi largamente adotado para solução de 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, 2010).

Silva e Bastos (2015) afirmam que a eficiência do MEF para a concepção e melhoria dos dispositivos eletromagnéticos já é estabelecida há várias décadas, o que o torna em uma poderosa ferramenta utilizada para a melhoria de modelos de transformadores de potência devido à complexidade deste dispositivo. Em seu trabalho eles discutem a influência das

simplificações feitas nas geometrias de transformadores de potência para a realização de simulações eletromagnéticas e termodinâmicas com diminuição do tempo computacional, obtenção de campos elétricos e magnéticos, temperaturas e fluxo de calor no interior do transformador.

No trabalho de Sousa et al (2016), é apresentada uma metodologia de simulações multifísica através do método de elementos finitos. Esta metodologia propõe a conexão e iteração de vários domínios físicos em uma única simulação. Esta estrutura de acoplamento possibilitou realizar análises acopladas nas quais foram observados parâmetros eletromagnéticos, térmicos e estruturais e suas contribuições para a diminuição da vida útil dos transformadores de potência (SOUSA et al, 2017).

Mesmo o método de elementos finitos já sendo amplamente utilizado nas engenharias Dawood (2017), realiza em seu trabalho uma análise magnética em um transformador de 1,25 MVA, comparando resultados obtidos via método de elementos finitos e resultados analíticos onde o autor demonstra que a diferença entre os resultados não ultrapassou os 5% evidenciando a exatidão do MEF.

1.1.2 Corrente de *inrush*

Sabe-se que as correntes de alta magnitude que ocorrem durante a energização de transformadores são ocasionadas pela saturação de seu núcleo ferromagnético. Essas elevadas correntes, denominadas de “correntes de *inrush*”, podem provocar uma série de efeitos danosos para o sistema elétrico, como também para o próprio transformador, tais como: afundamentos momentâneos de tensão, sobretensões harmônicas temporárias, estresse eletromecânico nos enrolamentos dos transformadores, deterioração da isolação, operações erráticas de relés diferenciais e de sobrecorrentes, etc. Desta forma, esta situação operacional pode degradar a qualidade da energia elétrica fornecida pelo sistema elétrico e, conseqüentemente, reduzir a vida útil do transformador (GUIMARÃES, 2013).

Assim, Kulkarni e Kaparde (2004) ilustraram diversos aspectos relacionados ao projeto de transformadores, tais como: estimativas de perdas, estimativa do ponto mais quente, cálculo dos esforços causados por correntes de energização nos enrolamentos dos transformadores. As correntes de *inrush* podem apresentar uma amplitude de 6 a 8 vezes o valor da corrente nominal do transformador.

Steurer e Fröhlich (2002) em seu trabalho apresentam o resultado de investigações sobre a forma com a qual as forças eletromecânicas produzidas pelas correntes de energização

do transformador se distribuem no interior dos enrolamentos. Estes resultados demonstram que, mesmo com picos 30% menores que os provocados pelas correntes de curto-circuito, as correntes de *inrush* podem produzir forças com amplitudes semelhantes às provocadas pela corrente de curto-circuito. Deve-se levar em conta que o tempo de duração das correntes de energização é, em geral, consideravelmente maior que o das correntes de curto-circuito. Outro fato 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 de serviço.

Em decorrência da importância deste fenômeno em estudos eletromagnéticos, diversos autores desenvolveram estudos sobre o mesmo, como Yacamini e Bronzeado (1994), os quais desenvolveram uma análise no domínio do tempo em que as equações dos sistemas elétricos e magnéticos são resolvidas como um único sistema, aplicados em transformadores de 5 kVA e 180 MVA sob condições de energização.

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

Marcelino (2011) realizou em suas pesquisas medições e análises das correntes de *inrush* que surgem no instante de energização de um transformador, além de ter observado o comportamento não senoidal da corrente de excitação e realizado ensaios a vazio a fim de determinar os parâmetros de seu circuito equivalente.

Em Azevedo (2007) são apresentados os defeitos provocados pelos esforços mecânicos decorrentes de correntes de *inrush* e curtos-circuitos “passantes”, mostrando como esses fenômenos se constituem em importantes causadores de falhas em transformadores. Em seu trabalho é realizada uma investigação dos efeitos danosos causados pelas correntes de *inrush* e curto-circuito. Emprega-se uma modelagem computacional baseada em MEF, utilizando o software FEMM para aferir as forças a que ficam submetidos os enrolamentos dos transformadores durante a ocorrência de correntes *inrush* e curto-circuito.

Já Fonseca et al (2018) investiga o comportamento de forças eletromagnéticas durante a ocorrência de falhas no interior de transformadores, como resultado de transitórios nos sistemas elétricos. A metodologia foi baseada na modelagem de um transformador monofásico de 50 MVA submetido a correntes de energização por meio do Método de Elementos Finitos (MEF). Nesta perspectiva, os valores das correntes de *inrush* foram obtidos

pelo software Alternative Transient Program (ATP), usados para estimar a dispersão da densidade do campo magnético no transformador e para encontrar os valores das forças nas direções axial e radial. Apresentando, assim, investigações de forças eletromagnéticas, deformação estrutural, tensões e fator de segurança no enrolamento do transformador quando submetido à corrente de *inrush*.

1.1.3 Corrente de curto-circuito

A consequência do curto-circuito é sempre um corte no fornecimento de energia, interrupção nos processos de fabricação, com prejuízos na produção, prejuízo dos componentes, como também risco à segurança de operadores (GUIMARÃES, 2013).

Quando ocorre curto-circuito nas saídas do transformador, circulam correntes de intensidade superior às suas correntes nominais, sendo limitadas apenas pela impedância do sistema que, geralmente muito baixa, pode alcançar até 20 vezes a corrente nominal (MARTÍN, 1969).

Ao abordar temas referentes aos curtos-circuitos e seus efeitos nos enrolamentos dos transformadores, Waters (1966) apresenta expressões para cálculo das forças eletromagnéticas axiais e radiais decorrentes das elevadas correntes em transformadores. Diversos arranjos de Taps são considerados nas expressões para se levar em conta a força adicional devido a essas derivações.

Outro objeto de pesquisa sobre a análise de curto-circuito são os transformadores de núcleo amorfo onde Fonseca (2010) descreve que, desde a década de 80, os materiais amorfo vêm ganhando grande espaço na indústria de transformadores, devido às baixas perdas em seu núcleo, visto que estes possuem um ciclo de histerese mais estreito quando comparados aos núcleos tradicionais de aço silício.

O trabalho produzido por Azevedo (2007) teve por objetivo investigar as forças eletromagnéticas e o estresse mecânico resultantes de correntes de curtos-circuitos passantes e correntes de energização que se estabelecem no interior de transformadores. Para alcançar tal propósito, foram empregadas duas modelagens computacionais no domínio do tempo baseadas em forças magnetomotrizes e relutâncias magnéticas. Uma segunda alternativa foi a utilização do método de elementos finitos na sua versão 2D. Estes modelos permitem realizar simulações envolvendo os fenômenos de regime transitório e permanente, além de possibilitar o acesso às grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas.

No entanto, os esforços mecânicos nos enrolamentos do transformador provocados por estas correntes são mais intensos, mesmo em um curto intervalo de tempo, cerca de dezenas de milissegundos e mil vezes mais rápidas que corrente de energização (LIMA; FONSECA, 2014).

Saraiva (2011) avaliou as alterações que podem ocorrer nos parâmetros de transformador quando algum tipo de deformação acontecer em seus enrolamentos. Para a verificação de tais efeitos, optou-se por analisar possíveis variações em parâmetros elétricos, magnéticos e mecânicos e que podem indicar uma redução na vida útil do equipamento. Todos os estudos, análises e simulações foram desenvolvidos tomando-se como base um pacote computacional baseado no método dos elementos finitos na sua versão 3D.

Em Sousa et al (2017), é utilizada uma metodologia de acoplamento na qual são apresentadas análises térmicas em um transformador de potência tendo como fonte de aquecimento as perdas geradas em uma simulação eletromagnética. Este estudo foi simulado considerando como energização as correntes de curto-circuito, com o intuito de avaliar o estresse térmico a que um transformador fica exposto durante este tipo de fenômeno transitório.

1.1.4 Manutenção preditiva em transformadores

Transformadores são componentes importantes na transmissão e distribuição de energia para empresas do setor elétrico. Em vista da crescente demanda por fornecimento de energia de qualidade, concessionárias do setor elétrico estão interessadas em evitar falhas em transformadores. Quaisquer que sejam as consequências das falhas, tais eventos são indesejáveis, uma vez que provocam a redução da confiabilidade geral do sistema, além de impor demanda adicional de mão-de-obra, recursos financeiros, tempo, para corrigir o problema e perdas no fornecimento de energia (BEHJAT; VAHEDI, 2011).

A eficiência da aplicação de técnicas preditivas de manutenção em transformadores de potência é fundamental para se detectar defeitos e falhas ainda em estágio incipiente, disparar ações preventivas ou corretivas programadas e, assim, evitar intervenções em caráter de urgência e ou emergência, visando a diminuição de interrupções não programadas no fornecimento de energia elétrica, as quais são comumente mais onerosas e causadoras de grandes transtornos aos consumidores e ao sistema elétrico (MARQUES, 2018).

Marques (2018) afirma ainda que, no caso do material isolante, especialmente o que envolve os enrolamentos, este deve se apresentar íntegro, de forma a suportar as solicitações

mecânicas, como aquelas provenientes de esforços eletrodinâmicos oriundos de curtos-circuitos, as solicitações decorrentes de surtos de tensão e, ainda, as solicitações térmicas devido aos carregamentos severos ou sobrecargas que podem ser agravados por temperaturas ambiente elevadas. A vida útil do transformador está diretamente associada à integridade de sua isolamento, assim sendo, os estudos sobre técnicas para o diagnóstico em transformadores de potência são de fundamental importância. Entre as técnicas preditivas mais utilizadas destacam-se:

- a) Estudo de carregamento do transformador (vida útil do transformador);
- b) Inspeções visuais e verificações locais (integridade de componentes externos);
- c) Contagem de partículas (em suspensão no óleo mineral isolante);
- d) Grau de polimerização do papel (polímero da celulose);
- e) Teor de Dibenzil-Dissulfeto (formação de sulfeto de cobre no enrolamento);
- f) Resposta em frequência (deslocamento mecânico dos enrolamentos); e
- g) Termografia (pontos quentes).

Os Estudos de Carregamento (EC) destinam-se à determinação da Perda de Vida Útil (PVU) do papel isolante e, conseqüentemente, dos próprios transformadores de potência, em função das Cargas Equivalentes (CE) concernentes aos perfis de carga com os quais estes equipamentos operam. Deste modo, sua utilização permite estimar uma expectativa de vida útil para os transformadores de potência, de acordo com as condições operativas a que são submetidos (BARNERS et al, 1997) e, ainda, classificar o estado dos equipamentos em função de seu carregamento, podendo inferir se estes estão envelhecendo em uma taxa normal ou acelerada por meio da avaliação da taxa PVU/ano. No trabalho de Marques et al (2015), sobre estudos de carregamento, foram realizadas simulações por meio do *software* denominado CTransf contemplando diferentes transformadores, temperaturas ambientes variadas e diferentes perfis de carga.

Fist (2000) salienta que ensaios devem ser realizados periodicamente por meio de amostras de papel tipo *kraft* que devem ser coletadas em pontos do enrolamento que tenham sido submetidos às maiores temperaturas e, conseqüentemente, estejam mais envelhecidas.

A técnica de análise de resposta em frequência (designada FRA, em inglês) é sensível às variações na disposição dos componentes dos enrolamentos (camadas, espiras, lides), por estimular, com frequências variadas (varredura), e medir respostas decorrentes das capacitâncias e indutâncias naturais dos enrolamentos, as quais são construtivamente

dependentes das suas dimensões de projeto do equipamento. Daí a sensibilidade desta técnica às deformações físicas, por efeitos mecânicos ou eletrodinâmicos, destes componentes. Por concepção, a técnica de FRA só pode ser utilizada com o equipamento desenergizado e desconectado do sistema, para diagnósticos de deformações no enrolamento, que podem ter ocorrido devido a impactos mecânicos durante o transporte do equipamento ou por efeitos eletrodinâmicos de curtos-circuitos, quando em operação (ELECTRIC POWER INDUSTRY, 2005).

A técnica de termografia se baseia na detecção de raios infravermelhos (calor) emitidos por pontos quentes. Em função da grande massa térmica do tanque de transformadores, não é possível localizar pontos quentes internamente, devido ao aquecimento da parte ativa e do óleo, com consequente emissão de raios infravermelhos por toda a superfície externa do equipamento, com dissipação de calor para o meio ambiente. Entretanto, é possível constatar diferenças de temperatura entre diferentes regiões externas do transformador, isto se dá tanto por características de projeto do transformador como a possíveis anomalias acometidas no transformador, exigindo uma análise acurada, que em via de regra, são constatações mais informativas do que conclusivas (SILVA, 2005).

Além das metodologias apresentadas anteriormente, Makarand et al (2017), apresentou um novo sistema de monitoramento de condição *on-line* (OCMS) para transformadores, que é útil para substituir a manutenção reativa e preventiva de transformadores por manutenção preditiva. Os resultados propostos do sistema são avaliados comparando os resultados obtidos a partir de modelos já consolidados. Entretanto, o OCMS proposto se aplica apenas a transformadores sem falhas anormais.

1.2 Objetivo geral

Um dos principais objetivos do presente trabalho é desenvolver uma técnica para previsão de possíveis danos em equipamentos de potência, especificamente em transformadores de potência. Através de um estudo de modelos matemáticos baseados no método de elementos finitos para simulação de esforços eletromagnéticos, térmicos e estruturais em transformadores de potência, quando o equipamento opera em estados transitórios.

Com base nas informações preliminares apresentadas anteriormente, esta dissertação tem como objetivo estudar os efeitos que possam ocorrer em um transformador de potência quando algum tipo de deformação incidir em seus enrolamentos. Para a verificação de tais

efeitos, optou-se por analisar possíveis variações em seus parâmetros eletromagnéticos, térmicos e estruturais, ou seja, prováveis alterações nas correntes, forças radiais e axiais, deformações radiais e axiais e temperatura, bem como qualquer outro parâmetro que se julgar importante. Tais variações poderiam inclusive indicar um decaimento na vida útil de tal equipamento.

1.2.1 Objetivos específicos

Em termos específicos espera-se:

- a) Construir modelos geométricos 3D de um transformador de 50MVA;
- b) Criar um modelo 3D MEF de um transformador para análise das Forças eletromagnéticas geradas durante o fenômeno de *inrush* e durante um curto-circuito;
- c) Criar um modelo 3D MEF de um transformador para análise do aquecimento dos enrolamentos gerado durante o fenômeno de *inrush* e durante um curto-circuito;
- d) Criar um modelo 3D MEF de um transformador para análise da deformação gerada durante o fenômeno de *inrush* e durante um curto-circuito;
- e) Verificar o modelo, analisar e avaliar a integridade estrutural dos enrolamentos do transformador sob condições *inrush* e curto-circuito.

1.3 Motivação

Falhas em transformadores são decorrentes de diferentes causas e condições tanto de instalação do equipamento como operativas. De modo geral, estas causas podem ser classificadas como sendo de origens elétricas (suportabilidades térmica e dielétrica), químicas e mecânicas (suportabilidade mecânica) (MEDINA, 2003).

Pesquisas retratam que grande percentagem dos defeitos em transformadores é de origem mecânica e dielétrica. Quanto às falhas dielétricas, considera-se que algumas delas iniciam-se com os movimentos mecânicos dos enrolamentos, os quais poderiam ser evitados por meio do monitoramento das condições mecânicas dos enrolamentos e do núcleo (FRANZEN; KARLSSON, 2007).

A deformação das bobinas também pode provocar a diminuição ou aumento do diâmetro das mesmas, prejudicando os canais de circulação do óleo e provocando

aquecimento localizado na isolação, acarretando aceleração do envelhecimento do papel isolante e, ainda, produzindo um aumento na reatância de dispersão. Podendo, como efeito destes eventos, levar à ruptura dos elementos dielétricos (SARAIVA, 2011).

Desta forma, um estudo associado aos tipos de deformações oriundas de elevadas correntes de curto-circuito ou correntes de energização que possam se desenvolver nos enrolamentos do transformador torna-se fundamental. Deste estudo, novas análises podem ser desenvolvidas para melhorar o diagnóstico de vida útil dos transformadores, evitando manutenções preventivas e falhas inesperadas (SARAIVA, 2011).

1.4 Estrutura do trabalho

Concluída a contextualização do problema e a revisão bibliográfica referente à esta dissertação, segue a sua apresentação em mais cinco capítulos.

Capítulo 2 - Fundamentos de Análises Multifísica: Este capítulo é destinado à estrutura dos domínios físicos, destacando os fenômenos eletromagnéticos, térmicos e estruturais. São discutidas, também, as formas de acoplar estas análises e dentro destes acoplamentos é proposta uma metodologia para análise multifísica em transformadores.

Capítulo 3 - Método de Elementos Finitos: Diante da tamanha aplicabilidade do método de elementos finitos em análises computacionais, este capítulo destina-se ao equacionamento matemático deste método destacando a estrutura matricial das equações diferenciais para problemas em 3D, especificando os equacionamentos matriciais para o elemento tetraédrico, demonstrando, também, a utilização do método de Garlekin com o MEF.

Capítulo 4 - Transformadores e Transitórios: Este capítulo é composto inicialmente pela descrição dos transformadores, destacando os principais componentes, o processo de funcionamento, seus principais tipos, além das falhas mais frequentes. Em sequência são exemplificados os principais tipos de transitórios ocorridos nos transformadores como *inrush* e curto-circuito, exemplificando as respectivas modelagens para calcular estes transitórios.

Capítulo 5 - Simulações e Resultados: Neste capítulo são apresentadas simulações multifísicas de um transformador de 50 MVA através do método de elementos finitos, quando submetido a correntes de energização e correntes de curto-circuito. Em sequência são mostrados os respectivos resultados da simulação possibilitando, assim, avaliar as condições de funcionamento da máquina durante a ocorrência dos transitórios.

Capítulo 6 - Conclusão: Como considerações finais, é apresentada uma síntese de todo o conteúdo abordado nos capítulos anteriores, bem como as vantagens e as dificuldades encontradas na elaboração do trabalho, além de apresentar propostas para trabalhos futuros baseados neste ramo de pesquisa.

2 FUNDAMENTOS DE ANÁLISES MULTIFÍSICAS EM TRANSFORMADORES

2.1 Considerações iniciais

Neste capítulo será discutido as diferentes análises físicas e formas de acoplamento, destacando as relações de conexões que podem ser desenvolvidas sobre um mesmo equipamento, através de metodologias específicas por simulações computacionais.

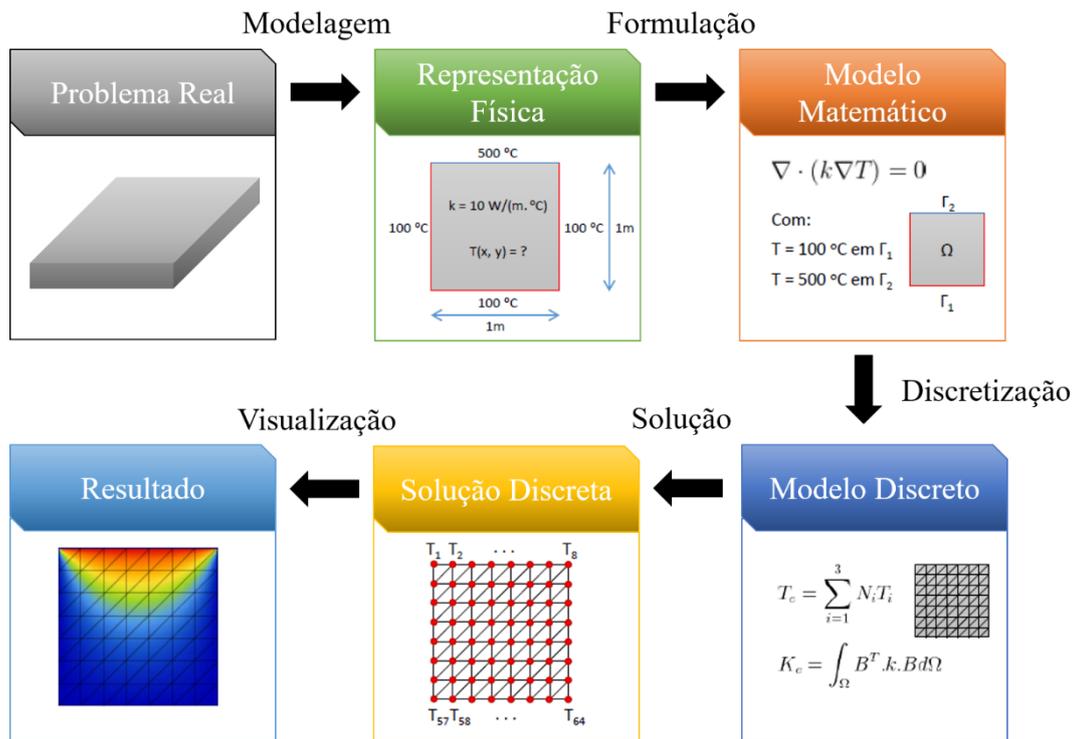
As simulações são importantes pois permitem tentar entender o passado e prever o futuro, respondendo a perguntas do tipo: “e se” aplicadas ao modelo de simulação X? Perguntas que muitas vezes não podem ser respondidas na prática devido ao custo associado ou mesmo à impossibilidade, já que o objeto da simulação pode nem existir na realidade (MENDES, 2016).

Simulações multifísicas são simulações que envolvem o cálculo de diversas grandezas físicas. Seu modelo matemático geralmente é formado por um conjunto de equações diferenciais parciais acopladas, ou seja, o cálculo de uma grandeza depende do valor das demais (MENDES, 2016)

O primeiro passo do processo de simulação consiste na idealização do fenômeno do mundo real a ser estudado, gerando uma representação física do mesmo. Isto envolve a definição das grandezas e propriedades físicas (escalares, vetoriais ou tensoriais) envolvidas, bem como seus domínios espacial e temporal, ou seja, a região do espaço e em quais momentos estas grandezas serão estudadas (MENDES, 2016).

O segundo passo consiste em formular um modelo matemático para a idealização do mundo real obtida no passo anterior. Nesta etapa, o modelador, utilizando as leis e princípios físicos que regem as grandezas do problema em estudo, define o conjunto de equações e condições de contorno do modelo. Exemplos incluem as equações de elasticidade que relacionam deformações em objetos sólidos com as forças aplicadas, equações de Navier-Stokes para previsão do movimento de fluidos, equações de Maxwell para problemas de eletromagnetismo, equações para transferência de calor, etc. que são problemas envolvendo mais de uma grandeza física, diversos conjuntos de equações são necessários, geralmente com acoplamento entre as grandezas. A Figura 1 ilustra os passos descritos anteriormente, tendo como exemplo uma placa de metal submetida a diferentes temperaturas em suas bordas (MENDES, 2016).

Figura 1– Processos de uma simulação física.



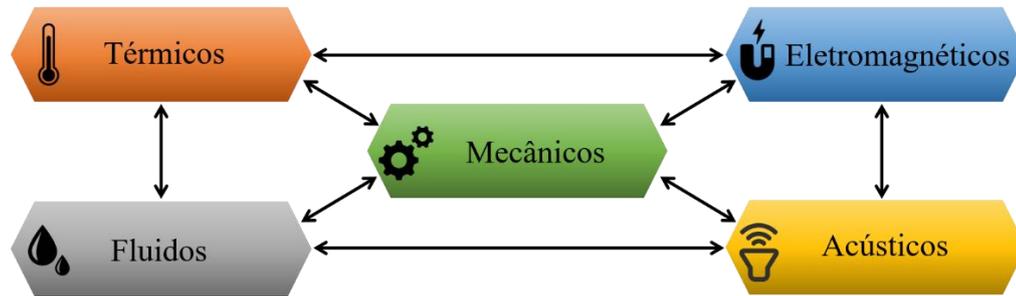
Fonte: Adaptado de Mendes, 2016, p. 26.

No exemplo da Figura 1, o problema em estudo é formulado através da equação bidimensional de condução de calor, uma expressão do princípio de conservação de energia, e das condições de contorno impostas na fronteira do domínio.

Os demais passos consistem na discretização do problema em estudo, onde o domínio do problema é subdividido em uma quantidade finita de domínios menores. Nesses subdomínios serão aplicados os equacionamentos definidos anteriormente e, assim, pode-se chegar a uma solução discreta que compõe a solução final do problema em proposto.

No entanto, um desempenho operacional preciso, com diferentes situações de carga elétrica e mecânica, é cada vez mais avaliado usando vários métodos de análise numérica. Desta forma, testes que não são viáveis em circunstâncias laboratoriais, podem ser realizados virtualmente e os acoplamentos entre os vários domínios físicos ser considerados e analisados de maneira apropriada. Portanto, os métodos de análise numérica são cada vez mais utilizados não só para a verificação dos valores contratuais das máquinas existentes, mas também para o processo de projeto inicial e para a otimização do projeto de novas máquinas (SCHMIDT, 2011). A Figura 2 ilustra de forma geral algumas das possíveis relações desses diferentes domínios físicos no caso de máquinas elétricas e transformadores de potência.

Figura 2 – Domínios físicos de simulações acopladas.



Fonte: Adaptado de Schmidt, 2011, p. 6.

A Figura 2 ilustra alguns dos diferentes domínios físicos aos quais os transformadores de potência estão sujeitos. É claro que cada um destes domínios tem muito a ser explorado, no entanto, o objetivo deste capítulo é mostrar de maneira sucinta as relações entre os fenômenos eletromagnéticos, térmicos e estruturais, destacando os principais aspectos para modelar cada um desses fenômenos e as metodologias para acoplamento em análises-multifísicas.

2.2 Grandezas eletromagnéticas

De acordo com Ortiz (2002), para modelar o funcionamento de um dispositivo eletromagnético, os aspectos magnéticos, elétricos e mecânicos devem ser considerados no modelo desse dispositivo. Estes aspectos estão relacionados devido à interdependência dos fenômenos físicos. Sendo assim, o estudo de campo magnético possui uma interrelação com quatro grandezas vetoriais. Bastos (2004) afirma que essas grandezas são locais, ou seja, podem existir em todos os pontos do universo ou na maioria campos vetoriais, não somente em vetores isolados. A seguir, serão apresentadas as grandezas vetoriais.

2.2.1 Variáveis eletromagnéticas

Campo elétrico: Define-se um campo de forças provocado pela ação de cargas elétricas. Os efeitos elétricos que ocorrem ao redor de uma carga elétrica só ocorrem se existir um campo elétrico associado, que interaja com a carga. O campo elétrico é representado por um conjunto de vetores, portanto, possui direção, sentido e intensidade. A direção e o sentido do vetor, por convenção, são dados pela direção e sentido da força que atua em uma carga de prova positiva colocada em um ponto, enquanto a intensidade do vetor representa o módulo

do campo elétrico em um dado ponto e é expressa pela Equação (2.1) (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{|q|} \quad (2.1)$$

Onde \vec{E} é o campo elétrico, \vec{F} é a força elétrica e q é o valor da carga de prova.

Densidade de Fluxo elétrico: A densidade de fluxo elétrico pode ser definida pela quantidade de linhas de campo que atravessa determinada superfície. O fluxo elétrico foi observado pela primeira vez por Michael Faraday, durante suas experiências com duas esferas, uma externa e uma interna a anterior (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009). De acordo com Silva (2012), considerando que a esfera interna possa assumir um raio mínimo e que a esfera externa possa ter um raio tendendo ao infinito, a densidade de fluxo elétrico pode ser determinada para uma carga pontual pela Equação (2.2), onde ϵ_0 é a permissividade magnética do vácuo, \vec{D} é o vetor densidade de fluxo elétrico, \vec{a}_r o vetor unitário de coordenada esférica, r o raio da esfera e Q a carga da esfera interna.

$$\vec{D} = \frac{Q}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2} \vec{a}_r \quad (2.2)$$

Campo Magnético: O campo magnético é o campo que envolve uma determinada massa exercendo ações magnéticas, toda massa magnética possui dois polos, norte e sul ou positivo e negativo, sendo um influenciado pelo outro. A intensidade do mesmo pode ser visualizada através das linhas de campo, ou seja, quanto maior o número de linhas, maior a intensidade do campo magnético (SILVA, 2012). Segundo Bastos (2004), o campo magnético também pode ser gerado por uma carga ou um conjunto de cargas em movimento que possuam uma velocidade de deslocamento, fenômeno este que conduz à noção de corrente elétrica que cria um campo magnético de vetores \vec{H} , cuja maneira de calcular varia dependendo do tipo de circuito em que venha a ocorrer. A partir da Equação (2.3) pode ser determinado o campo magnético para um solenoide, que é o circuito que mais se assemelha ao enrolamento de um transformador.

$$\vec{H} = \frac{\mu_0 n_s}{l_s} i \quad (2.3)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, i a corrente elétrica, n_s o número de espiras no solenoide e l_s o comprimento do solenoide.

Densidade de Fluxo Magnético: Os estudos de Faraday demonstram que o fluxo magnético é o conjunto de todas as linhas de campo que atravessam uma determinada região (SILVA, 2012). Assim como os elementos anteriores, o fluxo magnético também pode ser definido a partir de cálculos analíticos. A Equação (2.4) demonstra essa definição.

$$\vec{\Phi} = \oint \vec{B} dA_p \quad (2.4)$$

Onde $\vec{\Phi}$ é o fluxo magnético, \vec{B} a densidade de fluxo magnético e A_p a área do plano perpendicular ao fluxo magnético. De maneira análoga à densidade de fluxo magnético, pode-se representar o efeito da força magnetizante em dado meio, conforme a Equação (2.5).

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.5)$$

Assim sendo, a permeabilidade magnética do meio (μ) pode ser definida a partir do produto entre a permeabilidade do vácuo (μ_0) e a permeabilidade do material específico que esteja em estudo (μ_r).

2.2.2 Equações de Maxwell

Segundo Ortiz (2002), a análise de dispositivos eletromagnéticos requer o conhecimento dos fenômenos eletromagnéticos no interior e na região ao redor do dispositivo. As equações de Maxwell descrevem as relações entre as grandezas eletromagnéticas, possibilitando a análise temporal e espacial destes campos eletromagnéticos.

A Equação (2.6) representa a lei de Ampère, que relaciona o campo magnético (\vec{H}) [A/m] e a densidade de corrente (\vec{J}) [A/m²], com a adição do termo relativo à corrente de deslocamento (derivada temporal da densidade de campo elétrico (\vec{D}) [C/m²]). Essa equação

explicita o fato de que elementos de corrente elétrica e/ou variações temporais de campo elétrico produzem campo magnético rotacional (BOTELHO, 2010).

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.6)$$

Na lei de Faraday, a Equação (2.7), tem-se a relação entre o campo elétrico (\vec{E}) [V/m] e a indução magnética (\vec{B}) [T]. Esta equação evidencia que a variação temporal de uma indução magnética produz um campo elétrico rotacional. A lei de Lenz é contemplada nessa mesma equação através do sinal negativo, que indica o fato de o campo elétrico produzido gerar uma indução magnética oposta à indução imposta (BOTELHO, 2010).

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.7)$$

As Equações (2.8) e (2.9) representam, respectivamente, a lei de Gauss e a lei de Gauss do magnetismo. Essas leis estão associadas à inexistência de monopolos magnéticos (fluxo magnético conservativo) e ao fato de que cargas elétricas, representadas pela densidade volumétrica de carga (ρ_v) [C/m³], geram campos elétricos divergentes (BOTELHO, 2010).

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.9)$$

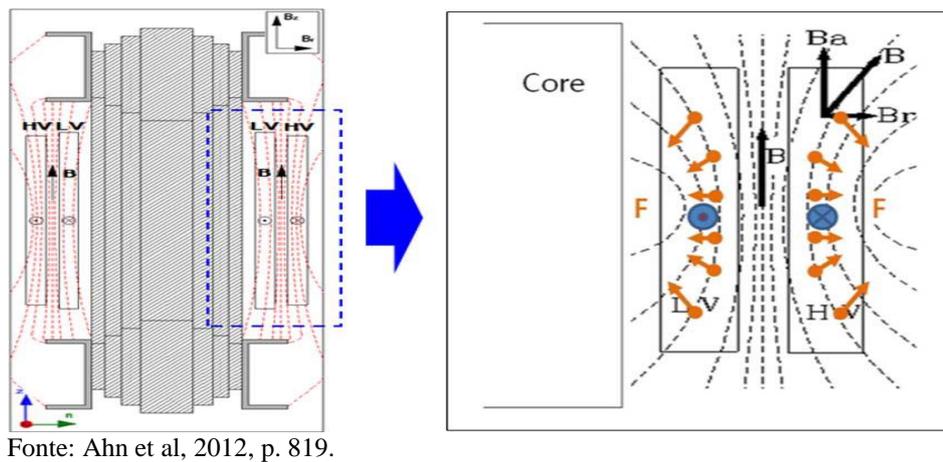
2.2.3 Forças eletromagnéticas

Sabe-se que, de acordo com a teoria eletrodinâmica, a força magnética \vec{f}_M num dado volume de um enrolamento de um transformador é igual ao produto vetorial da densidade de corrente \vec{J} no enrolamento pela densidade de fluxo magnético de dispersão \vec{B} , o que equivale à expressão básica das forças de Lorentz, conforme demonstrado na Equação (2.10) (WATERS, 1996).

$$\vec{f}_M = \vec{J} \times \vec{B} \quad (2.10)$$

As linhas de campo magnético seguem paralelas ao longo da maior parte da altura dos enrolamentos e apresentam uma inclinação nas extremidades, buscando o menor caminho de retorno. Essa inclinação provoca a decomposição do campo de dispersão em duas componentes, uma axial e outra radial nas extremidades inferior e superior dos mesmos conforme a Figura 3 (AHN et al, 2012).

Figura 3 – Direcionamento do campo magnético nos enrolamentos um transformador.



O processo de interação entre o fluxo de dispersão e a corrente acontece de duas formas diferentes. No primeiro caso, a densidade de fluxo magnético de dispersão axial interage com a corrente do enrolamento, resultando em uma força radial. No segundo caso, a interação entre o campo magnético de dispersão radial com a densidade de corrente resulta em uma força axial responsável pelos esforços de compressão, como mostra a Equação (2.11) (GUIMARÃES, 2013).

$$\begin{aligned}\vec{f}_{Ax} &= \vec{J} \times \vec{B}_{Ra} \\ \vec{f}_{Ra} &= \vec{J} \times \vec{B}_{Ax}\end{aligned}\tag{2.11}$$

A ação das forças axiais e radiais serão exploradas com um maior detalhamento no tópico de ruendas estruturais.

2.3 Grandezas térmicas

A necessidade de se obter os valores de temperatura no interior do transformador de potência é um problema muito abordado pelos especialistas, usuários e fabricantes desses equipamentos. Dentre as dificuldades para obter diretamente as medidas podemos citar as seguintes (IEEE C57.91, 2003):

- a) A necessidade de utilizar cabos com elevada isolação elétrica para ligar sensores internamente ao enrolamento, pois esses devem suportar o mesmo grau de isolação do enrolamento principal;
- b) Necessidade de intervenção em equipamentos que já estão em operação, o que pode levar ao comprometimento da condição de operação satisfatória do mesmo;
- c) Dificuldade ou impossibilidade da troca dos sensores em caso de defeito, pois a abertura do transformador compromete seu funcionamento;

O desenvolvimento de modelos que forneçam os valores de trabalho das grandezas que não podem ser medidas no interior dos transformadores (caso das temperaturas do enrolamento) já foi abordado na recomendação (IEEE C57.91, 2003).

Segundo Silva (2015) a influência desses parâmetros sobre os valores de temperatura estimados e sobre o cálculo da perda de vida útil vem sendo analisada por diversos autores. Outros trabalhos, no entanto, mostram como se pode partir do modelo térmico de um transformador de potência e, por analogias, elaborar um equivalente elétrico que tenha a mesma forma de resposta no tempo.

O envelhecimento do isolamento do transformador é um processo contínuo que ocorre em todas as temperaturas. A inexistência de uma temperatura crítica acima da qual o envelhecimento seja muito rápido dificulta a fixação de padrões de temperatura visando a especificação e operação de transformadores. Tais padrões são, portanto, fundamentados na experiência em serviço (BARBOSA, 2005).

Apesar dessas tentativas de melhorar o modelo de aquecimento do transformador, todos os métodos citados não fornecem subsídios para que se obtenha um retrato das temperaturas no interior do transformador e seja utilizado tanto como uma ferramenta para o projeto de novos transformadores quanto para sua operação. Para que esse objetivo seja alcançado, pode-se realizar um estudo por meio de métodos numéricos. A seguir, será

mostrado o Método de Elementos Finitos como uma possível ferramenta para resolver este problema (SILVA, 2015).

Embora o transformador seja um equipamento de alto rendimento, ainda assim apresenta perdas internas que se traduzem em geração de calor e consequente elevação de temperatura de suas partes componentes (BARBOSA, 2005).

2.3.1 Fontes de geração de calor no interior do transformador

Segundo Barbosa (2005), as perdas no transformador, oriundas do cobre (enrolamentos) e do ferro (núcleo), causam elevação de temperatura em seus componentes. Tais efeitos podem alterar as características dos materiais que os constituem, principalmente os isolantes, comprometendo o desempenho e a segurança do equipamento.

Considera-se que a geração da energia térmica é alimentada exclusivamente pelas perdas internas do equipamento. Dessa forma, não foi considerada a parcela de energia térmica proveniente do ambiente, no caso da incidência da radiação solar. Esta simplificação é aceitável, pois o ensaio de elevação de temperatura é realizado em ambiente abrigado e a radiação solar não possui influência sobre o conjunto. Assim, as perdas totais consideradas com influência na elevação de temperatura do transformador podem ser calculadas pela seguinte equação (SILVA, 2015):

$$P_T = P_J + P_h + P_a \quad (2.12)$$

Onde P_J são as perdas devido à corrente nos enrolamentos, P_h as perdas no núcleo e P_a as perdas adicionais produzidas pelas correntes induzidas nas diversas partes metálicas que compõem o transformador, devido ao fluxo disperso.

2.3.2 Perdas por efeito Joule devido à corrente nos enrolamentos

As perdas nos enrolamentos do transformador são devidas à passagem da corrente elétrica pela resistência ôhmica dos mesmos, resultando em perdas por efeito Joule ou perdas no cobre. Para um transformador monofásico, as perdas no cobre são dadas pela Equação (2.13), de maneira estática (BATRUNI, 1996):

$$P_J = R_p \cdot I_p^2 + R_s \cdot I_s^2 \quad (2.13)$$

Onde, P_J são as perdas por efeito Joule (W), R_p é a resistência do enrolamento primário (Ω), I_p é a resistência do enrolamento secundário (Ω), R_s é a corrente que circula no enrolamento primário (A) e I_s é a corrente que circula no enrolamento secundário (A).

Logo, verifica-se que as perdas no cobre são proporcionais ao quadrado da corrente de operação do transformador sob carga. O fato das perdas no ferro serem, como vimos, proporcionais à tensão de operação e das perdas no cobre serem proporcionais à corrente de operação, sugere que as perdas totais sejam proporcionais, em última instância, à potência aparente medida na entrada do transformador (BARBOSA, 2005).

Para o cálculo das perdas nos enrolamentos, evando em consideração o tempo de propagação, parte-se da premissa de que a geração de perdas nos enrolamentos, em decorrência das correntes induzidas pelo campo transversal que atravessa a bobina, é relativamente pequena em relação à corrente de condução principal. Assim, o principal efeito responsável pelo aquecimento no enrolamento dos transformadores de potência é devido à circulação das correntes pelo enrolamento e a dissipação de calor pelo efeito Joule. A avaliação dessas perdas é feita pela Equação (2.14) (SILVA, 2015).

$$P_J(t) = r_e [I(t)]^2 \quad (2.14)$$

Onde $P_J(t)$ são as perdas pelo efeito Joule (W), r_e a resistência efetiva do enrolamento (ohms) e $I(t)$ a corrente circulante pelo enrolamento (A). A Equação (2.12) fornece o valor da perda para um determinado instante de tempo, considerando a corrente na forma senoidal que é a utilizada em equipamentos de transformação.

2.3.3 Perdas no núcleo do transformador ou perdas no ferro

As perdas no ferro são produzidas por duas causas: (i) o fenômeno da histerese magnética, cuja energia, que é transformada em calor, se traduz em perdas por histerese; e (ii) o aquecimento que aparece no material como resultado das tensões e, conseqüentemente,

pelas correntes induzidas no material ferromagnético pela variação do fluxo magnético no tempo, conhecidas como correntes parasitas ou correntes de Foucault, apesar das perdas no núcleo apresentarem uma relevância significativa, na análise dos resultados essas perdas foram desconsideradas (BARBOSA, 2005).

As perdas por correntes parasitas, ou correntes de Foucault, em transformadores onde o projeto apresenta defeitos, apresentam-se relevantes até mesmo fora do núcleo, nas partes construtivas do equipamento, como suportes, tirantes, etc (MARTÍN, 1960). A perda produzida pelas correntes parasitas é expressa pela Equação (2.15).

$$P_f = K_f \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot d^2 \quad (2.15)$$

Onde, P_f são as perdas por correntes parasitas (Watts/kg de núcleo), K_f é uma constante que depende do tipo de material [(kW.m²)/(kg.Hz² .Wb²)], f é a frequência (Hz), B_m é a indução magnética máxima (Wb/m²) e d é a espessura da chapa que compõe o núcleo (mm).

Na Equação (2.15) observa-se que as perdas provocadas pelas correntes parasitas têm uma dependência grande com a frequência e a indução, pois considerando-se que em qualquer circuito resistivo a potência é proporcional ao quadrado da tensão aplicada, e a tensão nesse caso é uma tensão induzida. Observa-se, ainda, que as perdas estão relacionadas com o quadrado da espessura do núcleo, surgindo daí, como boa regra de projeto, a substituição de um núcleo maciço por lâminas eletricamente isoladas entre si (BARBOSA, 2005).

Com relação às perdas por histerese magnética, observa-se que qualquer núcleo magnético, sujeito à variação de fluxo, percorre um ciclo de histerese todas as vezes que o campo magnetizante varia de um valor máximo a um valor mínimo, e deste novamente a um valor máximo, sendo a potência perdida proporcional à área do ciclo. Esta perda é interpretada como sendo necessária para vencer o atrito entre os magnetos elementares que compõem o núcleo, sendo chamada de perda por histerese magnética. A potência perdida por efeito da histerese pode ser calculada pela fórmula de Steinmetz (OLIVEIRA, 1984):

$$P_H = K_S \cdot B_m^\alpha \cdot f \quad (2.16)$$

Onde P_H é a perda por efeito de histerese (Watts/kg de núcleo), K_s é uma constante, que depende do material usado no núcleo e α é o expoente de Steinmetz (pode variar de 1,4 a 2,5).

Ainda compondo as perdas no ferro, podemos citar as perdas provocadas pelo fluxo eletrostático e pelas correntes de fuga, que ocorrem nos materiais dielétricos sujeitos a tensão alternada. Essas perdas se dão através do efeito Joule e também do fenômeno que tem o nome de histerese dielétrica, em função da analogia existente com a histerese magnética. Tais perdas, porém, representam uma parcela muito pequena das perdas no ferro em um transformador e são de caráter empírico (BARBOSA, 2005).

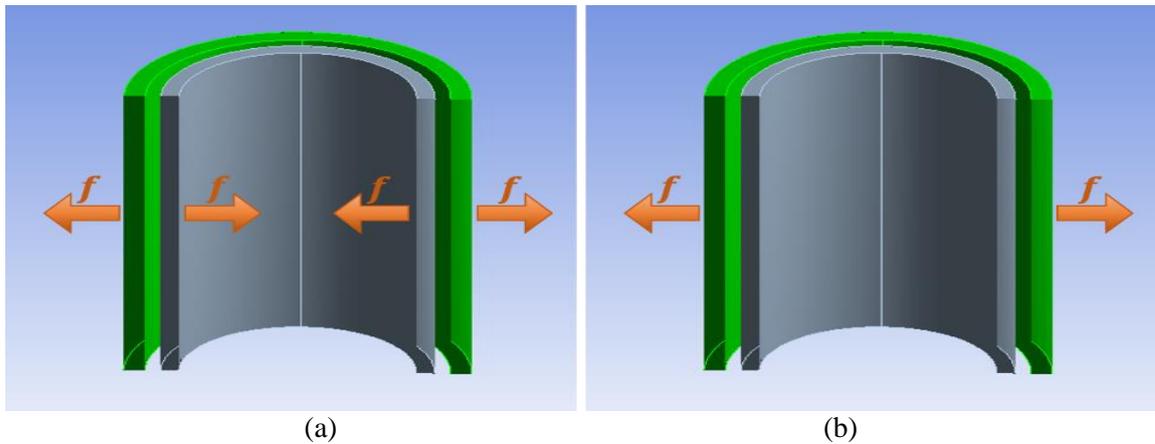
2.4 Grandezas estruturais

Os esforços eletromagnéticos a que um transformador é exposto durante faltas, comutação de transitórios e outros eventos do sistema resultam na imposição de forças magnéticas nos enrolamentos. Se essas forças excederem a capacidade de resistência do transformador, poderá ocorrer deformação dos enrolamentos, já foi comentando anteriormente que essas forças têm componentes axiais e radiais, agora será mosrado os efeitos de cada uma sore os enrolamenos dos transformadores (HASHEMNIA; ABU-SIADA; ISLAM, 2013).

2.4.1 Forças radiais

Segundo Guimarães (2013), as forças radiais produzem diferentes efeitos nos enrolamentos externos e internos de transformadores, dependendo do tipo de energização que a máquina esteja sofrendo. Na Figura 4 ilustram-se as direções opostas entre as forças nos enrolamentos externo e interno. Nota-se, também, que no meio refrigerante entre os enrolamentos há um campo magnético que proporciona a repulsão dos condutores por forças tangenciais direcionadas para a parte externa no condutor externo e para dentro no condutor interno. O enrolamento externo fica sujeito a uma força radial que age para fora e tende a esticar o condutor, produzindo uma tensão mecânica de tração nas espiras (*hoop stress*). Por outro lado, o enrolamento interno experimenta forças radiais similares, porém dirigidas na direção do núcleo e cuja ação é de comprimir ou esmagar as espiras. Este efeito é denominado tensão de compressão (*compressive stress*) (FONSECA, 2016).

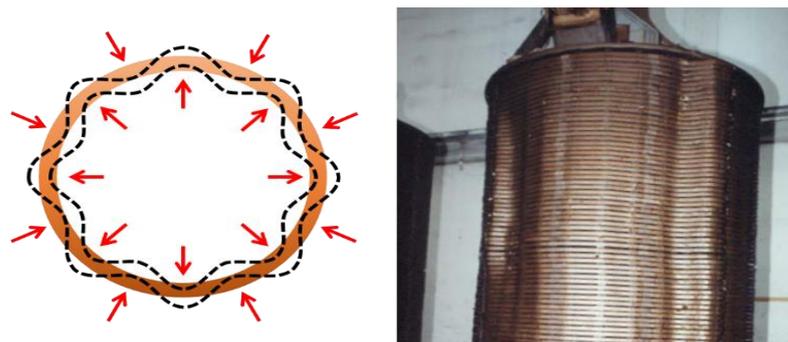
Figura 4– Sentido da força radial nos enrolamentos do transformador (a) corrente nominal e curto-circuito, (b) corrente de *inrush*.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

A ocorrência de deformação radial é mais comum no enrolamento interno e é caracterizada por duas maneiras distintas. Uma delas é chamada de “curvatura forçada” (*forced buckling*), ocorre quando o enrolamento interno está firmemente sustentado por espaçadores. Os espaçadores estão localizados axialmente e a estrutura de suporte, como um todo, tem rigidez mecânica maior que a dos condutores. Neste caso, os condutores podem apresentar uma deformação entre todos os suportes ao longo da circunferência do enrolamento, conforme observa-se na Figura 5 (WATERS, 1966).

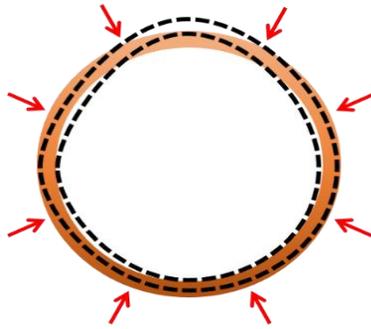
Figura 5– Curvatura forçada causada por forças radiais.



Fonte: Adaptado de Azevedo, 2007. p. 58.

A outra forma de deformação que afeta o enrolamento é chamada “curvatura livre”, (*free buckling*). Para este caso, diferentemente do primeiro, a inclinação dos condutores não está relacionada com os espaçadores axiais, sendo que a resistência mecânica dos condutores é maior do que aquela proporcionada pela estrutura de suporte. Nessa condição, a projeção do condutor pode se dar tanto para dentro quanto para fora, em um ou mais pontos da circunferência, Figura 6 (WATERS, 1966).

Figura 6 – Curvatura livre causada por forças radiais.



Fonte: Adaptado de Liu, 2016. p. 6.

As componentes radiais das forças num transformador com enrolamentos concêntricos podem ser calculadas através de um método analítico clássico (WATERS, 1966). A força radial total atuante sobre um enrolamento de diâmetro D_m e altura h pode ser calculada pela seguinte equação:

$$F_R = \frac{2\pi^2 (n I_{\max})^2 D_m}{h} 10^{-7} \quad (2.17)$$

Sendo F_R a força radial total no enrolamento, n o número de espiras no enrolamento e I_{\max} a corrente que está passando no enrolamento.

A força radial média F_{med} nas duas metades opostas do enrolamento é equivalente à pressão no diâmetro, enquanto a força radial total F_R é equivalente à pressão na circunferência. Assim sendo, a força radial média pode ser determinada pela Equação (2.18).

$$F_{med} = \frac{F_R}{\pi} = \frac{2\pi (n I_{\max})^2 D_m}{h} 10^{-7} \quad (2.18)$$

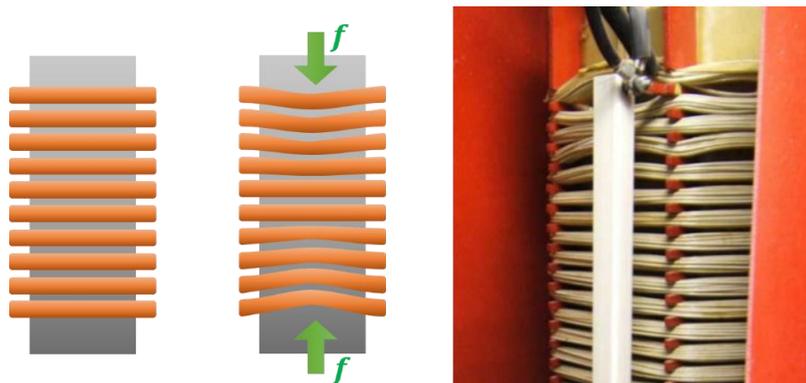
Desta forma, como o enrolamento contém n espiras e seção transversal S , o estresse de tração médio no enrolamento pode ser calculado conforme a Equação (2.19).

$$\sigma_{medio} = \frac{(I_{\max})^2}{h} \frac{n \pi D_m}{S} 10^{-7} \quad (2.19)$$

2.4.2 Forças axiais

A deformação axial é caracterizada conforme ilustrado na Figura 7, sendo apresentada a vista frontal do enrolamento de um transformador de potência antes e após a atuação desta força.

Figura 7 – Ilustração de uma deformação devido ação de forças axiais.

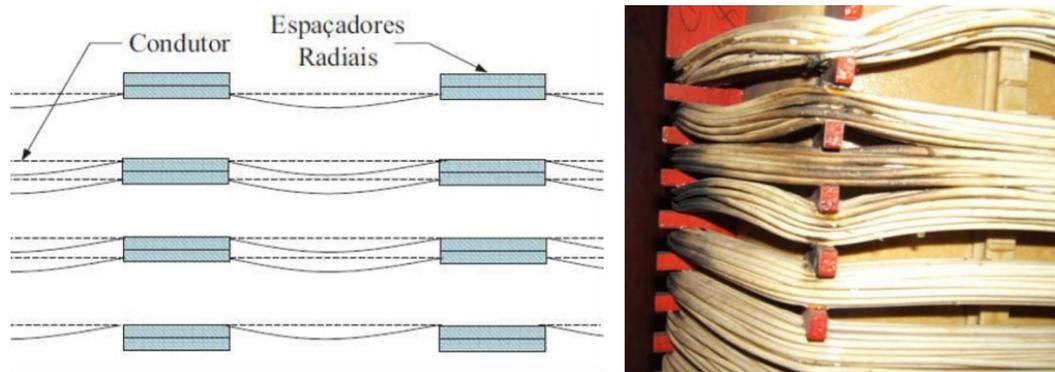


Fonte: Adaptado de Azevedo, 2007, p. 63.

As elevadas amplitudes das forças de compressão axial nas extremidades dos enrolamentos podem ocasionar deformações nas estruturas de fixação na extremidade do enrolamento. Esses elementos de fixação têm por objetivo exercer a pressão efetiva sobre o enrolamento durante o estado normal de operação e sob transitórios, para resistir às forças axiais (GUIMARÃES, 2013).

Dentre os tipos de falhas devido às forças axiais existem dois a serem destacados: flexão entre espaçadores radiais (*bending*) e o tombamento (*tilting*). As falhas denominadas como flexão entre espaçadores radiais (*bending*) caracterizam-se pela curvatura dos condutores entre os espaçadores isolantes localizados radialmente. Essa flexão do condutor, ilustrada na Figura 8, pode, também, resultar em danos à sua isolamento. Portanto, observa-se que a curvatura da deformação ocorre num plano vertical e não horizontal, como ocorre na ação das forças radiais (ROSENTINO JUNIOR, 2010).

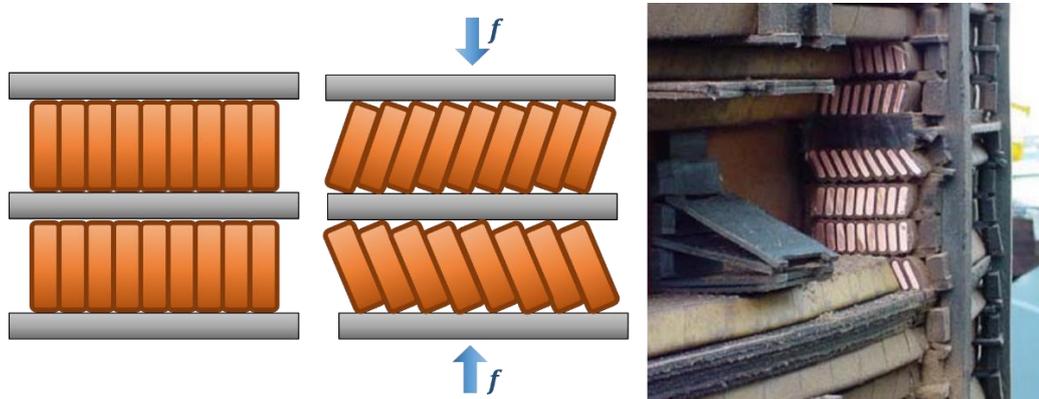
Figura 8 – Flexão dos condutores entre espaçadores radiais.



Fonte: Adaptado de Azevedo, 2007, p. 62.

Por outro lado, no tombamento (*tilting*) as forças são maiores que a carga limite suportável pelos enrolamentos do equipamento e uma falha pode ocorrer, caracterizando-se pela inclinação dos condutores em forma de *zig-zag*. A Figura 9 demonstra os condutores na posição normal e a inclinação dos mesmos deformados devido à ação de forças axiais críticas. Nota-se que, devido à força imposta, ocorre um deslocamento da seção transversal dos condutores em torno do eixo de simetria perpendicular (ROSENTINO JUNIOR, 2010).

Figura 9 – Tombamento devido a forças axiais – seção transversal.



Fonte: Adaptado de Azevedo, 2007, p. 64.

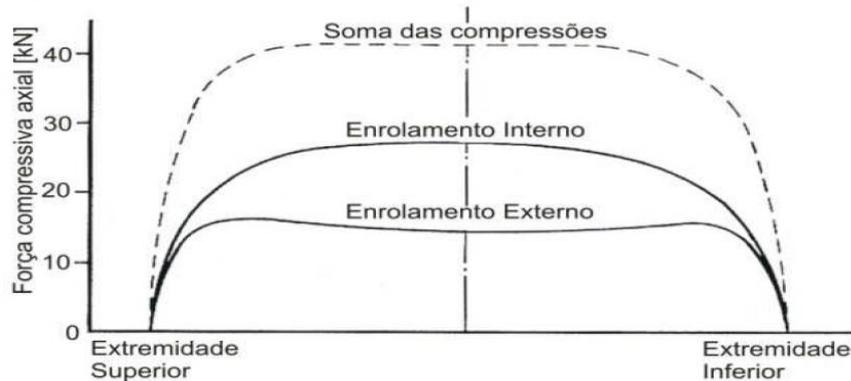
Estas são as principais deformações causadas por falhas devido à interação de forças axiais nos enrolamentos de transformadores de alto porte.

O cálculo analítico das componentes radiais da densidade de fluxo magnético de dispersão em um transformador de potência com enrolamentos concêntricos apresenta grande complexidade e baixa precisão para os cálculos da densidade de dispersão na direção radial. No entanto, existem métodos capazes de fornecer resultados aproximados para enrolamentos que utilizam algumas simplificações. Inicialmente, as forças axiais devem ser apresentadas sob duas condições distintas as quais geram componentes de forças também diferenciadas.

Essas duas situações são denominadas por condição ideal e condição não-ideal (AZEVEDO, 2007).

Em transformadores com distribuição uniforme da força magnetomotriz em bobinas concêntricas, com condição ideal, as forças axiais que ocorrem devido à densidade de fluxo radial produzem campos nas duas extremidades das bobinas e são direcionadas para o ponto médio dos enrolamentos. Essas forças surgem como resultado do fluxo produzido pelos condutores em paralelo no mesmo sentido, embora haja uma grande força por unidade de comprimento nas extremidades dos enrolamentos, a força cumulativa de compressão é maior na metade da altura das bobinas nos enrolamentos exteriores e interiores (para o caso onde não existem espaçadores radiais fixados), conforme a Figura 10 (FONSECA, 2016).

Figura 10 – Curvas de compressão axial para enrolamentos concêntricos.



Fonte: Azevedo, 2007, p. 81.

Para esta condição, ideal a soma de compressão axial pode ser obtida diretamente perto do ponto médio para ambas as bobinas. O resultado final é dado pela equação (2.20) (WATERS, 1966).

$$F_A = \frac{2\pi^2}{10^7} \frac{(nI_{\max})^2 D_m}{h^2} \left[d_0 + \frac{d_1 + d_2}{3} \right] \quad (2.20)$$

Onde d_0 representa os espaços entre os enrolamentos, d_1 e d_2 são as espessuras radiais dos enrolamentos.

Já para a condição não-ideal, as consequências são distintas das anteriores, pois proporcionam um acréscimo significativo na força axial. Nestas circunstâncias, as forças axiais são difíceis de serem calculadas através dos métodos analíticos. Isso ocorre, principalmente, pela dificuldade de se levar em conta a curvatura do enrolamento e a presença

do núcleo ferromagnético, o que é possível desde que se faça o uso de soluções complexas através de métodos computacionais. As condições não ideais contribuem, ainda, para o desbalanceamento dos amperes-espiras dos enrolamentos, assim como o deslocamento axial e o encolhimento axial do papel isolante. Assim sendo, a densidade de fluxo médio no diâmetro do transformador pode ser obtida através da Equação (2.21) (AZEVEDO, 2007).

$$\bar{B}_{Ra} = \frac{4\pi}{10^4} \frac{a(nI_{maz})}{2h_{eff}} \quad (2.21)$$

Tomando h_{eff} como o comprimento efetivo do fluxo radial, a como o comprimento do condutor. Desta forma, a força axial total no enrolamento pode ser determinada pela Equação (2.22).

$$F_A = \frac{2\pi^2}{10^7} \frac{(nI_{maz})^2 D_m}{2h_{eff}^2} \quad (2.22)$$

Portanto, as forças axiais atuantes nos enrolamentos de transformadores de potência podem ser definidas analiticamente possibilitando, análises estruturais mais precisas.

2.5 Análises acopladas

Análises multifísicas podem ser exemplificadas pela interação entre um fluido e uma estrutura. O fluxo do fluido exerce pressão sobre a estrutura, causando sua deformação, o que por sua vez perturba o fluxo original. Efeitos térmicos acoplados a outros fenômenos físicos também são exemplos bastante comuns, tais como o efeito de dilatações e alterações nas propriedades físicas dos materiais em cálculos de tensões ou a geração de calor pelo fluxo de corrente elétrica em um microprocessador, com consequente necessidade de dissipação do mesmo (MENDES, 2016).

O projeto básico de máquinas elétricas e transformadores, em particular o dimensionamento de circuitos magnéticos e elétricos, é realizado principalmente pela aplicação de cálculos analíticos. Os níveis de carga permitidos são definidos com base no projeto do isolamento e no resfriamento da máquina ou do transformador. Normalmente, as dimensões iniciais desses dispositivos são primeiramente selecionadas pela inclusão de

restrições geométricas, elétricas, térmicas e mecânicas predeterminadas. Em seguida, os dispositivos são projetados eletricamente para cobrir os parâmetros operacionais. Em sequência, o resfriamento e, finalmente, a construção mecânica desses dispositivos são calculados. Hoje em dia, em especial com transformadores, bem como em cada vez mais casos de máquinas elétricas, são realizadas investigações acústicas adicionais (SCHMIDT, 2011).

Para a execução de tais projetos com uma maior eficiência é necessário o estudo e análise de todas as etapas que os compõem. No entanto, estas etapas influenciam umas as outras, sendo as simulações multifísicas acopladas formas eficientes de observação das influências sobre as etapas.

Tradicionalmente existem duas formas distintas para a resolução de problemas multifísicos. Na primeira estratégia, denominada de fracamente acoplada, acoplamento sequencial ou separação de operadores (*operator splitting*), cada fenômeno físico é resolvido de maneira independente. Durante a solução de cada fenômeno físico, suas dependências em relação aos demais fenômenos físicos são mantidos constantes. De posse de uma solução, o próximo fenômeno físico é executado, tendo como entrada o resultado da anterior. Após a execução sequencial de todos os fenômenos físicos do problema, o processo é repetido até que a convergência seja alcançada.

Na segunda estratégia, denominada de acoplamento direto ou fortemente acoplada, o conjunto completo de equações discretizadas é resolvido de maneira simultânea através da criação de um único sistema global de equações, materializado em uma grande matriz contendo todos os graus de liberdade do sistema acoplado. Sempre existem discretizações de elementos finitos idênticas e são utilizados os mesmos procedimentos de escalonamento de tempo com todos os domínios físicos envolvidos. Assim, a melhor convergência possível é obtida utilizando fenômenos físicos fortemente acoplados, por outro lado a utilização dessa forma de acoplamento apresenta um alto custo computacional (SCHMIDT, 2011).

2.5.1 Eletromagnético-térmico

No transformador de potência, os problemas térmicos e eletromagnéticos possuem dependência, já que os parâmetros elétricos dependem da temperatura de trabalho do material e a temperatura depende dos valores de perdas elétricas no equipamento (SILVA, 2015).

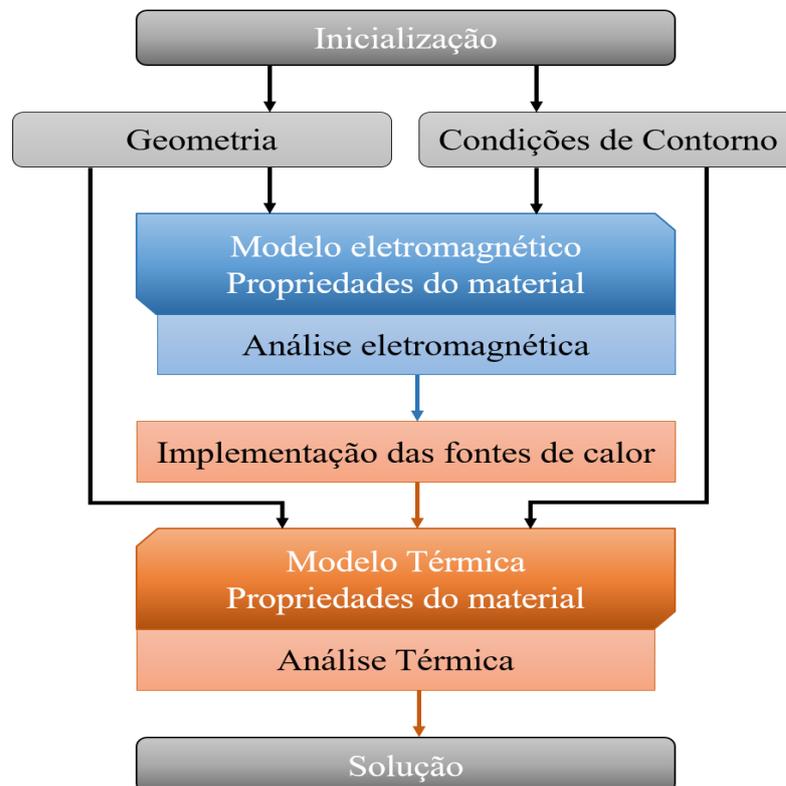
Com um problema eletromagnético-térmico acoplado, as fontes de calor de natureza eletromagnética, como a corrente parasita, a energia e as perdas de ferro, resultam em termos

de acoplamento das equações térmicas. Os dados do material são muitas vezes fortemente dependentes da temperatura. Assim, eles precisam ser atualizados durante o processo de solução acoplada (SCHMIDT, 2011).

No caso de vibração de alta frequência, o efeito termoelástico pode desempenhar um papel relevante. Certamente, o efeito Joule é dominante no caso de um elevado fluxo de corrente parasita através da estrutura. Tensões térmicas podem ser aplicadas pelo ambiente ao redor da estrutura como condições de contorno em análises acopladas (BRUSA; PASQUALE; SOMA, 2013).

No início deste capítulo demonstrou-se a sequência base para a execução de simulações computacionais (Figura 1), assim como as possíveis interações entre diversos domínios físicos (Figura 2). A Figura 11 ilustra a estrutura para efetuar o acoplamento entre as análises eletromagnética e térmica. Tendo em vista que o princípio de funcionamento dos transformadores é eletromagnético e que devido ao efeito joule ocorre um aquecimento no equipamento, esta estrutura de análise acoplada possibilita o estudo do aquecimento do equipamento considerando como parâmetros iniciais a corrente que por ele circula.

Figura 11 – Processos de solução da análise acoplada eletromagnético-térmico.



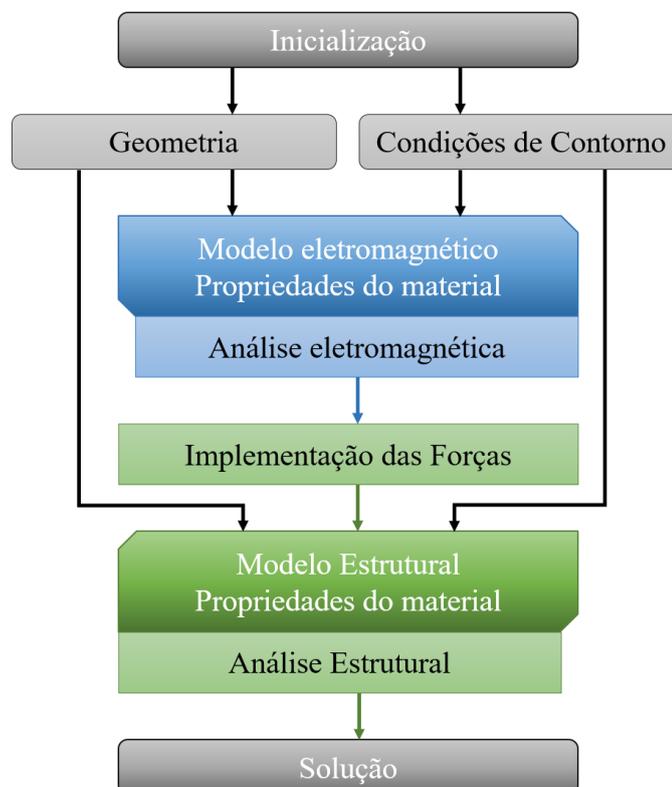
Fonte: Adaptado de Schmidt, 2011, p. 9.

2.5.2 Eletromagnético-estrutural

Com um problema eletromagnético-estrutural acoplado, forças locais e globais e torques de origem eletromagnética resultam em termos de acoplamento com equações mecânicas. Os dados do material podem ser afetados por deformações ou situações de transições entre peças geralmente fixas e ocasionalmente soltas. O impacto mais importante no processo de solução acoplada surge agora das geometrias alteradas ou mesmo distorcidas (SCHMIDT, 2011).

A Figura 12 ilustra a estrutura para efetuar o acoplamento entre as análises eletromagnética e estrutural. Sabendo-se que o princípio de funcionamento dos transformadores é eletromagnético e que durante seu funcionamento são geradas forças magnéticas, esta estrutura de análise acoplada possibilita o estudo da distorção que essas forças podem causar nos enrolamentos considerando como parâmetros iniciais a corrente que circula por ele.

Figura 12– Processos de solução da análise acoplada eletromagnético-estrutural.



Fonte: Adaptado de Schmidt, 2011, p. 9.

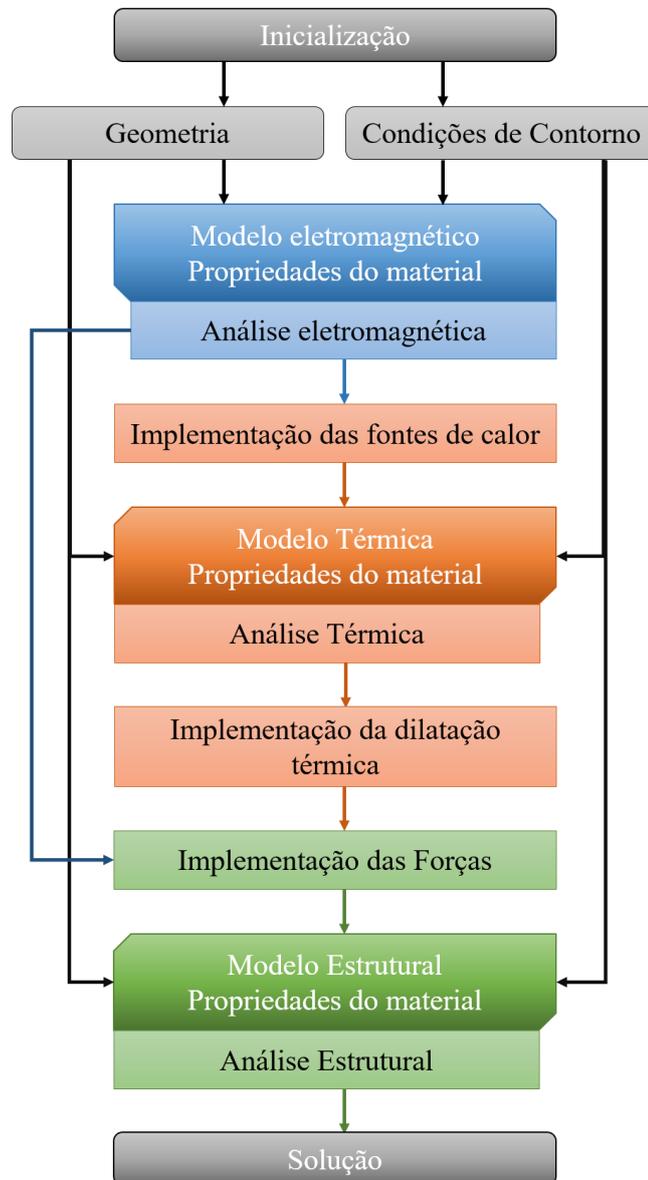
2.5.3 Eletromagnético-térmico-estrutural

O acoplamento dos três domínios físicos – eletromagnético, térmico e estrutural – é a principal contribuição deste trabalho, uma vez que, ao conectar estes domínios em uma mesma simulação, é possível implementar automaticamente parâmetros específicos que surgem quando ocorre a junção de dois ou mais domínios em uma mesma análise, além de possibilitar simulações mais próximas do funcionamento real dos equipamentos.

Consequentemente, um objetivo primordial para estudar essas metodologias é derivar modelos de simulação abrangentes e multifísicas que possam ser facilmente incorporados às ferramentas de projeto usadas pelos profissionais de engenharia (SCHMIDT, 2011).

Ao observar a Figura 13 nota-se que as fontes de calor são resultados gerados na simulação eletromagnética e, ao mesmo tempo, são parâmetros de entrada para a simulação térmica, desta forma as fontes de calor são parâmetros que podem ser implementados diretamente nesta estrutura de simulações acopladas. O mesmo ocorre com as forças magnéticas geradas na simulação eletromagnética que servem como parâmetro de entrada para a simulação estrutural, e a dilatação térmica que é uma solução da simulação térmica e serve como parâmetro de entrada para a simulação estrutural. A Figura 13 ilustra a estrutura de acoplamento proposta neste trabalho.

Figura 13 – Processos de solução da análise acoplada eletromagnético-térmico-estrutural.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Esta metodologia possui um acoplamento fraco uma vez que as simulações são realizadas uma por vez, entretanto todo o processo é conectado para funcionar de maneira automática. Assim, ao final de um processo os resultados obtidos são inseridos automaticamente como parâmetros de entrada para o passo seguinte até alcançar o resultado final.

2.6 Considerações finais

Transformadores de potência são exemplos primordiais de sistemas multifísicos envolvendo eletromagnetismo, questões térmicas, dinâmica de fluidos, mecânica estrutural e

fenômenos acústicos. Simulações computacionais, através do método de elementos finitos, são os mais poderosos métodos de análise para tais dispositivos, uma vez que as otimizações em relação ao desempenho geral, e também ao custo total de fabricação, tornam-se mais precisos. A utilização de análises multifísicas acopladas é de crescente interesse por parte dos fabricantes desses equipamentos, por possibilitarem o desenvolvimento de dispositivos mais eficientes, em alguns casos com um menor custo de produção (SCHMIDT, 2011).

Desta forma, neste capítulo evidenciou-se a estrutura base para desenvolver simulações computacionais, assim como os diversos domínios físicos nos quais estas simulações podem ser aplicadas. Como neste trabalho serão abordados somente fenômenos eletromagnéticos, térmicos e estruturais, foram demonstrados os principais parâmetros e equacionamentos a serem considerados na modelagem desses respectivos fenômenos na análise de transformadores de potência.

Foram discutidas, ainda, possíveis metodologias que possibilitam o acoplamento de vários domínios físicos em uma mesma análise, assim como suas contribuições para os fabricantes de transformadores de potência.

3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

3.1 Considerações iniciais

O Método de Elementos Finitos (MEF) surgiu durante a década de 50 para uma aplicação aeronáutica e sua teoria e técnica foram estabelecidas e aprimoradas nos anos 60, fazendo com que praticamente toda a bibliografia fosse, na época, baseada em problemas de mecânica. Entretanto, somente a partir dos anos 70 o MEF passou a ser empregado diretamente em eletromagnetismo de forma ampla (BASTOS, 2004).

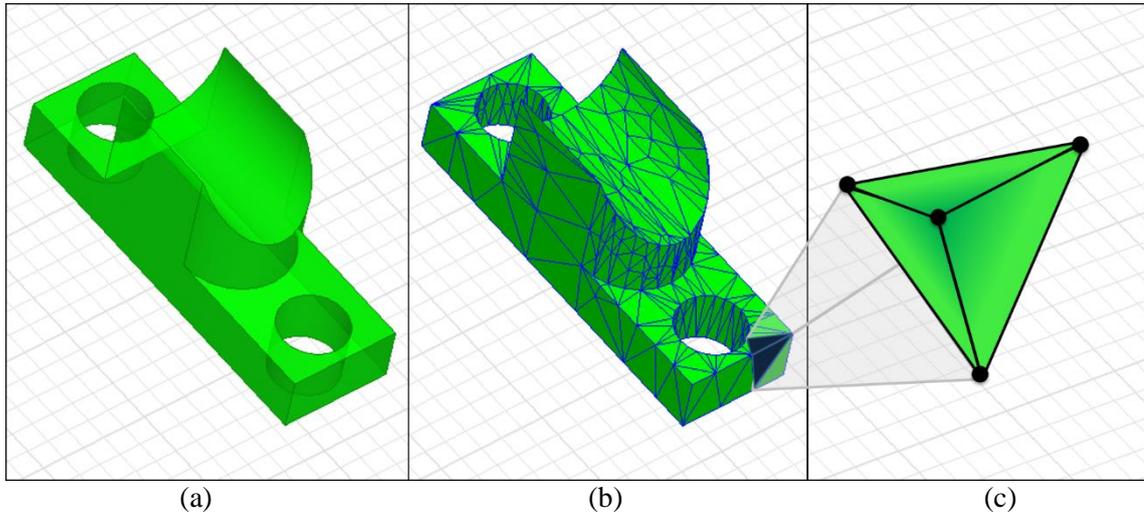
Os métodos de determinação de campo utilizados, até então na década de 1970, não eram completamente satisfatórios, sobretudo quando a estrutura a ser estudada apresentava uma geometria muito complexa, tornando-se necessária a elaboração de metodologias mais eficientes (BASTOS, 1996). O uso do MEF se deve, principalmente, à sua grande versatilidade, à qualidade dos resultados e à relativa facilidade na implementação computacional (LIRA, 2002).

Nesse contexto, neste capítulo será demonstrada a modelagem matemática do MEF com foco no equacionamento do tetraédrico, que é um dos elementos mais utilizados para modelar estruturas em 3D.

3.2 Elemento tetraédrico

O método de elementos finitos baseia-se na obtenção de uma formulação que permite a análise de sistemas complexos e/ou geometricamente irregulares, por intermédio da discretização dos meios em estudo e implementação destes em programas computacionais. Para atingir tal objetivo, o método considera o sistema global como sendo equivalente a um agrupamento de elementos finitos, em que cada um destes é uma estrutura contínua mais simples (FONSECA, 2016). A Figura 14 ilustra a construção geométrica básica do MEF em problemas tridimensionais.

Figura 14 – Definição básica do MEF, (a) problema de geometria complexa, (b) discretização do problema, (c) geometria simples (tetraédrico).

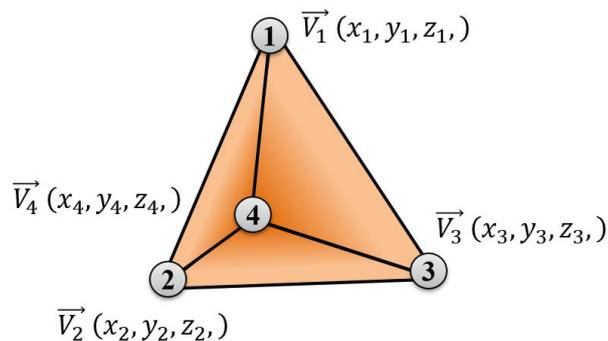


Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

O tetraedro é um sólido geométrico tridimensional formado por quatro planos com formato triangular (de maneira simples, este elemento é uma pirâmide de base triangular) que se conectam por quatro nós. Por se tratar de um sólido tridimensional, torna-se necessário incorporar seu volume na modelagem. Assim como os elementos lineares e triangulares, o tetraedro pode ser aplicado em grande quantidade de problemas, uma vez que sua utilização possibilita maior precisão em problemas envolvendo geometrias tridimensionais complexas.

A Figura 15 apresenta a numeração adotada para os nós e as faces do tetraedro. As funções de forma adotadas são as mesmas que representam as coordenadas adimensionais também chamadas de coordenadas naturais. Elas são utilizadas para aproximar tanto as dimensões da malha como os potenciais, o que significa que os elementos desenvolvidos são isoparamétricos (TORRES, 2003).

Figura 15– Elemento tetraédrico.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Para iniciar a análise é necessário determinar o volume do tetraédrico (V_T), que pode ser definido a partir da Equação (3.1).

$$V_T = \frac{1}{6} \det \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Tomando:

$$x_{ij} = x_i - x_j; \quad y_{ij} = y_i - y_j; \quad z_{ij} = z_i - z_j; \quad i, j = 1, \dots, 4 \quad (3.2)$$

Desta forma, o volume do tetraedro pode ser definido pela Equação (3.3), em função das coordenadas cartesianas dos nós:

$$V_T = x_{21}(y_{23} z_{34} - y_{34} z_{23}) + x_{32}(y_{34} z_{12} - y_{12} z_{34}) + x_{43}(y_{12} z_{23} - y_{23} z_{12}) \quad (3.3)$$

Inicialmente serão adotadas funções de forma para um único tetraedro. Para utilizar o método de resíduos ponderados, as funções de forma devem ser contínuas sobre a transição de um elemento para o seu elemento vizinho.

Assumido que a discretização é levada a cabo com funções de forma linear, os quatro vértices utilizados são os quatro nós da rede sobre o elemento. Isto significa que as funções de forma devem depender do x , y , e z coordenadas de forma linear, de modo que pode ser expressa pela seguinte equação (HOLLAUER, 2007):

$$N_i(x, y, z) = a_i + b_i x + c_i y + d_i z \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (3.4)$$

Uma vez que para cada nó da rede é necessária uma função de forma separada, há quatro funções de forma em um elemento de quatro nós. Os coeficientes a_i , b_i , c_i e d_i são determinados a partir de um conjunto de quatro equações para cada nó.

Para a resolução das variáveis a_i , b_i , c_i e d_i será aplicada a regra de Cramer em uma matriz quadrada de ordem quatro, em que o sinal do resultado varia de acordo com o cofator selecionado $(-1^{(i+j)})$, no qual i e j correspondem aos coeficientes de linha e coluna do cofator selecionado. Em seguida, o sistema será reescrito em uma única equação para cada nó.

Tomando uma matriz D correspondente ao elemento, onde:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Desta forma, para o nó 1 tem-se:

$$\begin{aligned} a_1 + b_1 x_1 + c_1 y_1 + d_1 z_1 &= 1 \\ a_1 + b_1 x_2 + c_1 y_2 + d_1 z_2 &= 0 \\ a_1 + b_1 x_3 + c_1 y_3 + d_1 z_3 &= 0 \\ a_1 + b_1 x_4 + c_1 y_4 + d_1 z_4 &= 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Onde:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{\text{Det}(D)} \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} & b_1 &= \frac{-1}{\text{Det}(D)} \begin{bmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \\ c_1 &= \frac{1}{\text{Det}(D)} \begin{bmatrix} 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{bmatrix} & d_1 &= \frac{-1}{\text{Det}(D)} \begin{bmatrix} 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Assim,

$$N_1(x, y, z) = \alpha_1 + \beta_1 x_1 + \delta_1 y_1 + \lambda_1 z_1 \quad (3.8)$$

Onde:

$$\begin{aligned}
\alpha_1 &= \left[\frac{x_2(y_3 z_4 - y_4 z_3) + x_3(y_4 z_2 - y_2 z_4) + x_4(y_2 z_3 - y_3 z_2)}{\text{Det}(D)} \right] \\
\beta_1 &= \left[\frac{(y_2 z_3 - y_2 z_4) + (y_3 z_4 - y_3 z_2) + (y_4 z_2 - y_4 z_3)}{\text{Det}(D)} \right] \\
\delta_1 &= \left[\frac{(x_2 z_3 - x_2 z_4) + (x_3 z_4 - x_3 z_2) + (x_4 z_2 - x_4 z_3)}{\text{Det}(D)} \right] \\
\lambda_1 &= \left[\frac{(x_2 y_3 - x_2 y_4) + (x_3 y_4 - x_3 y_2) + (x_4 y_2 - x_4 y_3)}{\text{Det}(D)} \right]
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Logo, para o nó 2 tem-se:

$$\begin{aligned}
a_2 + b_2 x_1 + c_2 y_1 + d_2 z_1 &= 0 \\
a_2 + b_2 x_2 + c_2 y_2 + d_2 z_2 &= 1 \\
a_2 + b_2 x_3 + c_2 y_3 + d_2 z_3 &= 0 \\
a_2 + b_2 x_4 + c_2 y_4 + d_2 z_4 &= 0
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Onde:

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{-1}{\text{Det}(D)} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} & b_1 &= \frac{1}{\text{Det}(D)} \begin{bmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \\
c_1 &= \frac{-1}{\text{Det}(D)} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{bmatrix} & d_1 &= \frac{1}{\text{Det}(D)} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Assim:

$$N_2(x, y, z) = \alpha_2 + \beta_2 x_2 + \delta_2 y_2 + \lambda_2 z_2 \tag{3.12}$$

Onde:

$$\begin{aligned}
\alpha_2 &= \left[\frac{x_1(y_3 z_4 - y_4 z_3) + x_3(y_4 z_1 - y_1 z_4) + x_4(y_1 z_3 - y_3 z_1)}{\text{Det}(D)} \right] \\
\beta_2 &= \left[\frac{(y_1 z_3 - y_1 z_4) + (y_3 z_4 - y_3 z_1) + (y_4 z_1 - y_4 z_3)}{\text{Det}(D)} \right] \\
\delta_2 &= \left[\frac{(x_1 z_3 - x_1 z_4) + (x_3 z_4 - x_3 z_1) + (x_4 z_1 - x_4 z_3)}{\text{Det}(D)} \right] \\
\lambda_2 &= \left[\frac{(x_1 y_3 - x_1 y_4) + (x_3 y_4 - x_3 y_1) + (x_4 y_1 - x_4 y_3)}{\text{Det}(D)} \right]
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Para o nó 3 tem-se:

$$\begin{aligned}
a_3 + b_3 x_1 + c_3 y_1 + d_3 z_1 &= 0 \\
a_3 + b_3 x_2 + c_3 y_2 + d_3 z_2 &= 0 \\
a_3 + b_3 x_3 + c_3 y_3 + d_3 z_3 &= 1 \\
a_3 + b_3 x_4 + c_3 y_4 + d_3 z_4 &= 0
\end{aligned} \tag{3.14}$$

Onde:

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{1}{\text{Det}(D)} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} & b_1 &= \frac{-1}{\text{Det}(D)} \begin{bmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \\
c_1 &= \frac{1}{\text{Det}(D)} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{bmatrix} & d_1 &= \frac{-1}{\text{Det}(D)} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.15}$$

Assim:

$$N_3(x, y, z) = \alpha_3 + \beta_3 x_3 + \delta_3 y_3 + \lambda_3 z_3 \tag{3.16}$$

Onde:

$$\begin{aligned}
\alpha_3 &= \left[\frac{x_1(y_2 z_4 - y_4 z_2) + x_2(y_4 z_1 - y_1 z_4) + x_4(y_1 z_2 - y_2 z_1)}{\text{Det}(D)} \right] \\
\beta_3 &= \left[\frac{(y_1 z_2 - y_1 z_4) + (y_2 z_4 - y_2 z_1) + (y_4 z_1 - y_4 z_2)}{\text{Det}(D)} \right] \\
\delta_3 &= \left[\frac{(x_1 z_2 - x_1 z_4) + (x_2 z_4 - x_2 z_1) + (x_4 z_1 - x_4 z_2)}{\text{Det}(D)} \right] \\
\lambda_3 &= \left[\frac{(x_1 y_2 - x_1 y_4) + (x_2 y_4 - x_2 y_1) + (x_4 y_1 - x_4 y_2)}{\text{Det}(D)} \right]
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Da mesma forma, para o nó 4 tem-se:

$$\begin{aligned}
a_4 + b_4 x_1 + c_4 y_1 + d_4 z_1 &= 0 \\
a_4 + b_4 x_2 + c_4 y_2 + d_4 z_2 &= 0 \\
a_4 + b_4 x_3 + c_4 y_3 + d_4 z_3 &= 0 \\
a_4 + b_4 x_4 + c_4 y_4 + d_4 z_4 &= 1
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Onde:

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{-1}{\text{Det}(D)} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix} & b_1 &= \frac{1}{\text{Det}(D)} \begin{bmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{bmatrix} \\
c_1 &= \frac{-1}{\text{Det}(D)} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \end{bmatrix} & d_1 &= \frac{1}{\text{Det}(D)} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Assim,

$$N_4(x, y, z) = \alpha_4 + \beta_4 x_4 + \delta_4 y_4 + \lambda_4 z_4 \tag{3.20}$$

Onde:

$$\begin{aligned}
\alpha_4 &= \left[\frac{x_1(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_2(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_2 - y_2 z_1)}{\text{Det}(D)} \right] \\
\beta_4 &= \left[\frac{(y_1 z_2 - y_1 z_3) + (y_2 z_3 - y_2 z_1) + (y_3 z_1 - y_3 z_2)}{\text{Det}(D)} \right] \\
\delta_4 &= \left[\frac{(x_1 z_2 - x_1 z_3) + (x_2 z_3 - x_2 z_1) + (x_3 z_1 - x_3 z_2)}{\text{Det}(D)} \right] \\
\lambda_4 &= \left[\frac{(x_1 y_2 - x_1 y_3) + (x_2 y_3 - x_2 y_1) + (x_3 y_1 - x_3 y_2)}{\text{Det}(D)} \right]
\end{aligned} \tag{3.21}$$

Para uma transformação que envolva uma malha com vários elementos tetraédricos é necessária a utilização de funções de integração envolvendo as funções, conforme demonstrado na Equação (3.22) (TORRES, 2003).

$$I_e = \int_t N_i(x, y, z) N_j(x, y, z) dx dy dz \quad i, j = 1, 2, 3, 4 \tag{3.22}$$

3.3 Método de Galerkin

Segundo Alves (2007), o método de Galerkin 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 MEF, que introduziu uma forma engenhosa de construção de funções de aproximação.

Bastos (2008) afirma que o método residual de Galerkin é atualmente o mais empregado para estabelecimento de técnicas numéricas baseadas no MEF. O método residual parte do princípio de que a solução numérica não é exata e que sua aplicação na equação que rege os fenômenos físicos pode gerar um certo erro, ou resíduo R , que será tão mais próximo de zero quanto mais exato for o cálculo.

O princípio do método baseia-se na minimização deste resíduo gerado. Considerando $[K]\{F\} = \{C\}$ uma fusão matricial dependendo do vetor $\{F\}$, para solução exata da função $[K]$ temos:

$$[K]\{F_a\} = \{C_a\} \tag{3.23}$$

Já para uma solução aproximada da função em estudo, temos o seguinte resultado:

$$[K]\{F_b\} = \{C_b\} \quad (3.24)$$

Onde R é o resíduo gerado pela diferença entre a solução exata e a solução obtida por aproximação, logo.

$$R = \{C_a\} - \{C_b\} \quad (3.25)$$

Para estabelecer um procedimento numérico, o resíduo R é forçado a tender a zero, utilizando a operação mostrada na Equação (3.4), onde W é uma função de ponderação e D é o domínio do problema, é possível estabelecer esta relação (BASTOS, 1996).

$$\iiint_D W R dD = 0 \quad (3.26)$$

De acordo com Georgilakis (2009), os problemas magnetostáticos de regiões são discretizados por elementos triangulares que possuem três nós. Porém, neste trabalho, serão demonstradas equações para o elemento tetraédrico de 4 nós, que é um dos elementos mais utilizados em problemas 3D.

3.4 Modelagem matemática

Cada ponto (x, y, z) do elemento tetraédrico no sistema de coordenadas global pode ser transformado num ponto correspondente (ξ, η, ω) no sistema de coordenadas local com a seguinte regra:

$$\begin{aligned} x &= x_1 + (x_2 - x_1)\xi + (x_3 - x_1)\eta + (x_4 - x_1)\omega \\ y &= y_1 + (y_2 - y_1)\xi + (y_3 - y_1)\eta + (y_4 - y_1)\omega \\ z &= z_1 + (z_2 - z_1)\xi + (z_3 - z_1)\eta + (z_4 - z_1)\omega \end{aligned} \quad (3.27)$$

De forma semelhante aos elementos anteriores, o elemento tetraedro consiste em uma variação do MEF destinada à análise de volumes, possibilitando a discretização de problemas tridimensionais em elementos de geometria simples. É perceptível que o elemento tetraedro é constituído por quatro elementos triangulares. Como o referido elemento é construído a partir de quatro nós, para sua dedução e transformação de coordenadas são necessárias quatro funções de forma, como ilustra a Figura 16. As funções de forma serão:

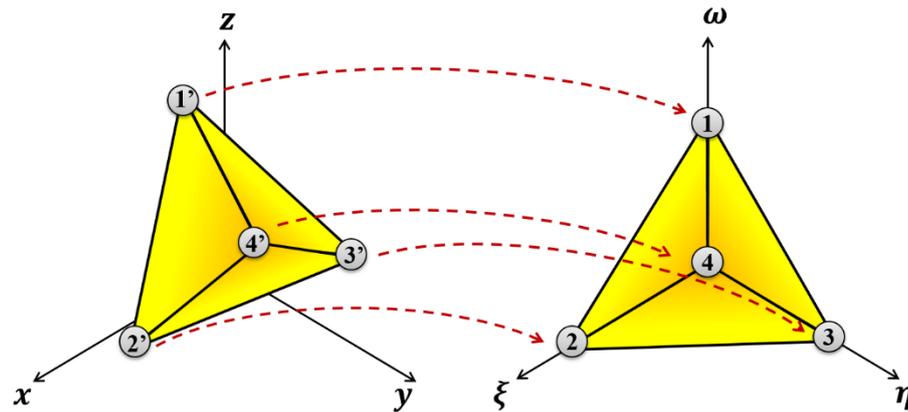
$$N_1(\xi, \eta, \omega) = \xi \quad (3.28)$$

$$N_2(\xi, \eta, \omega) = \eta \quad (3.29)$$

$$N_3(\xi, \eta, \omega) = \omega \quad (3.30)$$

$$N_4(\xi, \eta, \omega) = 1 - \xi - \eta - \omega \quad (3.31)$$

Figura 16– Transformação de coordenadas, de global para local, em 3D.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Onde:

$$\begin{aligned} 1' = (x_1, y_1, z_1) &\leftrightarrow 1 = (\xi_1, \eta_1, \omega_1) & 2' = (x_2, y_2, z_2) &\leftrightarrow 2 = (\xi_2, \eta_2, \omega_2) \\ 3' = (x_3, y_3, z_3) &\leftrightarrow 3 = (\xi_3, \eta_3, \omega_3) & 4' = (x_4, y_4, z_4) &\leftrightarrow 4 = (\xi_4, \eta_4, \omega_4) \end{aligned} \quad (3.32)$$

Semelhante à análise do elemento triangular presente na literatura, para a solução dos cálculos torna-se necessário solucionar o jacobiano aplicado a uma análise tridimensional, logo:

$$J = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & x_3 - x_1 & x_4 - x_1 \\ y_2 - y_1 & y_3 - y_1 & y_4 - y_1 \\ z_2 - z_1 & z_3 - z_1 & z_4 - z_1 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Desta forma:

$$I_e = \text{Det}(J) \int_{T_n} N_i^n(\xi, \eta, \omega) N_j^n(\xi, \eta, \omega) d\xi d\eta d\omega \quad i, j = 1, 2, 3, 4 \quad (3.34)$$

Adotando a relação descrita na Equação (3.34):

$$\frac{\partial(\xi, \eta, \omega)}{\partial(x, y, z)} = Det(J) \quad (3.35)$$

De maneira sucinta, o mapeamento para a transformação de coordenadas é obtido através da análise das diferenciações correspondentes entre as coordenadas (x, y, z) . Desta forma, tem-se inicialmente com relação à variável x :

$$\begin{aligned} 1 &= (x_2 - x_1) \frac{\partial \xi}{\partial x} + (x_3 - x_1) \frac{\partial \eta}{\partial x} + (x_4 - x_1) \frac{\partial \omega}{\partial x} \\ 0 &= (y_2 - y_1) \frac{\partial \xi}{\partial x} + (y_3 - y_1) \frac{\partial \eta}{\partial x} + (y_4 - y_1) \frac{\partial \omega}{\partial x} \\ 0 &= (z_2 - z_1) \frac{\partial \xi}{\partial x} + (z_3 - z_1) \frac{\partial \eta}{\partial x} + (z_4 - z_1) \frac{\partial \omega}{\partial x} \end{aligned} \quad (3.36)$$

Com relação à variável y :

$$\begin{aligned} 0 &= (x_2 - x_1) \frac{\partial \xi}{\partial y} + (x_3 - x_1) \frac{\partial \eta}{\partial y} + (x_4 - x_1) \frac{\partial \omega}{\partial y} \\ 1 &= (y_2 - y_1) \frac{\partial \xi}{\partial y} + (y_3 - y_1) \frac{\partial \eta}{\partial y} + (y_4 - y_1) \frac{\partial \omega}{\partial y} \\ 0 &= (z_2 - z_1) \frac{\partial \xi}{\partial y} + (z_3 - z_1) \frac{\partial \eta}{\partial y} + (z_4 - z_1) \frac{\partial \omega}{\partial y} \end{aligned} \quad (3.37)$$

Com relação à variável z :

$$\begin{aligned} 0 &= (x_2 - x_1) \frac{\partial \xi}{\partial z} + (x_3 - x_1) \frac{\partial \eta}{\partial z} + (x_4 - x_1) \frac{\partial \omega}{\partial z} \\ 0 &= (y_2 - y_1) \frac{\partial \xi}{\partial z} + (y_3 - y_1) \frac{\partial \eta}{\partial z} + (y_4 - y_1) \frac{\partial \omega}{\partial z} \\ 1 &= (z_2 - z_1) \frac{\partial \xi}{\partial z} + (z_3 - z_1) \frac{\partial \eta}{\partial z} + (z_4 - z_1) \frac{\partial \omega}{\partial z} \end{aligned} \quad (3.38)$$

Estas derivadas podem também ser expressas na forma de uma matriz:

$$I = J \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial x} & \frac{\partial \xi}{\partial y} & \frac{\partial \xi}{\partial z} \\ \frac{\partial \eta}{\partial x} & \frac{\partial \eta}{\partial y} & \frac{\partial \eta}{\partial z} \\ \frac{\partial \omega}{\partial x} & \frac{\partial \omega}{\partial y} & \frac{\partial \omega}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & x_3 - x_1 & x_4 - x_1 \\ y_2 - y_1 & y_3 - y_1 & y_4 - y_1 \\ z_2 - z_1 & z_3 - z_1 & z_4 - z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial x} & \frac{\partial \xi}{\partial y} & \frac{\partial \xi}{\partial z} \\ \frac{\partial \eta}{\partial x} & \frac{\partial \eta}{\partial y} & \frac{\partial \eta}{\partial z} \\ \frac{\partial \omega}{\partial x} & \frac{\partial \omega}{\partial y} & \frac{\partial \omega}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Logo:

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial x} & \frac{\partial \xi}{\partial y} & \frac{\partial \xi}{\partial z} \\ \frac{\partial \eta}{\partial x} & \frac{\partial \eta}{\partial y} & \frac{\partial \eta}{\partial z} \\ \frac{\partial \omega}{\partial x} & \frac{\partial \omega}{\partial y} & \frac{\partial \omega}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

O inverso da matriz Jacobiana no sistema de coordenadas globais é dada por:

$$J^{-1} = \frac{1}{\text{Det}(J)} \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Onde:

$$\begin{aligned} L_{11} &= -[(y_4 - y_1) \cdot (z_3 - z_1)] + [(y_3 - y_1) \cdot (z_4 - z_1)] \\ L_{12} &= [(x_4 - x_1) \cdot (z_3 - z_1)] - [(x_3 - x_1) \cdot (z_4 - z_1)] \\ L_{13} &= -[(x_4 - x_1) \cdot (y_3 - y_1)] + [(x_3 - x_1) \cdot (y_4 - y_1)] \\ L_{21} &= [(y_4 - y_1) \cdot (z_2 - z_1)] - [(y_2 - y_1) \cdot (z_4 - z_1)] \\ L_{22} &= -[(x_4 - x_1) \cdot (z_2 - z_1)] + [(x_2 - x_1) \cdot (z_4 - z_1)] \\ L_{23} &= [(x_4 - x_1) \cdot (y_2 - y_1)] - [(x_2 - x_1) \cdot (y_4 - y_1)] \\ L_{31} &= -[(y_3 - y_1) \cdot (z_2 - z_1)] + [(y_2 - y_1) \cdot (z_3 - z_1)] \\ L_{32} &= [(x_2 - x_1) \cdot (z_2 - z_1)] - [(x_2 - x_1) \cdot (y_4 - y_1)] \\ L_{33} &= -[(x_3 - x_1) \cdot (y_2 - y_1)] + [(x_2 - x_1) \cdot (y_3 - y_1)] \end{aligned} \quad (3.42)$$

As demais construções matemáticas deste elemento são semelhantes as do elemento triangular presente na literatura atual.

3.5 Considerações finais

O referido capítulo definiu a construção matemática do MEF tendo como foco principal a modelagem do elemento tetraédrico, configurando as respectivas mudanças de coordenadas, de local para global. Assim como o método de Galerkin utilizado, baseado em análises matriciais para a minimização dos resíduos gerados a partir da diferença entre as soluções real e aproximada.

Métodos numéricos como o MEF, tornaram-se ferramentas indispensáveis tanto na manutenção como no desenvolvimento de equipamentos, uma vez que a robustez destes e de outros métodos de análises pode ser aplicada em grande variedade de eventos e possibilita prever e solucionar eventuais falhas.

4 TRANSFORMADORES E TRANSITÓRIOS

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo será realizada uma abordagem sobre as principais características do transformador de potência, destacando seus principais componentes e seu princípio de funcionamento. Serão comentados, ainda, os principais transitórios estudados neste trabalho, como as correntes de curto-circuito e as correntes de *inrush*, destacando o equacionamento para calcular essas respectivas correntes.

As exigências técnicas e econômicas impõem a construção de grandes usinas elétricas, em geral situadas distantes dos centros de consumo, pois, em maioria, as usinas utilizam a energia hidráulica de lagos e rios, surgindo a necessidade do transporte de energia elétrica dos centros geradores para os centros consumidores por meio de linhas de transmissão de comprimento muito elevado (MARTIGNONI, 1987).

Entretanto, as linhas de transmissão operam em elevados níveis de tensão que em sua totalidade são diferentes dos níveis de tensão dos centros geradores que, por sua vez, também são diferentes dos níveis dos centros consumidores. Para contornar esta dificuldade torna-se necessária a utilização de transformadores – máquinas de construção simples e rendimento elevado que possibilitam a transformação da tensão da rede elétrica para os níveis desejados (MARTIGNONI, 1987).

Os transformadores de potência são dispositivos essenciais aos sistemas elétricos de potência e também um dos equipamentos de maior custo para o sistema. Quando apresentam algum tipo de falha, seu reparo demanda altíssimos custos financeiros, além de ocasionar dificuldades no atendimento às cargas do setor produtivo nacional que, por sua vez, influenciam no desempenho econômico do país como um todo (SARAIVA, 2011).

Entretanto, estes dispositivos estão constantemente sujeitos aos fenômenos que ocasionam falhas no seu bom funcionamento, entre estes fenômenos destacam-se os transitórios. Resumidamente, em relação às falhas, sabe-se que os transformadores de potência geralmente são projetados e construídos de modo a suportar vários tipos de estresse, a exemplo: estresse térmico associado principalmente às sobrecargas; estresse dielétrico vinculado às sobretensões originadas nos sistemas elétricos de potência, entre outros. Além de fatores ambientais, tais como: umidade, contaminação, acidez, ambientes corrosivos, etc. Que interferem e podem reduzir a vida útil do transformador (GUIMARÃES, 2013).

4.2 Transformadores

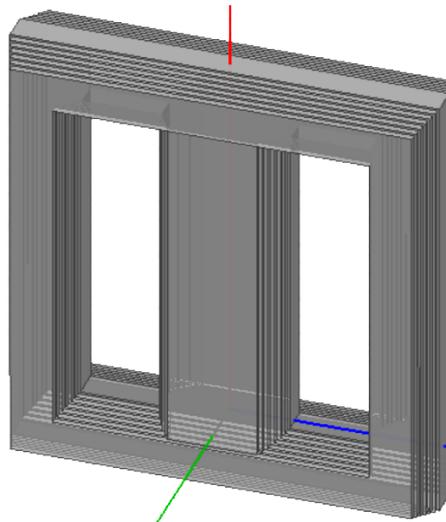
A geração de energia elétrica nas grandes usinas utiliza geradores síncronos que são limitados a tensões de aproximadamente 25 kV. Transmitir energia para grandes distâncias com esse nível de tensão levaria a perdas por efeito Joule elevadas, assim, utilizam transformadores que elevam a tensão e conseqüentemente diminuem a corrente nas linhas de transmissão. Se a tensão do gerador for multiplicada por 10, a corrente na transmissão será dividida por 10, logo, a perda por efeito Joule será 1/100 do valor que se obteria com a tensão original do valor de geração. No caso da distribuição, ao contrário da transmissão, a tensão tem que ser diminuída para atender às exigências das cargas consumidoras (BIM, 2014).

Os transformadores de potência são construídos de acordo com as especificações da sua condição de operação e do local no qual será instalado. No caso deste estudo, analisam-se somente transformadores de potência com resfriamento por convecção natural do óleo no interior do equipamento. Essa é a condição da maioria dos transformadores que existe em operação atualmente. Os modelos utilizados para a aplicação e construção de transformadores obedecem a critérios pré-definidos. Basicamente podem-se classificar os transformadores de acordo com os modelos de núcleo e de enrolamentos, como mostrado nas subções a seguir (SILVA, 2015).

4.2.1 Núcleo

O núcleo é constituído de chapas de aço silício laminado. A laminação do núcleo é necessária para evitar a ação das correntes parasitas, sendo utilizado como circuito magnético para circulação do fluxo criado pelos enrolamentos, como ilustra a Figura 17. Outros tipos de transformadores que apresentam elevada eficiência no mercado são os núcleos compostos por materiais amorfos (MARTIGNONI, 1987).

Figura 17 – Modelo típico de núcleo de transformadores.

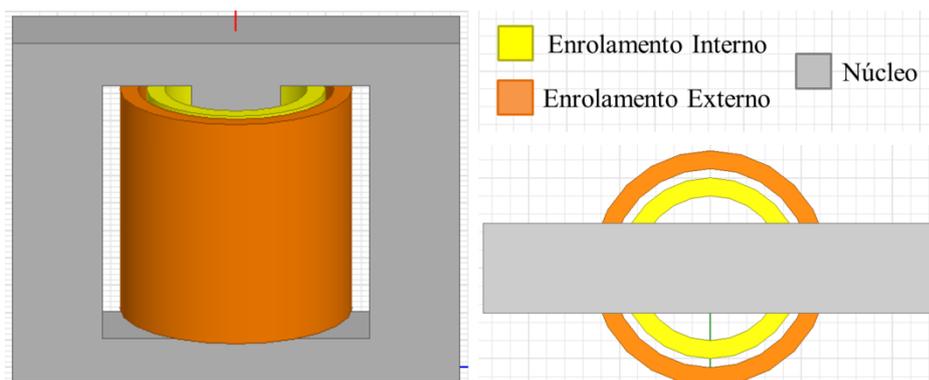


Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

4.2.2 Modelos de núcleos

Núcleo tipo “Shell-type”: núcleo do tipo envolvente, no qual a bobina é envolta pelo núcleo por meio das colunas adicionais laterais (Figura 18). Para transformadores de baixa potência faz-se a construção do núcleo utilizando-se chapas aço de grande comprimento, montadas no interior das bobinas já prontas. Para transformadores de grande potência, o núcleo é composto por chapas inseridas em bobinas prontas e faz-se o fechamento da culatra superior. Esse tipo de núcleo possui características próprias com relação ao seu comportamento sob transitórios de tensão e condições de curto circuito. Sua principal desvantagem é a necessidade de mais material ferromagnético em relação ao núcleo do tipo “core”, e as dimensões finais do transformador tendem a ser maiores (SILVA, 2015).

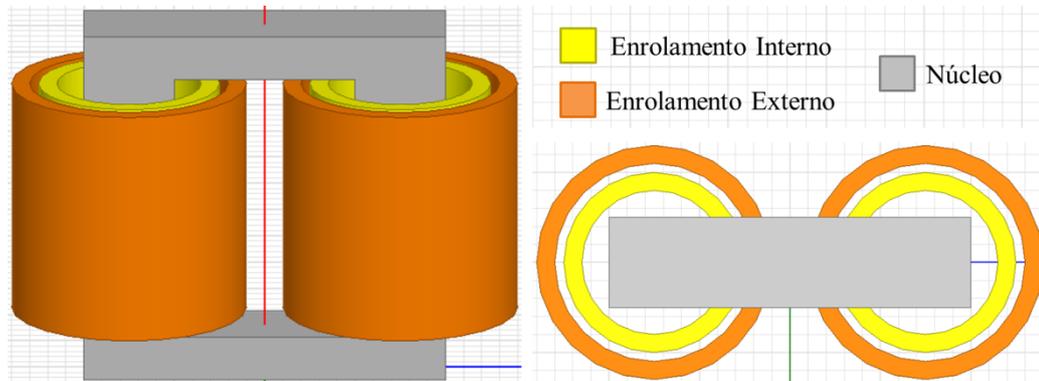
Figura 18– Transformador tipo núcleo envolvente (*Shell type*).



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Núcleo tipo “Core”: núcleo do tipo envolvido, no qual o fechamento do circuito magnético é realizado somente pelas colunas dos demais enrolamentos (Figura 19) e não possui colunas laterais adicionais (SILVA, 2015).

Figura 19– Transformador tipo núcleo envolvido (*Core type*).

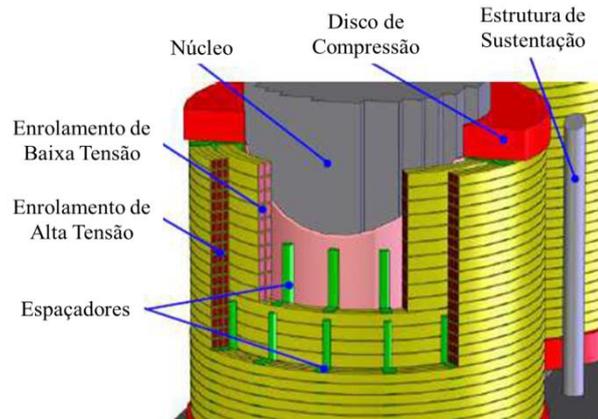


Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

4.2.3 Enrolamentos

Os enrolamentos pertencem à parte ativa do transformador, podendo ser construídos de cobre ou alumínio. Apresentam funções de prover a condução de corrente elétrica, mas para tal devem suportar altas temperaturas, assim como elevadas forças as quais são submetidos em condição normal de operação ou em estados transitórios. As bobinas de alta tensão e de baixa tensão são isoladas por material à base de celulose, conhecidos por papel isolante, esmalte sintético ou algodão. Também estão presentes nos enrolamentos os espaçadores que têm a função de promover o isolamento entre níveis de tensão e entre fases, como demonstra a Figura 20 (FONSECA, 2016).

Figura 20– Ilustração dos enrolamentos do transformador.

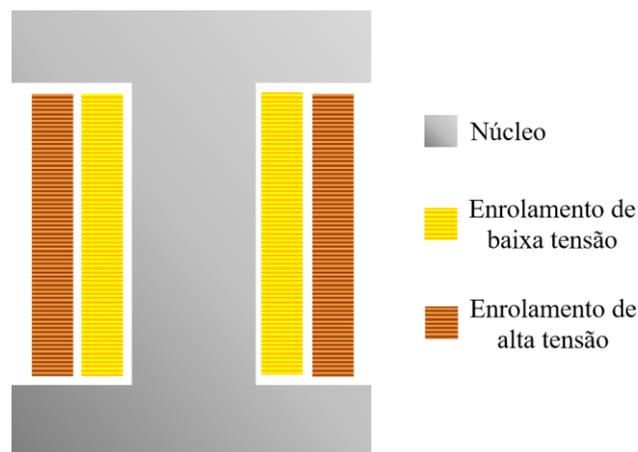


Fonte: Aguiar, 2007, p. 30.

4.2.4 Modelos de enrolamentos

Enrolamentos concêntricos ou tubulares: esta construção caracteriza-se por estruturar sobre cada coluna os dois enrolamentos de alta e baixa tensão, concêntricos, separados entre si por meio de material isolante. Para maior segurança, perto da coluna coloca-se sempre o enrolamento de baixa tensão separado por meio de material isolante e na parte externa é colocado o enrolamento de alta tensão. Os enrolamentos adquirem a forma de um solenoide contínuo conforma a Figura 21 (MARTIGNONI, 1987).

Figura 21– Configuração de enrolamentos concêntricos.

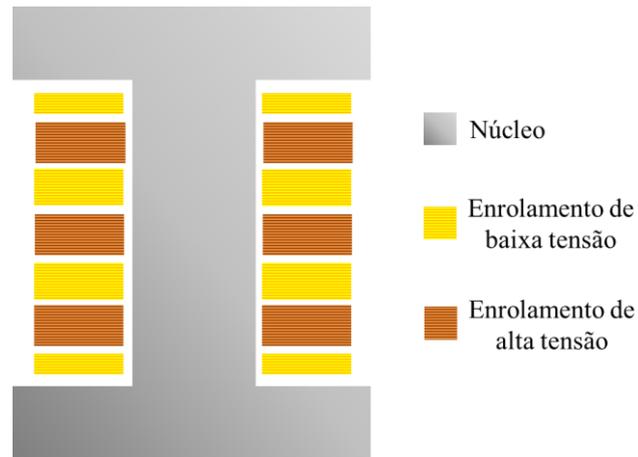


Fonte: Adaptado de Martignoni, 1987, p. 17.

Enrolamentos com bobinas alternadas ou de discos: esta configuração caracteriza-se por dispor ambos os enrolamentos, de alta e baixa tensão, na forma de bobinas alternadas, como ilustra a Figura 22. Para tornar mais fácil o isolamento na cabeça do núcleo, as bobinas são agrupadas de maneira que os enrolamentos de baixa fiquem sempre nas extremidades,

para diminuir a dispersão magnética as duas bobinas de baixa das extremidades devem possuir metade da espessura das demais bobinas de baixa tensão. Este tipo de configuração dos enrolamentos é tipicamente usado em transformadores de núcleo envolvente (MARTIGNONI, 1987).

Figura 22– Enrolamentos com bobinas alternadas.



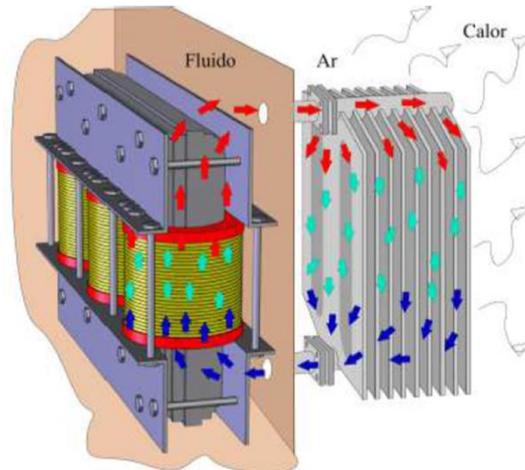
Fonte: Adaptado de Martignoni, 1987, p. 18.

Neste modelo de transformador o enrolamento de alta tem elevado número de espiras com seção relativamente pequena, enquanto que o enrolamento de baixa possui poucas espiras com grande seção.

4.2.5 Radiador

Os radiadores, como componentes típicos do sistema de resfriamento, são responsáveis pela refrigeração da parte ativa dos transformadores, conforme a Figura 23. O calor gerado pela parte ativa do transformador faz com que o fluido dielétrico seja aquecido. A porção do fluido aquecido, por causa da alteração de sua densidade pelo calor, passa a ocupar uma posição mais elevada no tanque do equipamento. Quando esta porção chega à parte superior do tanque, atinge a tubulação que leva aos radiadores e passa a preenchê-los. Uma vez nos radiadores, o fluido começa a perder calor ao meio externo por meio do contato do ar com as paredes do radiador. A função do radiador é propiciar uma grande superfície de contato com o ar exterior (AGUIAR, 2007).

Figura 23– Funcionamento dos radiadores acoplado a um transformador.



Fonte: Aguiar, 2007, p. 28.

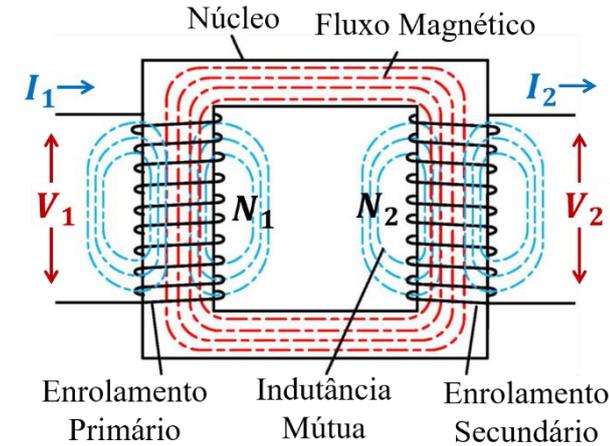
4.2.6 Princípio de funcionamento

Para melhor entendimento do princípio de funcionamento dos transformadores, é necessário analisar um transformador ideal, no qual sejam nulas as resistências elétricas dos enrolamentos, as perdas no ferro e as dispersões magnéticas (MARTIGNONI, 1987).

Transformadores são dispositivos elétricos que convertem tensão e, conseqüentemente, corrente através de dois enrolamentos montados em um núcleo magnético fechado, o enrolamento que recebe energia da fonte elétrica é denominado enrolamento primário e o enrolamento conectado à carga é denominado enrolamento secundário (BIM, 2014).

O funcionamento do transformador baseia-se nos fenômenos de muita indução entre dois circuitos eletricamente isolados, mas magneticamente ligados. Para que a ligação magnética entre os dois circuitos mencionados seja a mais perfeita possível, é necessário que estes estejam enrolados sobre um núcleo magnético de pequena relutância. Por motivos de construção, este núcleo possui a forma indicada na Figura 24 e, por ser destinado a canalizar um fluxo alternado, é constituído por lâminas devidamente isoladas, afim de diminuir as correntes parasitas (MARTIGNONI, 1987).

Figura 24– Esquema de um transformador simples.



Fonte: Adaptado de Haghjoo, Mostafaei, Mohammadzadeh, 2015, p. 26.

Aplicando-se no enrolamento primário uma tensão alternada que se deseja transformar V_1 , é gerada no enrolamento secundário uma tensão transformada V_2 . A relação entre estas duas tensões chama-se relação de transformação do transformador, a qual pode ser relacionada com o número de espiras e a corrente dos enrolamentos (MARTIGNONI, 1987).

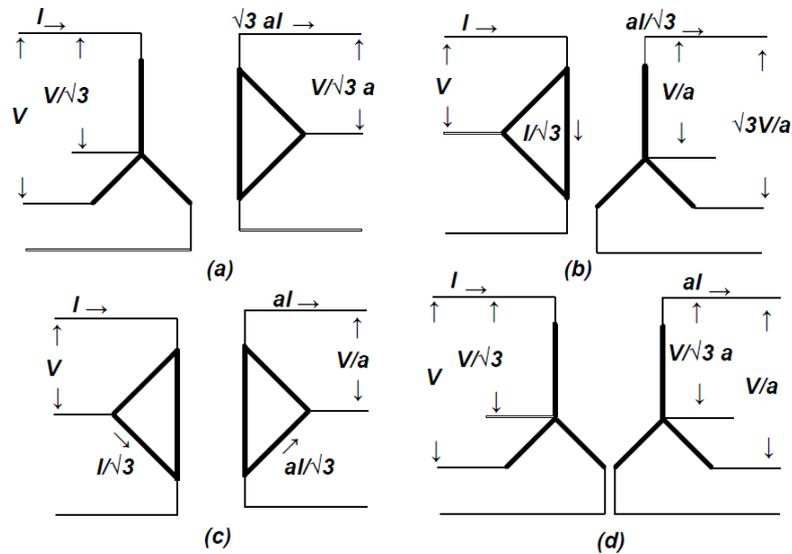
Para determinar tensão variável aplicada no primário do transformador, tem-se uma tensão induzida no secundário pela lei de Faraday-Lenz. Dessa forma, para um transformador sem perdas, pode-se definir as relações entre primário e secundário da seguinte forma:

$$\alpha = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (4.1)$$

Onde V_1 é a tensão no primário, V_2 é a tensão no secundário, I_1 é a corrente no primário, I_2 é a corrente no secundário, N_1 é o número de espiras no primário e N_2 é o número de espiras no secundário.

Os terminais dos enrolamentos de alta podem ser conectados em estrela (Y) ou em delta (Δ), bem como os de baixa, resultando, assim, nos possíveis arranjos: YY , $\Delta\Delta$, $Y\Delta$ e ΔY . A Figura 25 ilustra os possíveis arranjos para a ligação dos transformadores (BIM, 2014).

Figura 25– Principais tipos de ligação de transformadores (a) Y Delta, (b) Delta Y, (c) Delta Dela e (d) Y Y.



Fonte: Fitzgerald, Umans, Kingsley, 2006, p. 92.

4.3 Principais transitórios

Os fenômenos transitórios podem ocorrer em diversos períodos durante o funcionamento ou durante a energização dos transformadores. Esses eventos configuram-se por elevar a altos níveis o valor de pico das correntes nominais atuantes na máquina; entre os principais transitórios estão: as correntes de curto-circuito e as correntes de energização. Cada fenômeno tem efeitos, consequências e durações específicas como serão demonstrados na subseção seguinte.

4.3.1 Corrente de *inrush*

A saturação do núcleo magnético de um transformador é a principal causa de um transitório de corrente de partida. A saturação do núcleo decorre de uma mudança abrupta na tensão do sistema, que pode ser causada por chaveamento de transientes, sincronização fora de fase de um gerador, falhas externas e restauração de falhas. A energização de um transformador produz o caso mais severo de corrente de energização e o fluxo no núcleo pode atingir um valor teórico máximo de duas a três vezes o pico de fluxo nominal (CHIESA, 2010).

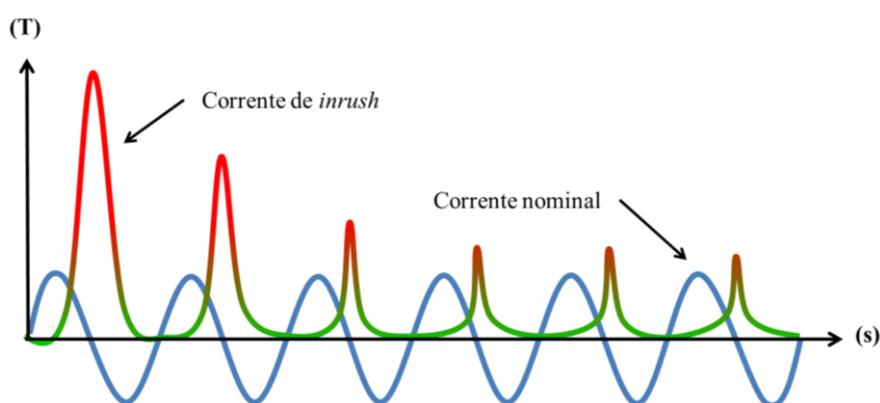
Chiesa (2010) comenta que não há evidência direta de que a energização de um transformador possa causar uma falha imediata devido às altas correntes de energização. No entanto, as falhas de energia nos transformadores de potência são frequentemente energizadas sob condições sem carga, corroborando a suspeita de que as correntes de *inrush* têm um efeito perigoso devido ao fato de ocorrerem inúmeras vezes. Um problema mais típico causado pela energização de transformadores é devido à interação harmônica com outros componentes do sistema que se desenvolve em sobretensões e fenômenos ressonantes.

A corrente de irrupção que flui para um enrolamento é um parâmetro importante para o cálculo da força eletromagnética transitória. A corrente de *inrush* é influenciada por diversos fatores, como a reatância do núcleo de ar, a ativação instantânea e a vazão residual no núcleo do transformador (AHN et al, 2014).

Quando um transformador é ligado para fornecer tensão dinâmica, frequentemente ocorre um fenômeno chamado de corrente de energização. Embora a magnitude da corrente de energização seja menor que a corrente de curto-circuito, a corrente de energização dura mais tempo e ocorre com maior frequência do que a corrente de curto-circuito (AHN et al, 2014).

A corrente de energização apresenta como característica alto valor de pico inicial, como ilustrado pela Figura 26, podendo ultrapassar em vinte vezes o valor de pico da corrente nominal. Embora essa corrente apareça tipicamente na energização do transformador, outros transitórios que ocorram em seu circuito podem causar o surgimento dessa corrente.

Figura 26– Forma de onda característica da corrente de *inrush*.



Fonte: Adaptado de Marcelino, 2011, p. 21.

Estudos sobre efeitos de forças em transformadores, quando submetidos a elevadas correntes em estados nominais de operação, revelam que o fator agravante para os esforços mecânicos máximos ocorre durante o primeiro pico de corrente. Assim, tem-se que para as

correntes de *inrush* o valor do primeiro pico da corrente pode ser calculado matematicamente pela Equação (4.2) (KULKARNI; KHAPARDE, 2004).

$$I_{0\max} = \frac{(H h_w)}{n} \quad (4.2)$$

Sendo $I_{0\max}$ o valor da corrente do pico máximo da corrente de *inrush*, h_w a altura do enrolamento energizado e H o fluxo magnético. De maneira detalhada, o pico máximo pode ser calculado pela Equação (4.3).

$$I_{0\max} = \frac{k_2 \cdot V \cdot \sqrt{2}}{X_s} (1 - \cos \theta) \quad (4.3)$$

Onde k_2 representa um coeficiente de ajuste para o cálculo do pico máximo, V a tensão aplicada em RMS e X_s a reatância do núcleo. Considerando que a reatância do núcleo e o ângulo θ podem ser definidos respectivamente pelas Equações (4.4) e (4.5).

$$X_s = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot D_m \cdot \pi^2 \cdot f}{2 \cdot h_w} \quad (4.4)$$

$$\theta = k_1 \cdot \cos^{-1} \left\{ \frac{B_s - B_{mp} - B_R}{B_{mp}} \right\} \quad (4.5)$$

Sendo μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo, N o número de voltas no enrolamento, D_m o diâmetro médio do enrolamento, f a frequência, k_1 o fator de correção para o ângulo de saturação, B_s a densidade de fluxo de saturação, B_{mp} o valor de pico da densidade de fluxo projetado de estado estável no núcleo e B_R a densidade do fluxo residual, podendo variar de 80% a 60% do valor de B_{mp} .

É válido ressaltar que, diferentemente da corrente de curto-circuito, em que o tempo de exposição pode ser eliminado em dezenas de milissegundos, as correntes de energização podem ter duração de dezenas de segundos. Dessa forma, é importante considerar o comportamento de toda a curva da corrente de *inrush*, que pode ser definida pela Equação (4.8) (KULKARNI; KHAPARDE, 2004).

$$B_{R(new)} = B_{R(old)} - B_{mp} \frac{k_3 R}{X_s} [2(\sin\theta - \theta \cdot \cos\theta)] \quad (4.6)$$

A Equação (4.6) recalcula o valor de B_R para atualizar as Equações (4.5) e (4.3). Dessa forma encontra-se o próximo pico da corrente, assim, o processo continua até o valor de pico da atenuação atingir o valor da corrente nominal, onde k_3 é o fator de correção para o decaimento de *inrush* e R a soma das resistências do sistema.

4.3.2 Corrente de curto-circuito

Sistemas elétricos estão sujeitos, frequentemente, a distúrbios em seu modo de funcionamento. Algumas das perturbações mais comuns são os curtos-circuitos. Estes ocorrem em decorrência do aparecimento de defeitos no isolamento, permitindo o contato direto entre pontos com diferentes potenciais. A consequência direta deste fenômeno é a drástica redução na impedância do circuito, elevando a corrente instantaneamente, com ação devastadora sobre os componentes de um sistema (GUIMARÃES, 2013).

As correntes de curto-circuito, além de serem as mais frequentes causas de falhas em transformadores, encontram-se também entre as faltas que apresentam maior severidade em termos de impacto sobre as estruturas de sustentação de transformadores. Os efeitos das correntes de curto-circuito nos enrolamentos são comumente térmicos e mecânicos.

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

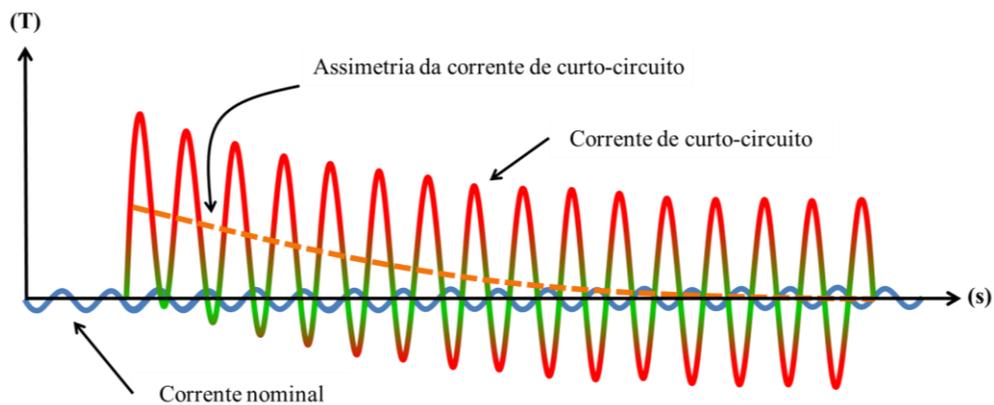
Nesse contexto, a capacidade de um transformador para resistir aos curtos-circuitos é considerada essencial para garantir a segurança e confiabilidade dos sistemas. Para que isso aconteça, os enrolamentos devem ter resistência mecânica suficiente para suportar as forças eletromagnéticas produzidas pelas altas correntes circulantes, sem se danificar. Ao mesmo tempo, os materiais usados na construção de ambos, condutores e isolamento, devem ser capazes

de resistir, sem significativa deterioração, às altas temperaturas produzidas pelas correntes de falta (AZEVEDO, 2007).

Em condições normais de operação, o campo magnético de um transformador concentra-se preferencialmente no material ferromagnético do núcleo, assim sendo, o fluxo de dispersão é relativamente pequeno. Sob a ação de um curto-circuito, a densidade de fluxo de dispersão aumenta significativamente e, por conseguinte, as forças que atuam nos enrolamentos também crescem (FONSECA, 2010).

Tal fenômeno pode ser observado na Figura 27 que ilustra a curva característica da corrente de curto-circuito.

Figura 27– Curva característica da corrente de curto-circuito.



Fonte: Adaptado de Aguiar, 2008, p. 47.

Comumente os transformadores são projetados para resistir ao maior pico da corrente em seus terminais, considerando o equipamento conectado a um barramento infinito do sistema elétrico. Nesta condição, a expressão utilizada para determinar o nível máximo da corrente de curto-circuito no transformador pode ser representada pela Equação (4.7) (BRONZEADO et al, 2007).

$$I_{cc} = \frac{k\sqrt{2} S_n 10^6}{\sqrt{3} V Z} \quad (4.7)$$

Sendo k o fator de assimetria da corrente de curto-circuito, S_n a potência nominal do transformador em MVA, V a tensão nominal fase-fase do transformador e Z a impedância do transformador.

Segundo Fonseca (2010), durante este fenômeno a Força de Lorentz por unidade de volume que um campo eletromagnético exerce sobre uma densidade volumétrica de carga e uma densidade superficial de corrente pode ser dada pela equação a seguir:

$$\vec{f} = \rho_v \vec{E} + \vec{J} \times \vec{B} \quad (4.8)$$

Desta forma, pode-se determinar a densidade da força durante a ocorrência de um curto-circuito.

4.4 Considerações finais

O presente capítulo abordou a teoria sobre transformadores, mencionando inicialmente uma classificação dos principais tipos e suas especificações, além da sua função predeterminada na rede elétrica, o que possibilita a transmissão e distribuição de energia com maior eficiência, diminuindo as perdas. Na sequência, detalharam-se as principais partes que compõem esse tipo de equipamento, não somente a parte ativa, composta basicamente pelo núcleo e os enrolamentos, mas as demais partes que corroboram na eficiência desses equipamentos, como os radiadores, entre outros. É destacado também o princípio de funcionamento e a relação de transformação.

Além dos componentes e do princípio de funcionamento, foram demonstrados os principais transitórios que ocorrem nessas máquinas, como corrente de *inrush* e corrente de curto-circuito. Esses fenômenos provocam a elevação da corrente aplicada nos enrolamentos durante estados diferentes de funcionamento, acarretando, assim, em falhas e na diminuição da vida útil do equipamento.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo será apresentada a aplicação da metodologia presente neste trabalho para a avaliação dos efeitos eletromagnéticos, térmicos e estruturais nos enrolamentos de um transformador quando submetido às correntes de *inrush* e correntes de curto-circuito. Serão apresentados os principais passos para estruturação das análises acopladas dos problemas relacionados às correntes de energização e de curto-circuito. Também serão descritas, de forma sucinta, algumas etapas necessárias para a montagem e resolução de problemas acoplados para um transformador instalado na planta da ELETROBRAS-ELETRONORTE, utilizando os *softwares* Ansoft Maxwell e ANSYS Workbench.

Para as correntes de entrada sobre os enrolamentos do transformador, serão considerados dois aspectos: no primeiro momento serão utilizados valores medidos diretamente na entrada e saída do transformador, as demais correntes, curto-circuito e *inrush*, serão calculadas analiticamente, como mostrado nos capítulos anteriores.

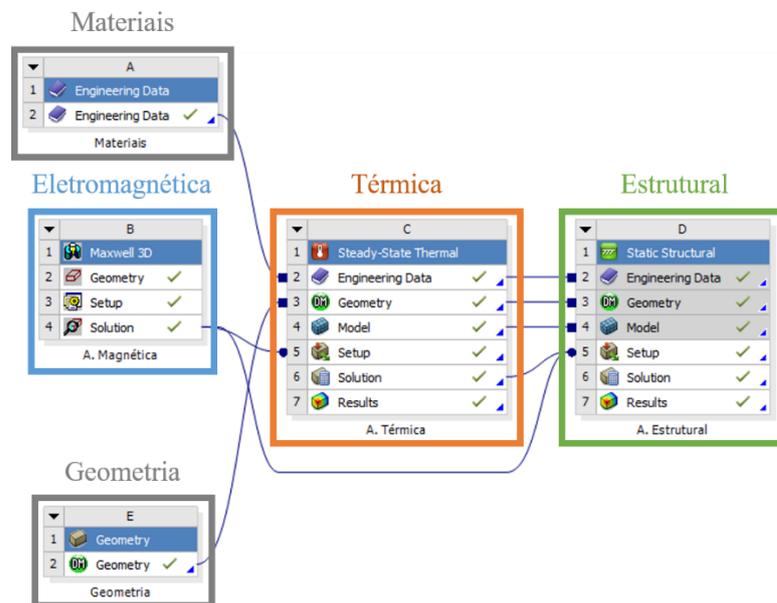
Todas as correntes serão utilizadas pelo programa de Método de Elementos Finitos Ansoft Maxwell, para fornecer a densidade do fluxo magnético, a densidade de corrente e as forças eletromagnéticas nos enrolamentos de alta e baixa tensão do transformador. Em seguida, obtidas as forças eletromagneto-mecânicas, os resultados serão utilizados para a realização de análises relacionadas com os enrolamentos do transformador, tais como aquecimento e deformações, utilizando o *software* ANSYS.

5.2 Implementação da metodologia

Os transformadores devem ser projetados para suportar as situações mais severas no local de instalação. Entre essas situações, destacam-se as correntes geradas nas condições de curto-circuito e de *inrush* no transformador, as quais podem causar diferentes efeitos, como: vibrações magneto-mecânicos, tensões mecânicas e tensões nos enrolamentos. Tais efeitos levam em alguns casos ao rompimento de isolamentos que, dependendo da severidade, frequência e condições sistêmicas, podem comprometer consideravelmente a vida útil do transformador (FONSECA, 2016).

Uma das principais contribuições deste trabalho é a aplicação desta metodologia de análise em transformadores que conecte parâmetros eletromagnéticos, térmicos e estruturais em uma única simulação multifísica, possibilitando a construção de modelagens mais fidedignas ao comportamento real do equipamento. Nos capítulos anteriores demonstrou-se o fluxograma de conexão entre os domínios físicos em estudo; a Figura 28 ilustra a implementação desta metodologia nos *softwares* utilizados.

Figura 28– Implementação da metodologia proposta nos softwares Ansys e Maxwell.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Primeiramente, o transformador é modelado seguindo especificações técnicas do equipamento. Em seguida, os valores de corrente são inseridos na simulação eletromagnética na qual obtém-se a distribuição do fluxo magnético; desta simulação são extraídos os dados relevantes para a análise dos demais fenômenos físicos, tais como: a distribuição de fluxo magnético e a densidade de corrente entre os enrolamentos interno e externo, a distribuição do fluxo axial e radial e as forças de Lorentz.

Na sequência inicia-se a simulação térmica, onde os parâmetros calculados no passo anterior são inseridos como condição de contorno com o intuito de determinar o aquecimento e a dilatação térmica gerada nos enrolamentos.

Por fim, é executada a simulação estrutural para análise mecânica no sentido de prever a deformação na estrutura dos enrolamentos do transformador, considerando as contribuições de todos os parâmetros calculados nos passos anteriores.

5.3 Características do transformador sob estudo

O equipamento selecionado para estudo é um transformador monofásico de 50 MVA conectado a um banco trifásico (Figura 29), de núcleo envolvente com enrolamentos concêntricos, que encontra-se em operação na região norte do país.

Figura 29 – Transformador em estudo.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Para modelagem do equipamento foram seguidos rigorosamente os parâmetros construtivos e especificações técnicas, dispostos na Tabela 1.

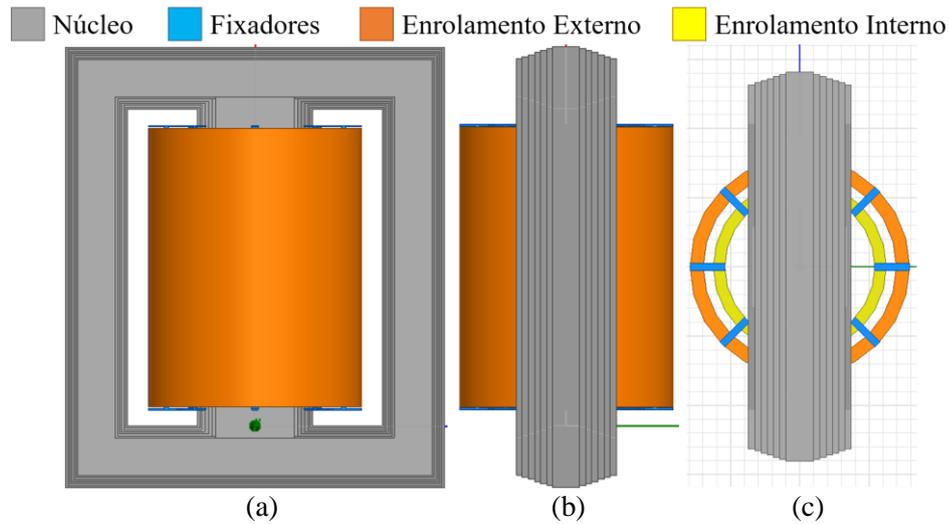
Tabela 1 – Características construtivas do transformado.

Características	Enrolamentos	
	Externo	Interno
Diâmetro Interno (mm)	1406	1096
Diâmetro Externo (mm)	1599	1262
Altura Axial (mm)	2080	2080
Altura Radial (mm)	96	83
Número de Espiras	572	191
Frequência (Hz)	60	60
Potencia (MVA)	50	50
Tensão de Fase (Kv)	$230 / \sqrt{3}$	$69 / \sqrt{3}$
Corrente Máxima de Fase (A)	376,5	1255,1
Ligação	Estrela	Estrela

Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Seguindo os dados da Tabela 1 foi desenvolvida a seguinte modelagem do transformador para o desenvolvimento das análises (Figura 30).

Figura 30 – Modelagem do transformador utilizado nas análises, vista (a) frontal, (b) lateral e (c) superior.

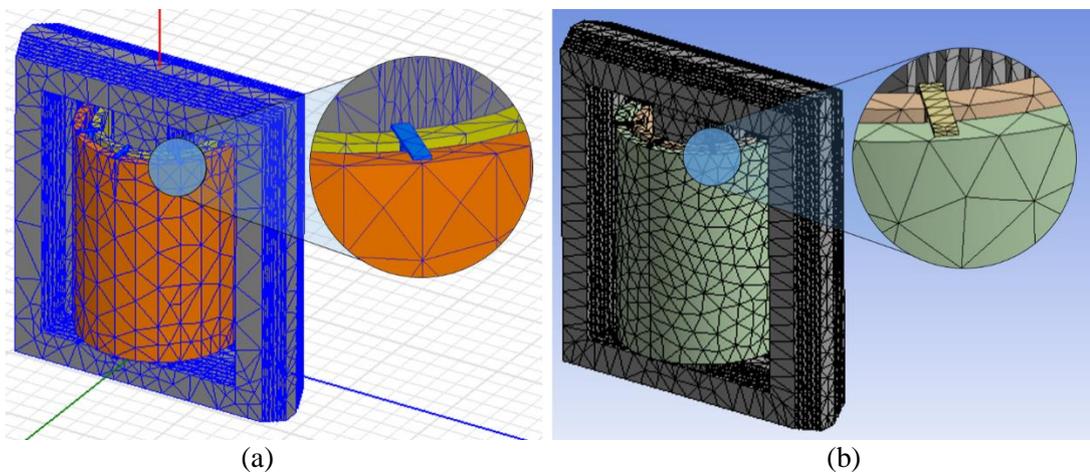


Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

O transformador em estudo possui enrolamento de alta tensão, de baixa tensão, enrolamento terciário e enrolamento regulador de alta tensão, entretanto para efeito de simplificação geométrica foram modelados apenas os enrolamentos de alta e baixa tensão. Os enrolamentos foram modelados com a forma de um cilindro sólido, entretanto os enrolamentos reais são compostos por vários discos conectados. Estas simplificações foram adotadas com o intuito de diminuir o custo computacional para as simulações.

Como as simulações foram desenvolvidas em dois softwares distintos, foram desenvolvidas duas malhas de elementos finitos com elementos tetraédricos.

Figura 31– Malhas de elementos finitos utilizadas, (a) Ansoft Maxwell, (b) Ansys Workbench.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

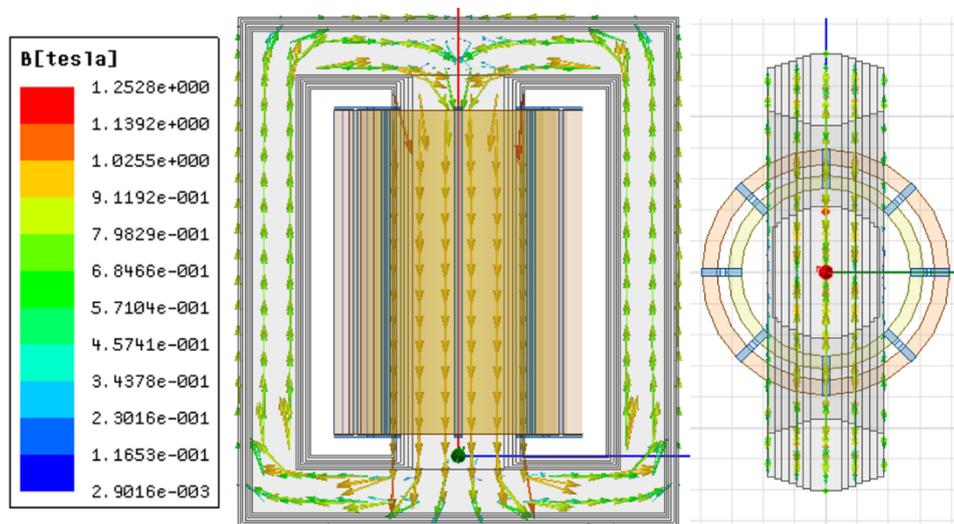
Cabe salientar que as malhas têm, respectivamente, 54.342 e 46.728 elementos. Uma vez definida a modelagem do transformador, serão descritos e discutidos os resultados obtidos através das simulações eletromagnética, térmica e estrutural.

5.4 Validação da metodologia proposta

Nesta etapa as simulações serão desenvolvidas utilizando os valores de corrente medidos nos enrolamentos do transformador operando em condição nominal de funcionamento; em sequência, os resultados obtidos nas diferentes etapas das análises serão comparados com dados da literatura e valores de medição com o intuito de validar a metodologia proposta.

Foram coletadas as correntes nos valores de 131,8 A no enrolamento externo e 421,1 A no enrolamento interno. Após a inserção dos valores de corrente, das propriedades dos materiais e da definição das condições de contorno no modelo computacional, foram obtidos os seguintes resultados na simulação eletromagnética.

Figura 32– Densidade de fluxo magnético de dispersão no núcleo do transformado em operação nominal.

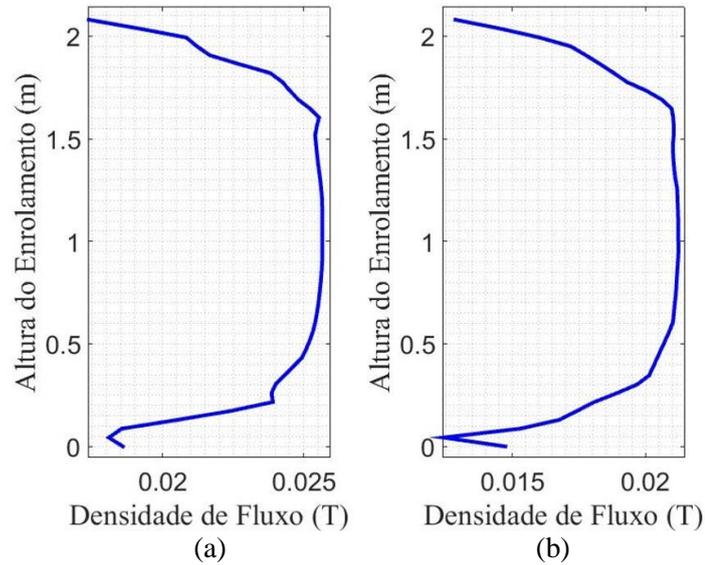


Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Admitindo que os materiais magnéticos empregados na construção dos núcleos dos transformadores tendem a saturar quando a densidade de fluxo magnético ultrapassa o valor de 2,0 T e que o fenômeno da saturação magnética não ocorre durante o funcionamento nominal do equipamento (GUIMARÃES, 2013). Desta forma, os resultados obtidos são

satisfatórios uma vez que a densidade de fluxo magnético no núcleo atingiu um valor máximo de 1,25 T (Figura 32).

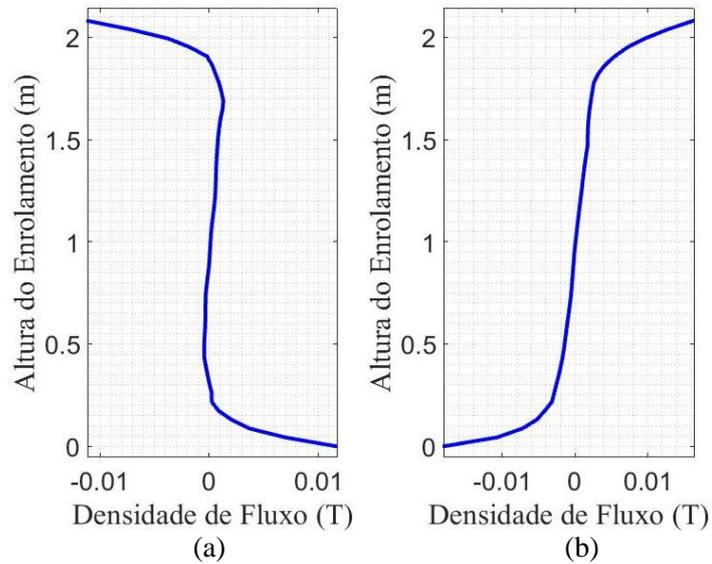
Figura 33 – Densidade de fluxo magnético de dispersão axial nos enrolamentos (a) externo, (b) interno.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Segundo Fonseca (2016) os valores máximos do campo axial são encontrados próximos à metade da altura do enrolamento, enquanto os valores máximos do campo radial são encontrados nas suas extremidades, superior e inferior dos enrolamentos. O comportamento das componentes axial e radial da densidade de fluxo magnético obtidos são perfeitamente condizentes com a literatura, como ilustram as Figuras 33 e 34.

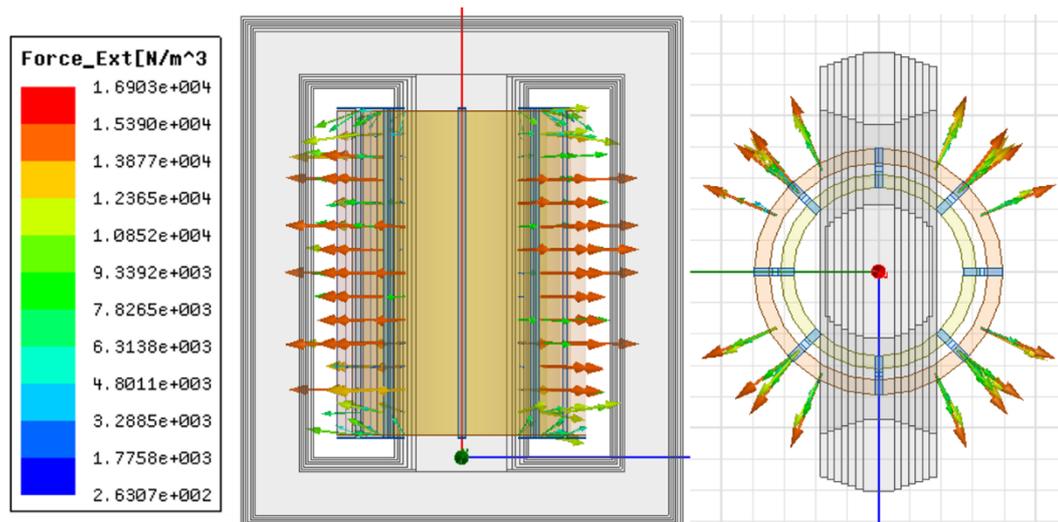
Figura 34 – Densidade de fluxo magnético de dispersão radial nos Enrolamentos (a) externo, (b) interno.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

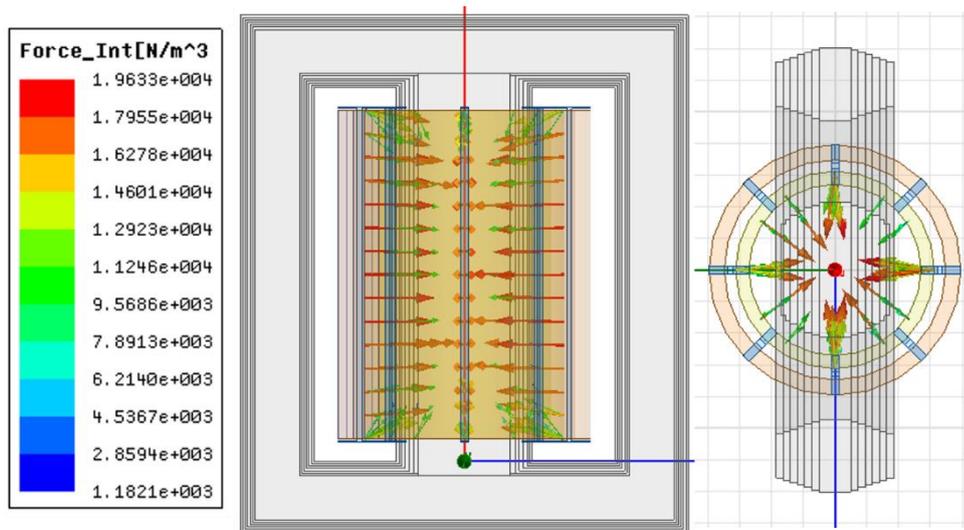
Guimarães (2013) afirma que no meio entre os enrolamentos há um campo magnético que proporciona a repulsão dos condutores por forças tangenciais, direcionando para a parte externa no condutor externo e para dentro no condutor interno. Os resultados ilustrados pelas Figuras 35 e 36 retratam o que afirma Guimarães.

Figura 35 – Força gerada no enrolamento externo.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Figura 36 – Força gerada no enrolamento interno.

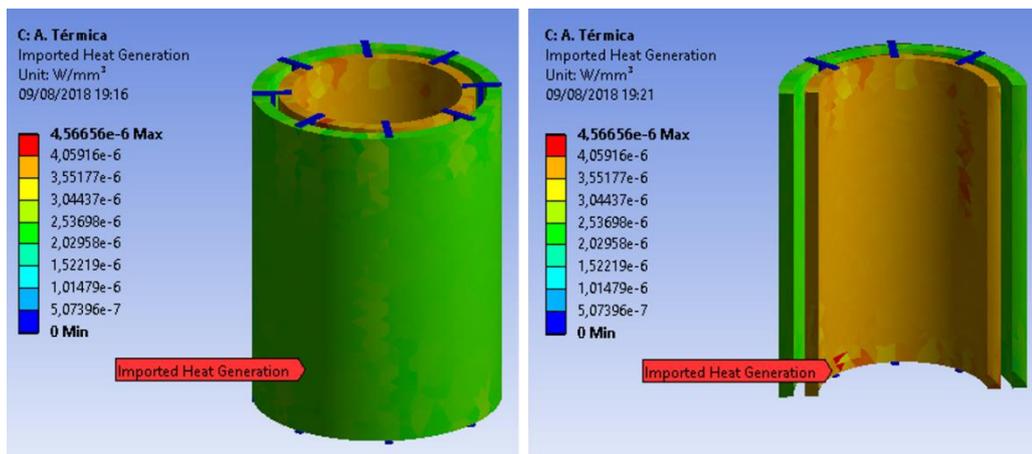


Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Baseado nos resultados mostrados anteriormente, comparando com os dados da literatura, pode-se afirmar que a metodologia da simulação é válida para este estudo.

Na sequência, inserindo os resultados calculados na simulação eletromagnética como condição de contorno foi executada a análise térmica a fim de mapear o aquecimento dos enrolamentos do transformador.

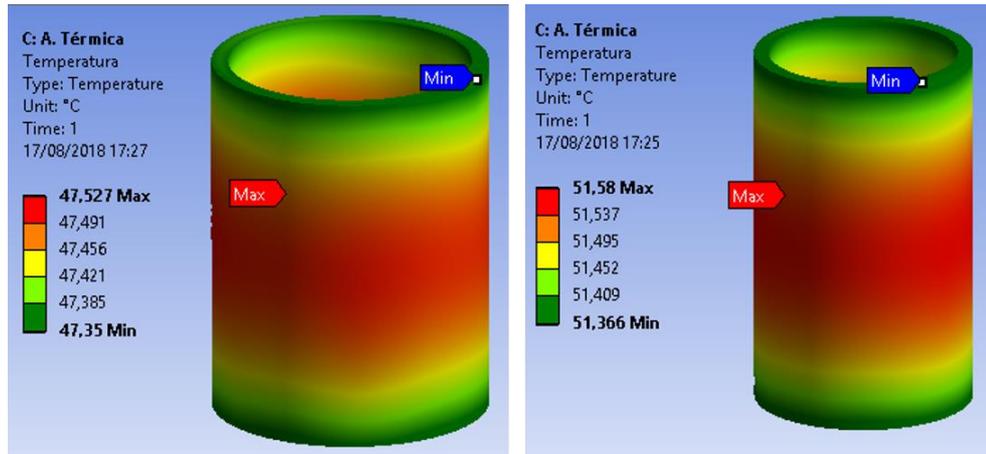
Figura 37 – Parâmetros para geração de calor.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Como as simulações eletromagnética e térmica estão diretamente conectadas é possível extrair com maior precisão as perdas que geram o aquecimento nos enrolamentos (Figura 37). Assim, tornou-se possível determinar a distribuição da temperatura ao longo dos enrolamentos do transformador (Figura 38).

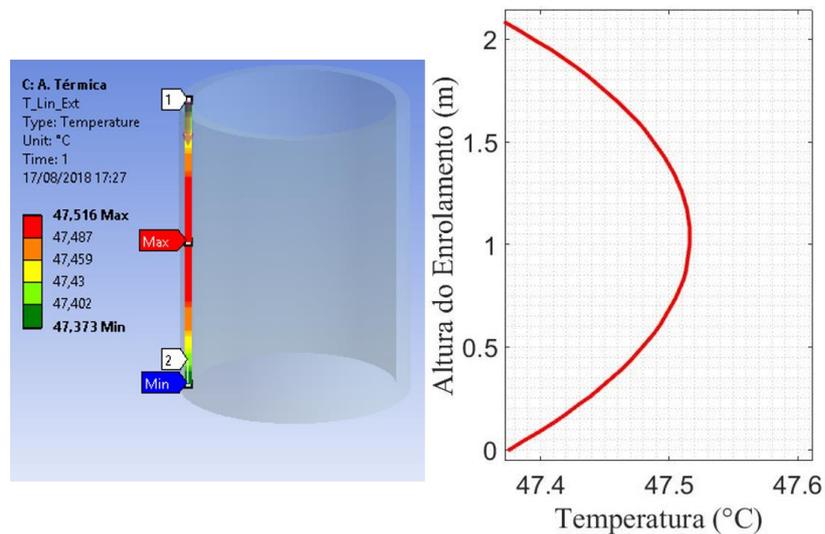
Figura 38 – Distribuição da temperatura nos enrolamentos.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

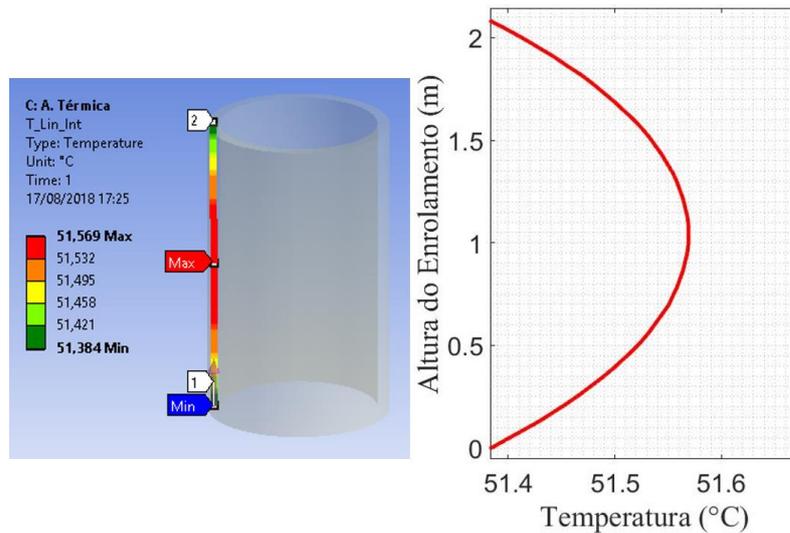
Como esperado, as temperaturas mais elevadas se encontram na parte mediana dos enrolamentos, como mostram os estudos de Daneshmand (2014) nos quais executou análise multifísica em um transformador trifásico de 315 kVA; e uma das análises desenvolvidas foi o comportamento térmico dos enrolamentos.

Figura 39 – Distribuição de temperatura ao longo da altura do enrolamento externo.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Figura 40 – Distribuição de temperatura ao longo da altura do enrolamento Interno.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Graças aos sensores instalados na parte interna do transformador, foi possível coletar os valores de temperatura dos enrolamentos no mesmo instante de tempo em que foram coletados os valores de corrente. Na Tabela 2 consta uma comparação entre os valores medidos pelos sensores e os valores obtidos na simulação térmica.

Tabela 2– Comparação entre as temperaturas medidas e calculadas.

Parâmetros	Enrolamento Externo	Enrolamento Interno
Temperatura Medida (°C)	52,00	53,10
Temperatura Calculada (°C)	47,52	51,58
Margem de Erro	9,4 %	2,9 %

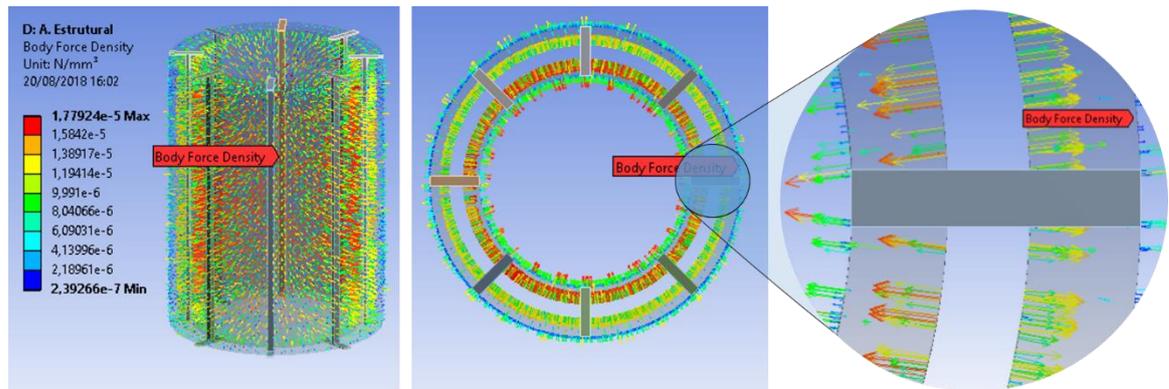
Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Ao analisar a comparação entre as temperaturas, percebe-se que a margem de erro das simulações é perfeitamente aceitável, o que torna a metodologia para a simulação térmica válida para este trabalho.

Seguindo a metodologia das simulações, a última análise a ser efetuada é a estrutural, na qual o intuito é avaliar a deformação gerada nos enrolamentos devido à ação das forças eletromagnéticas geradas durante o funcionamento.

Como as simulações estão conectadas, as forças geradas na simulação eletromagnética (Figuras 35 e 36), são implementadas diretamente na simulação estrutural, como ilustra a Figura 41.

Figura 41 – Forças importadas da simulação eletromagnética.

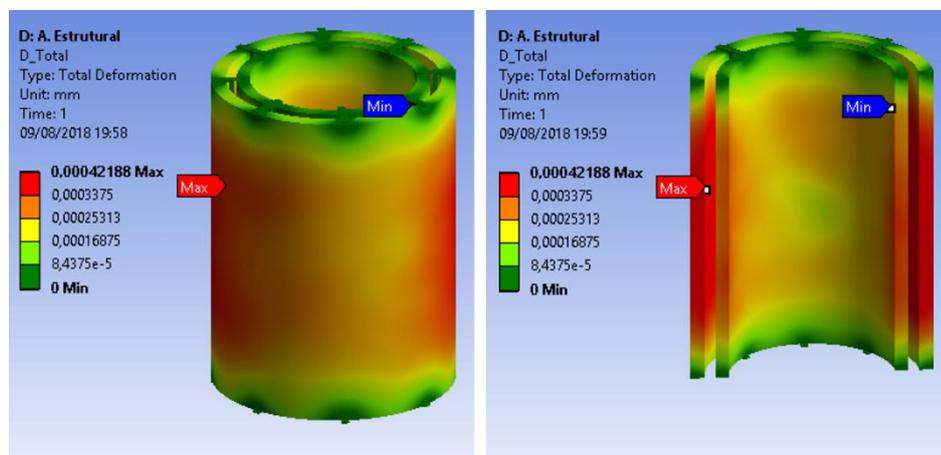


Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Após a implementação de todos os parâmetros necessários para a execução da simulação, foram obtidos os seguintes resultados para a deformação dos enrolamentos durante a operação nominal.

Qualquer material que recebe determinada quantidade de força esta sujeito a dois tipos distintos de deformação. A primeira delas, a deformação 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, denominada deformação plástica, o material tem seu comportamento não linear e a carga de tração excede o limite elástico, começa então a ocorrer deformações permanentes no material, não mais recuperando as suas dimensões originais se a carga for retirada (HIBBELER, 2006).

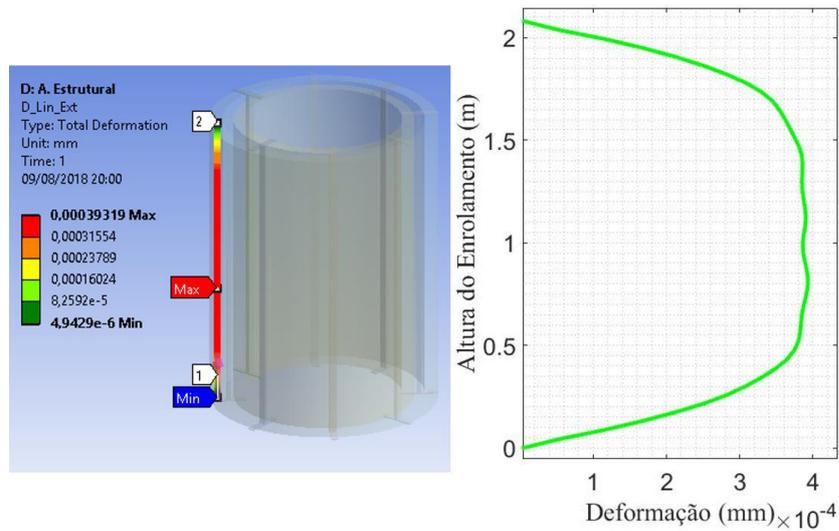
Figura 42 – Deformação gerada sob condição nominal.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

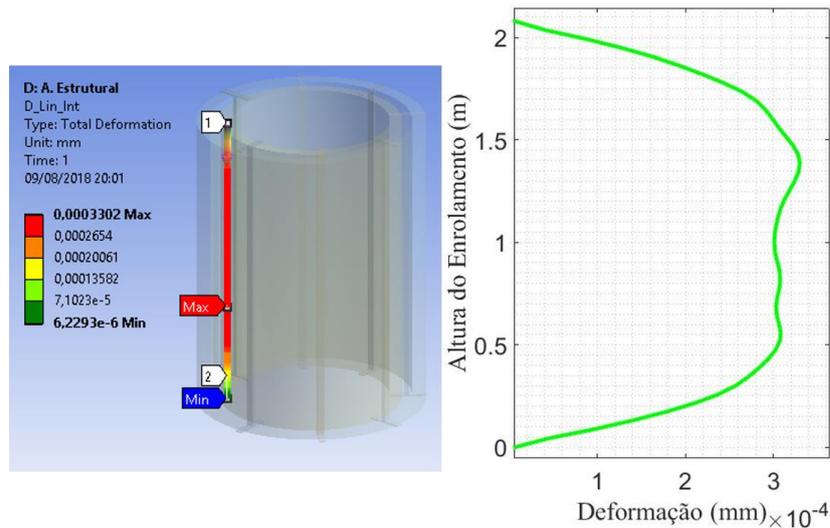
Observando a Figura 42, nota-se que as deformações são mais intensas na parte mediana dos enrolamentos e menos intensas nas seções próximas às extremidades e aos fixadores, entretanto como a simulação é sob correntes nominais, as deformações são perfeitamente aceitáveis uma vez que não apresentam danos severos à estrutura do transformador. Cabe salientar que estas são deformações elásticas por este fato quando cessadas as forças eletromagnéticas os enrolamentos voltam ao seu estado normal.

Figura 43 – Deformação no enrolamento externo em condição nominal.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

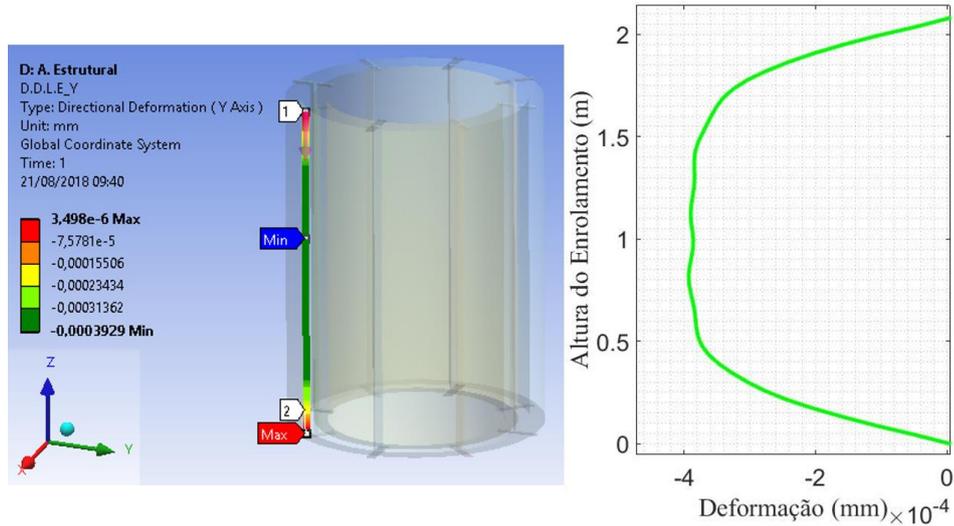
Figura 44 – Deformação no enrolamento interno em condição nominal.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

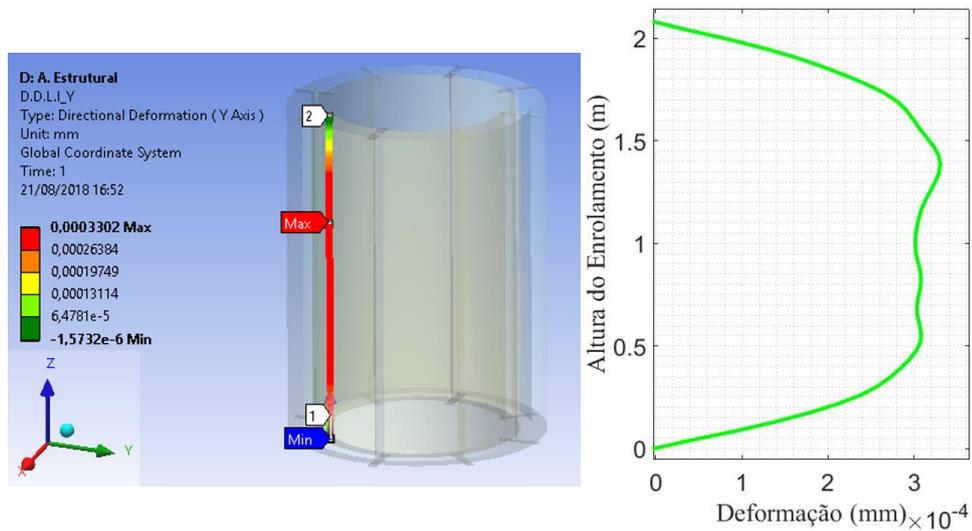
As Figuras 43 e 44 detalham a deformação sofrida ao longo dos enrolamentos externo e interno. É possível observar que o comportamento da deformação não é o mesmo para ambos os enrolamentos, sendo mais intensa no enrolamento externo.

Figura 45 – Deformação na direção do eixo Y no enrolamento externo em operação nominal.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Figura 46 – Deformação na direção do eixo Y no enrolamento interno em operação nominal.

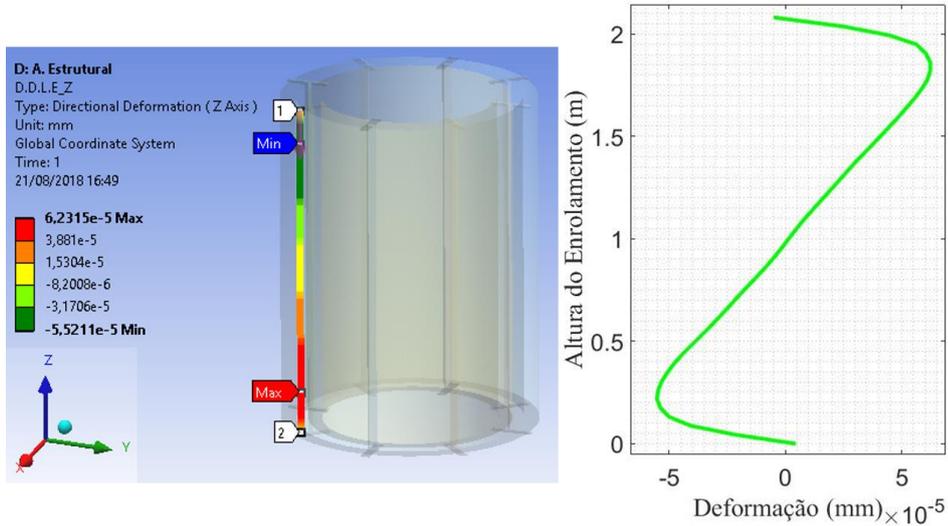


Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

As Figuras 45 e 46 retratam de forma detalhada a deformação radial nos enrolamentos externo e interno, conforme mostrado nas Figuras 35 e 36, que as forças atuam em sentidos opostos nos enrolamento. Assim, as Figuras 45 e 46 demonstram que a deformação realmente ocorre em sentidos opostos.

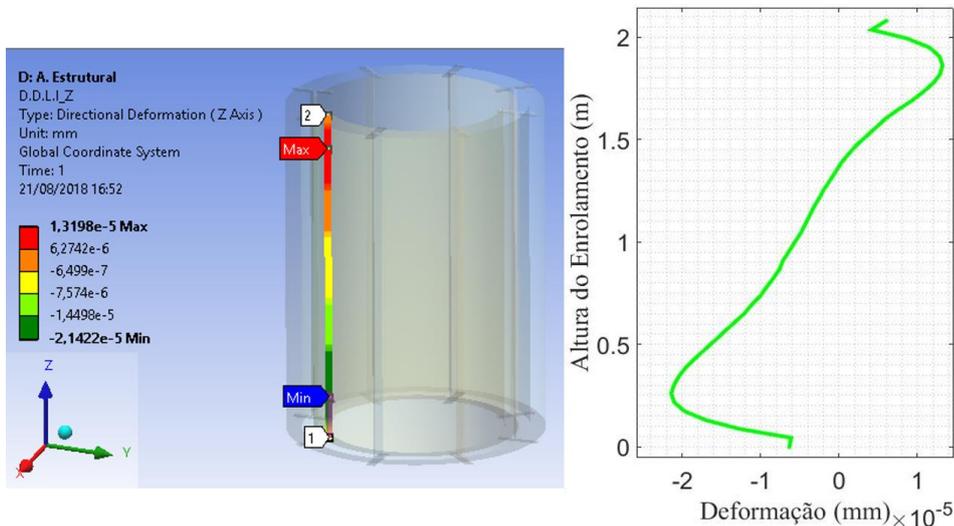
Semelhante ao passo anterior, as Figuras 47 e 48 retratam a deformação axial ao longo dos enrolamentos. Como esperado o comportamento destas deformações é mais intenso nas extremidades.

Figura 47 – Deformação na direção do eixo Z no enrolamento externo em operação nominal.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Figura 48 – Deformação na direção do eixo Z no enrolamento interno em operação nominal.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Cabe salientar que, nesta etapa das simulações, são considerados como fatores que influenciam na deformação dos enrolamentos: as forças eletromagnéticas geradas e a dilatação térmica que ocorre durante o aquecimento de um material.

Levando em consideração todos esses fatores e analisando que os valores obtidos para as deformações nos enrolamentos são perfeitamente aceitáveis para a condição nominal

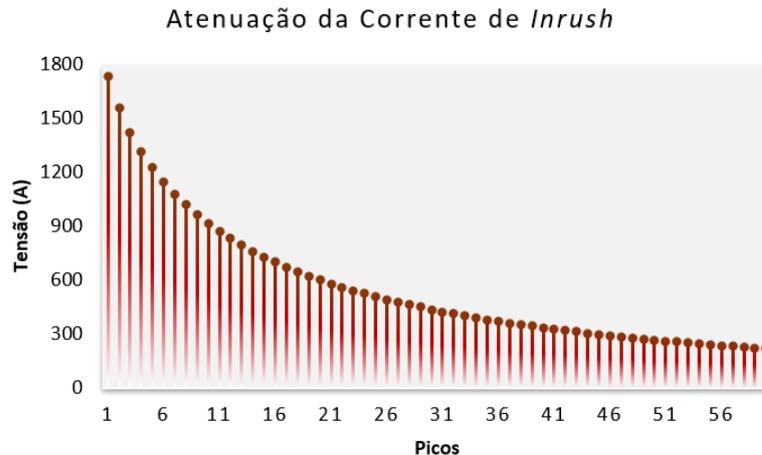
de operação, uma vez que mesmo pequenos os resultados estão condizentes com o que se espera fisicamente do equipamento, pode-se afirmar que a metodologia apresentada neste trabalho, para realização de simulações multifísicas acopladas, é válida para efetuar análises sob condições mais severas em transformadores de potência.

5.5 Análise sob corrente de *inrush*

Foi calculado o comportamento da toda a atenuação do fenômeno de energização para transformador em estudo (Figura 49), utilizando as equações mostradas anteriormente, entretanto neste trabalho será feita a análise apenas da condição mais severa, a corrente do primeiro pico, ficando como proposta para trabalhos futuros a análise de todo o fenômeno.

Para este caso, apenas as componentes de campo produzidas pelas correntes nos condutores dos enrolamentos primários são consideradas e somente o enrolamento de AT (Alta Tensão) foi energizado com uma corrente máxima com o valor do pico de 1731,6 A.

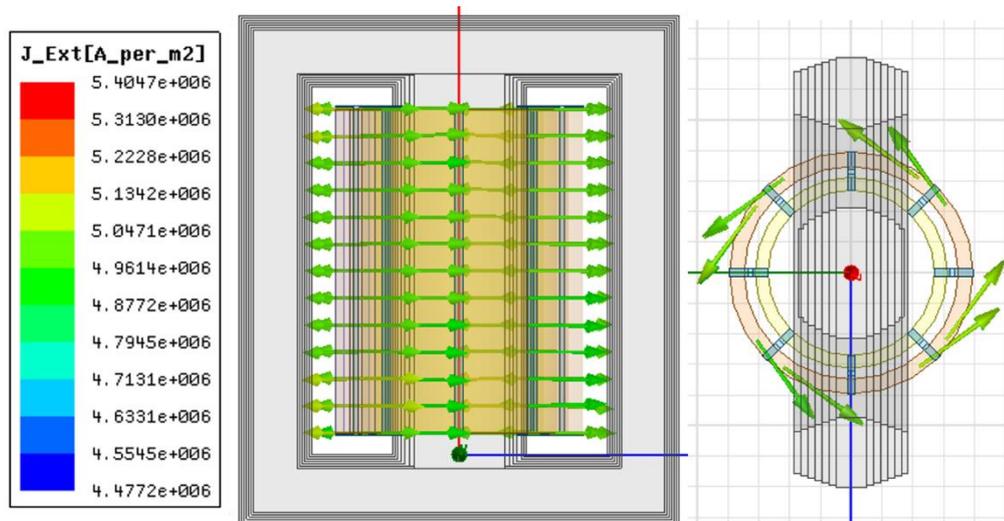
Figura 49 – Picos da corrente de *inrush*.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Como observado nos tópicos anteriores, o processo para a execução das simulações acopladas começa pela simulação eletromagnética, onde a corrente inserida no enrolamento externo é aproximadamente 13 vezes o valor da corrente nominal.

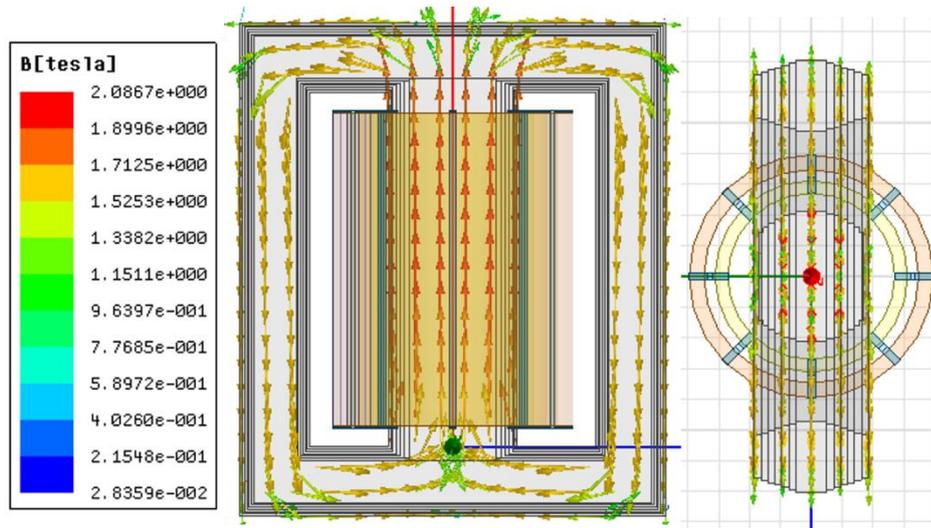
Figura 50 – Densidade de corrente no enrolamento com corrente de *inrush*.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

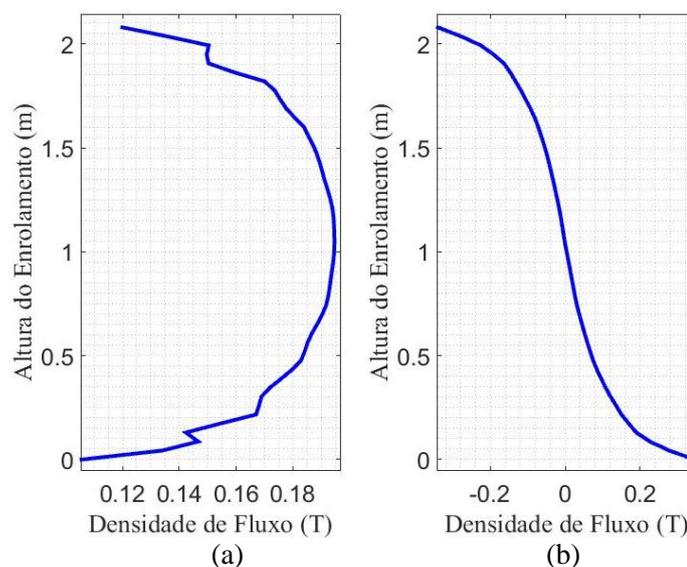
A Figura 50 ilustra a densidade de corrente no enrolamento energizado, alcançando valor máximo de aproximadamente $5,04 \times 10^6$ A/m². Ao observar os resultados da densidade de fluxo magnético percebe-se que o núcleo alcançou o estado de saturação, uma vez que satura após uma densidade de fluxo magnético superior a 2 T e para este caso foi obtido um valor máximo de 2,08 T (Figura 51).

Figura 51 – Densidade de fluxo magnético no núcleo com corrente de *inrush*.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Figura 52 – Densidade de fluxo magnético (a) axial e (b) radial no enrolamento energizado

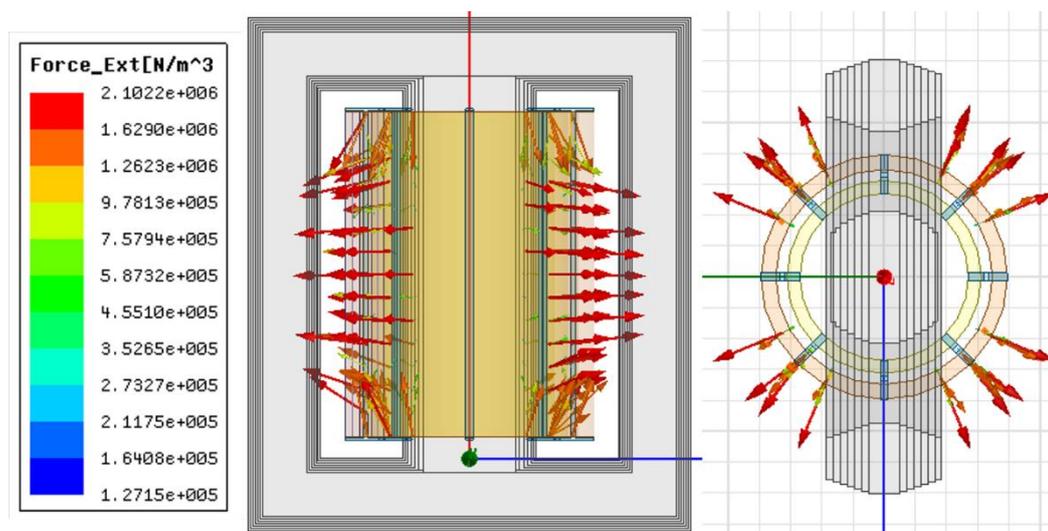


Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Na Figura 52 são apresentados os gráficos das distribuições dos campos axial e radial, respectivamente, ao longo do enrolamento energizado. Os valores máximos do campo axial são encontrados próximos à metade da altura do enrolamento, enquanto os valores máximos do campo radial são encontrados nas suas extremidades superior e inferior, como já esperado; observa-se, ainda, que os valores para o campo radial são superiores aos obtidos para o campo axial.

Segundo Azevedo (2007), sob condições normais de funcionamento, as forças no transformador são relativamente pequenas e, portanto, os estresses são perfeitamente toleráveis pelas estruturas dos enrolamentos. No entanto, sob a ação de fenômenos transitórios, como as correntes de *inrush*, devido às altas correntes, os estresses mecânicos podem atingir valores altos e, portanto, estresses devido a este fenômeno podem ser suficientes para destruir total ou parcialmente o transformador.

Figura 53 – Forças geradas durante a energização com correntes de *inrush*.

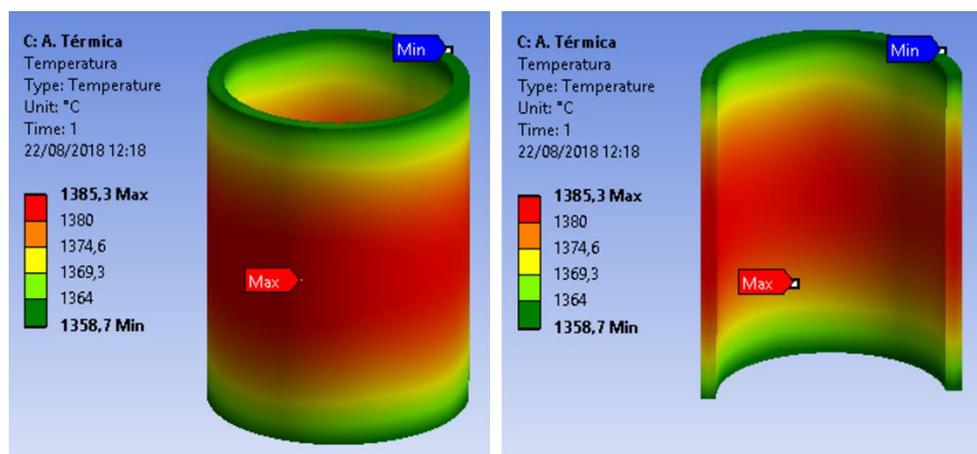


Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Na Figura 53 é apresentada a intensidade da força gerada no enrolamento durante este fenômeno, o equivalente a um valor máximo 124 vezes maior que as forças geradas no mesmo enrolamento na condição nominal.

Seguindo a metodologia das simulações, como foi descrito no tópico anterior, os parâmetros da análise eletromagnética foram inseridos como condição de contornos para a simulação térmica, com isto foi possível determinar a temperatura que o enrolamento externo pode atingir durante o pico máximo da corrente de *inrush* (Figura 54). Nota-se que a temperatura máxima calculada ultrapassa os 1.385°C, entretanto como os fenômenos físicos, eletromagnético e térmico correm com velocidades diferentes na prática e a temperatura máxima atingida será um pouco menor em relação àquela encontrada como resultado. No entanto, o enrolamento do transformador ainda alcançará uma temperatura que pode prejudicar seu funcionamento e diminuir sua vida útil.

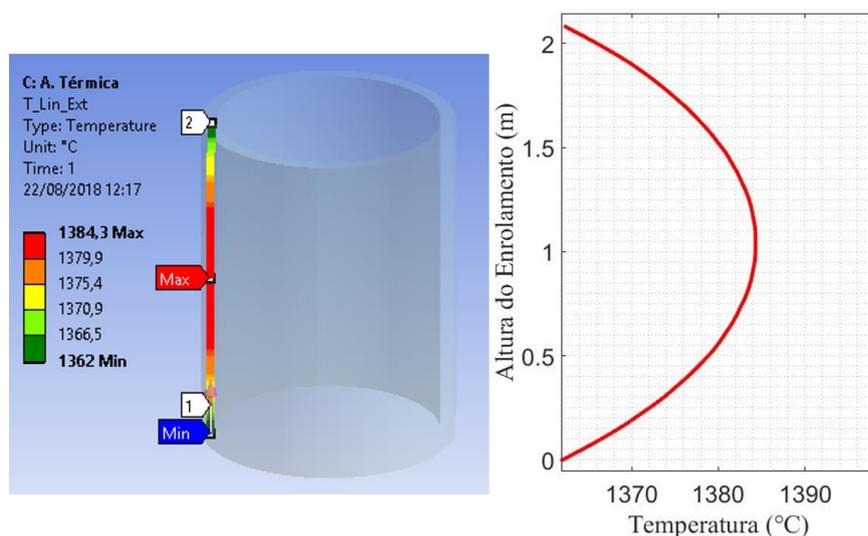
Figura 54 – Temperatura que o enrolamento externo pode chegar durante a energização com correntes de *inrush*.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

A Figura 55 ilustra o comportamento da temperatura ao longo do enrolamento. Observa-se que as temperaturas mais elevadas se concentram na parte mediana do enrolamento mantendo o mesmo comportamento de distribuição térmica encontrado na simulação com corrente nominal, entretanto com temperaturas muito maiores.

Figura 55 – Comportamento da temperatura ao longo do enrolamento energizado.

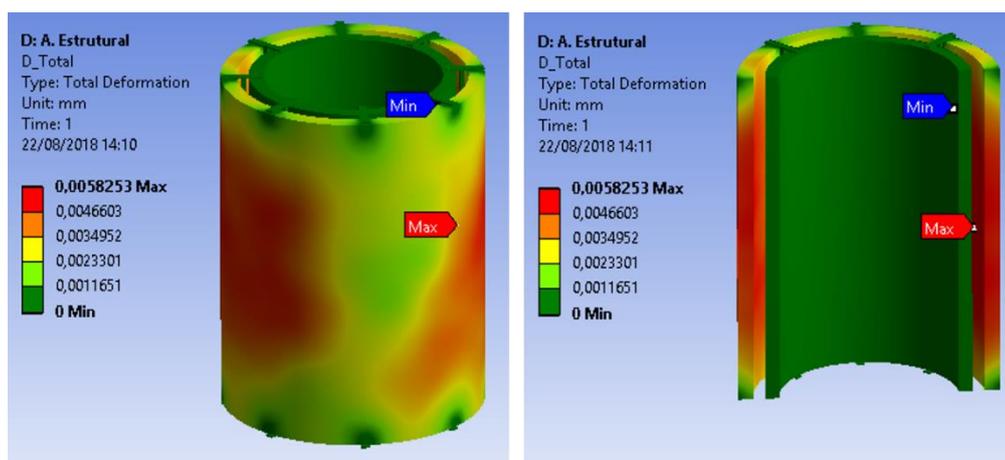


Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

É importante lembrar que nestas simulações não estão sendo considerados elementos de refrigeração do transformador que entram em operação quando o transformador passa a operar com temperaturas muito elevadas, a incorporação de tais elementos nas simulações térmicas é uma implementação para trabalhos futuros.

Na sequência será avaliado o quanto os parâmetros calculados anteriormente podem contribuir para a deformação no enrolamento externo, uma vez que todos os elementos calculados nas etapas anteriores são inseridos como condição de contorno para a simulação estrutural. Como resultado, estimou-se a deformação sofrida pelo enrolamento externo durante o pico máximo da corrente de *inrush* (Figura 56).

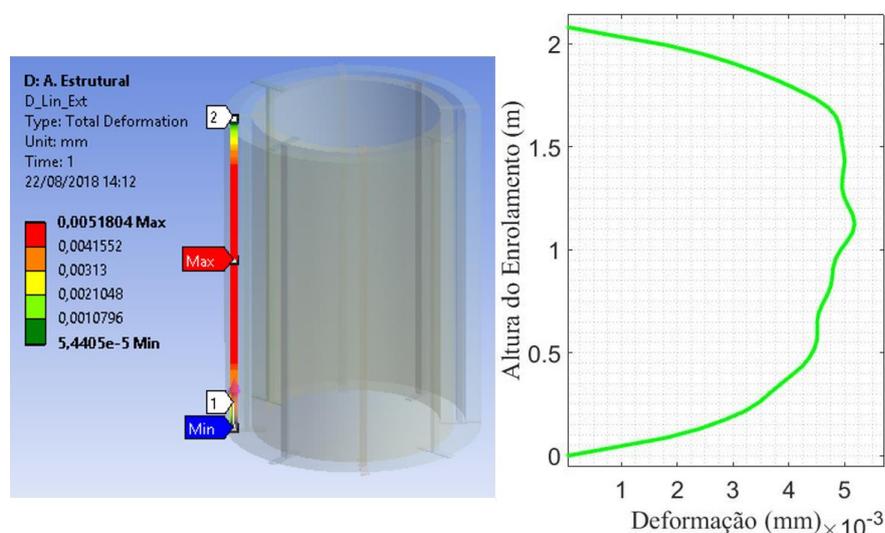
Figura 56 – Deformação gerada nos enrolamentos do transformador com correntes de *inrush*.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Analisando os resultados obtidos, nota-se que o comportamento da deformação continua mantendo o mesmo padrão da deformação estimada para a condição nominal, entretanto com uma intensidade 14 vezes maior, onde as deformações maiores ocorrem na parte mediana do enrolamento e com menor severidade nas suas extremidades, observa-se, ainda, que a deformação é nula nos pontos próximos aos fixadores.

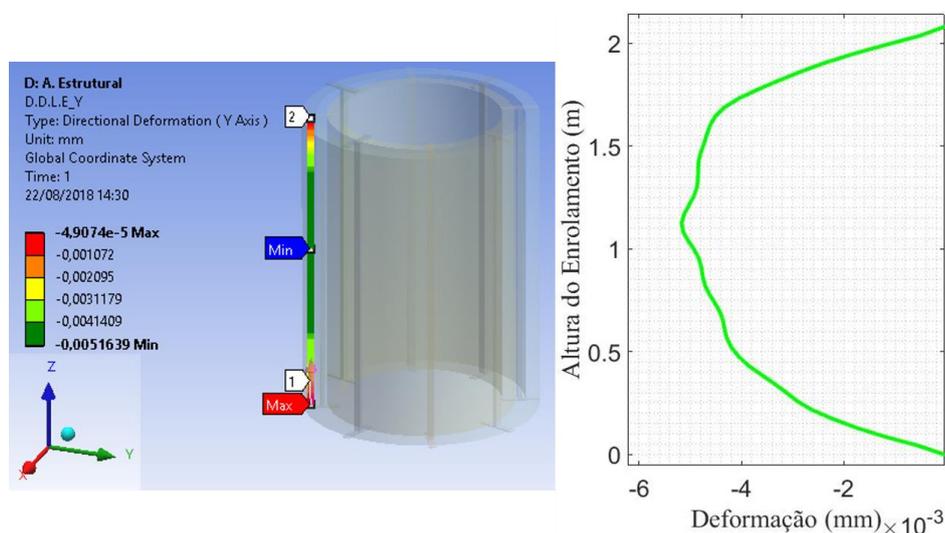
Figura 57 – Comportamento da deformação ao longo do enrolamento durante a energização.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Observando de forma detalhada o comportamento da deformação estrutural ao longo do enrolamento (Figura 57), torna-se evidente que o pico máximo da deformação ocorre na metade da altura do enrolamento, atingindo um valor de 0,0051 cm.

Figura 58 – Deformação na direção do eixo Y no transformador durante a energização.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

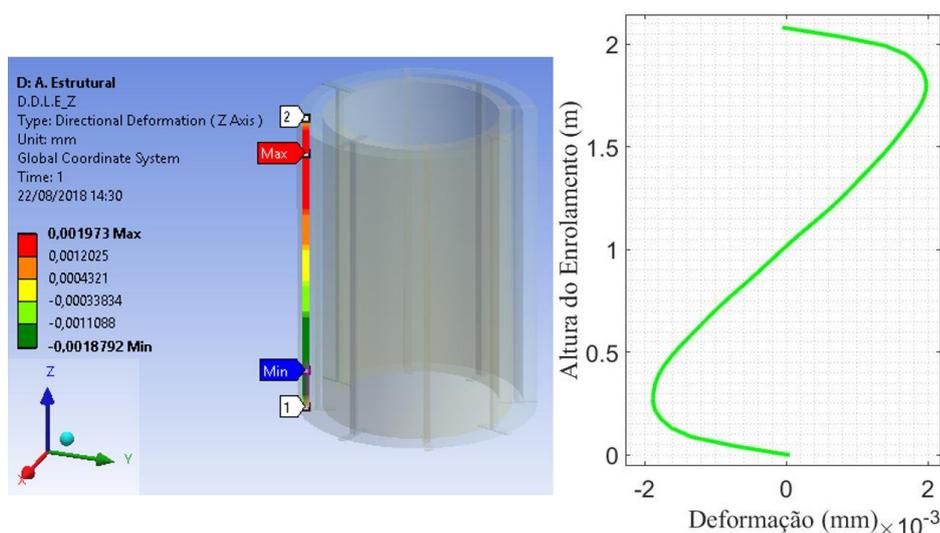
A deformação radial obtida para este caso (Figura 58) condiz com os dados encontrados na literatura, a exemplo do trabalho de Fonseca (2016), no qual comparando os resultados (Tabela 3) obteve-se um erro de 24%. Entretanto, nesta análise considera-se a dilatação térmica, fator não considerado nos estudos de Fonseca (2016).

Tabela 3 – Comparação entre as deformações radiais.

Parâmetros	Enrolamento Externo
Deformação Radial Calculada (mm)	0,0038996
Deformação Radial de FONSECA, 2016 (mm)	0,0051639
Margem de Erro	24 %

Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Figura 59 – Deformação na direção do eixo Z no transformador durante a energização.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Analisando a deformações axial (Figura 59), observa-se que é equivalente a 1/3 da deformação radial, entretanto é 31 vezes superior a deformação axial sofrida para a condição nominal do mesmo enrolamento.

Ainda que os resultados obtidos para a condição de energização com correntes de *inrush* sejam suportáveis pelo equipamento, são superiores às condições nominais nas quais o equipamento opera; e como o fenômeno de energização ocorre inúmeras vezes durante a vida útil do transformador, a constante saturação do núcleo, elevação de temperatura dos enrolamentos e as deformações acima das condições nominais podem diminuir a vida útil do equipamento, prejudicando, assim, a integridade da rede de distribuição de energia elétrica.

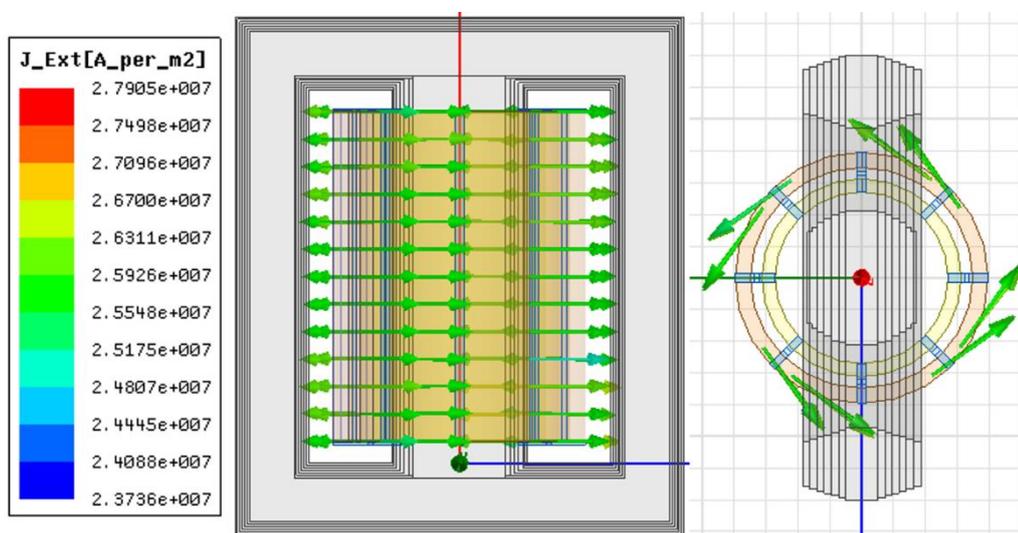
5.6 Análise sob corrente de curto-circuito

As correntes de curto-circuito estão entre os transitórios mais severos e prejudiciais aos transformadores de potências, chegando muitas vezes a serem altamente destrutivos. Por apresentar estas características, torna-se muito difícil avaliar os efeitos deste fenômeno nos

transformadores de forma experimental, logo, uma possível solução para avaliar os efeitos que um curto-circuito apresenta sobre os transformadores é a utilização de simulações computacionais. Com isto neste tópico será avaliado numericamente, por meio da metodologia proposta, o quão nociva a corrente máxima de um curto-circuito pode ser sobre o transformador em estudo.

Utilizando as equações mostradas anteriormente, foram calculadas as correntes de curto-circuito para serem inseridas na simulação eletromagnética, utilizando-se 8.979 A no enrolamento externo e 34.586 A no enrolamento interno.

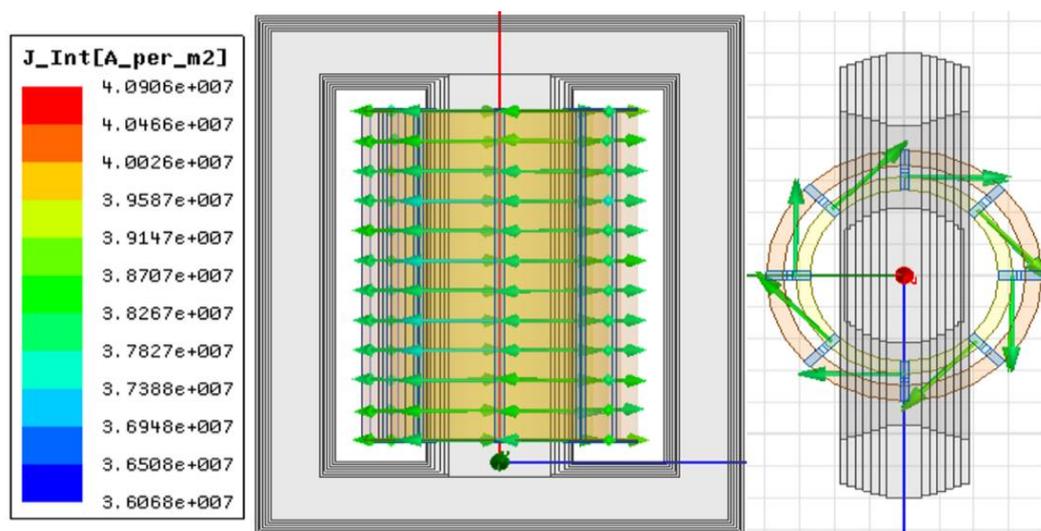
Figura 60 – Densidade de corrente no enrolamento externo carregado com correntes de curto-circuito.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Como resultados iniciais, para as simulações acopladas para a condição de curto-circuito, tem-se a densidade de corrente que circula nos enrolamentos (Figuras 60 e 61), destacando que as correntes inseridas circulam em sentidos opostos na simulação para retratar de forma mais fidedigna a operação real do transformador. Observa-se que a densidade de corrente é mais expressiva no enrolamento interno, alcançando quase o dobro da densidade de corrente do enrolamento externo.

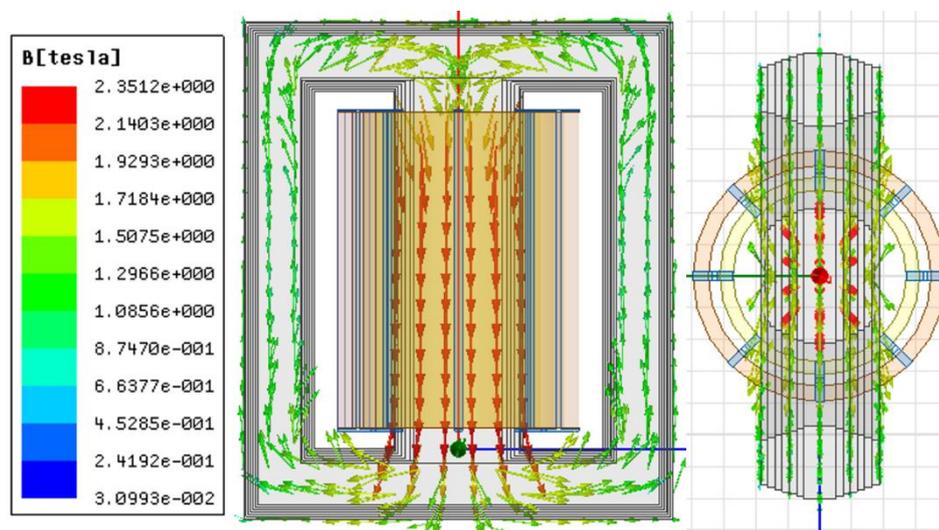
Figura 61 – Densidade de corrente no enrolamento interno carregado com correntes de curto-circuito.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Ao analisar a densidade de fluxo magnético no núcleo (Figura 62), nota-se que a saturação durante o curto-circuito é ainda mais severa em relação àquela que ocorre durante a energização pelas correntes de *inrush*, uma vez que para esta condição a densidade de fluxo magnético no núcleo alcançou o valor máximo de 2,35 T.

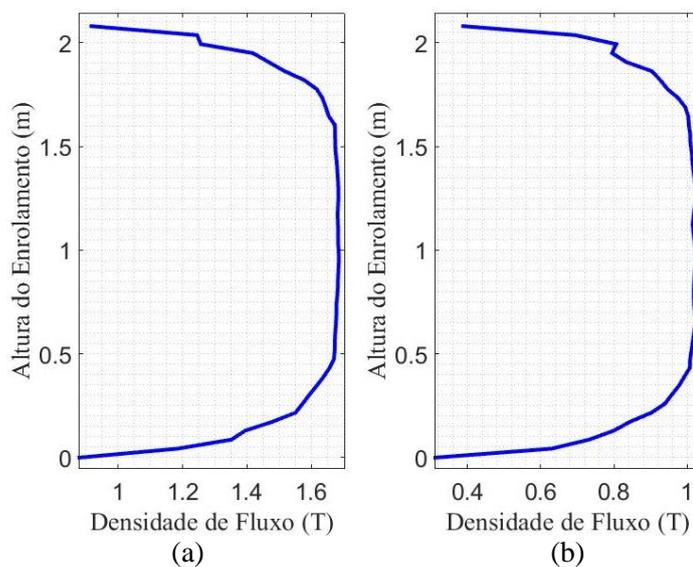
Figura 62 – Densidade do fluxo magnético de dispersão no núcleo para a condição de curto-circuito.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

As densidades de fluxo magnético de dispersão axial e radial mantiveram o mesmo comportamento dos resultados obtidos para a condição nominal de operação, entretanto foram obtidos valores bem superiores aos resultados obtidos com correntes nominais.

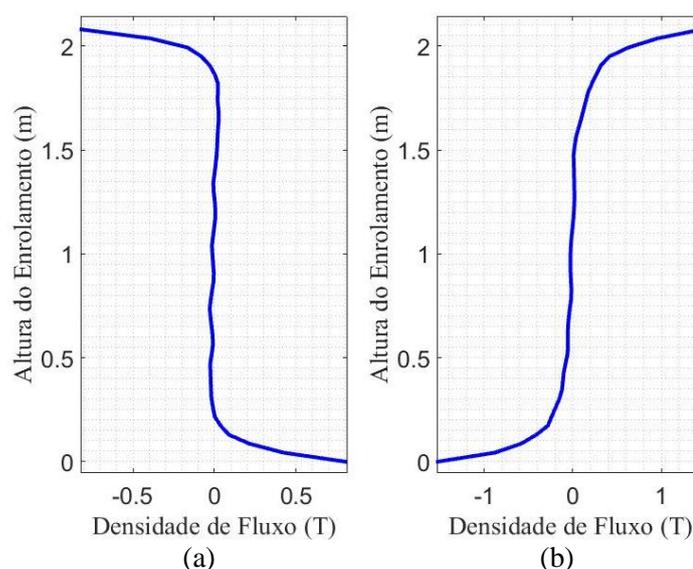
Figura 63 – Densidade de fluxo magnético de dispersão axial nos enrolamentos (a) externo e (b) interno do transformador em condição de curto-circuito.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

A densidade de fluxo magnético de dispersão axial é mais intensa na metade da altura dos enrolamentos (Figura 63). Este aspecto se torna ainda mais danoso para o transformador devido ao fato de que durante o curto-circuito a densidade de fluxo axial obtida equivale em média a 56 vezes o valor máximo obtido para a condição nominal.

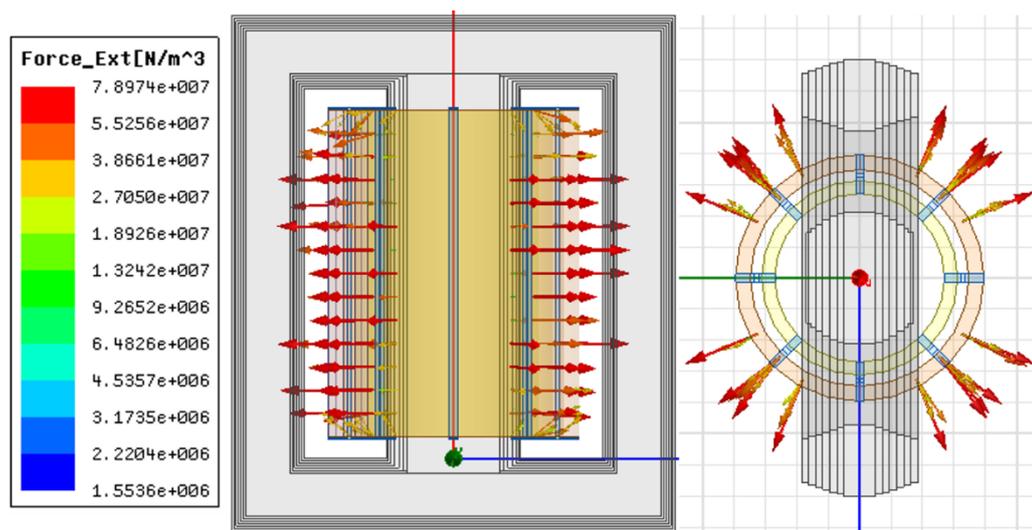
Figura 64 – Densidade de fluxo magnético de dispersão radial nos enrolamentos do transformador em condição de curto-circuito.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Para a densidade de fluxo magnético de dispersão radial (Figura 64) o caso é ainda pior, embora seus valores sejam maiores nas extremidades dos enrolamentos, para a condição de curto-circuito a intensidade desta componente é aproximadamente 100 vezes maior que os valores obtidos na condição nominal.

Figura 65 – Força gerada no enrolamento externo para a condição de curto-circuito.

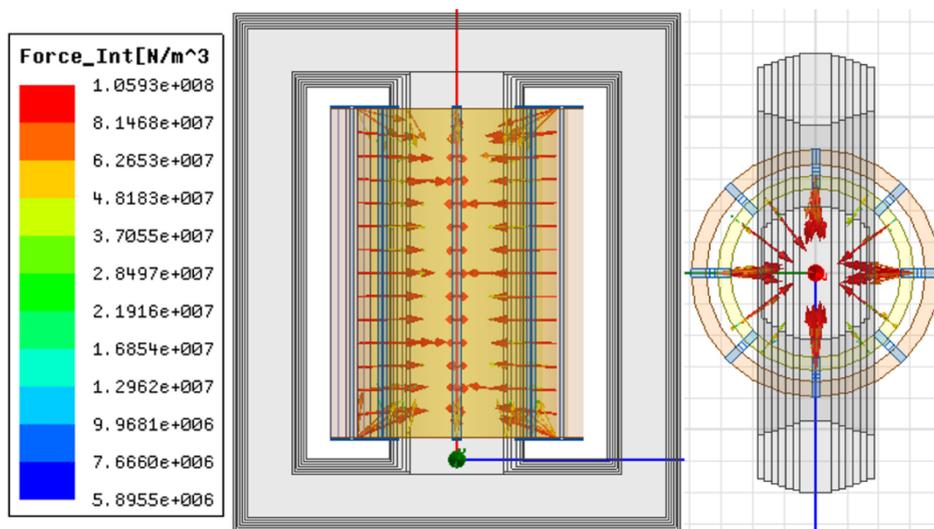


Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Com relação às forças geradas nos enrolamentos energizados com as correntes de curto-circuito (Figuras 65 e 66), nota-se que o comportamento é o mesmo apresentado pela literatura em que as forças geradas no enrolamento externo (Figura 65), que tendem a expandi-lo são mais intensas na metade da altura do enrolamento.

Em contrapartida, as forças geradas no enrolamento interno tendem a comprimir o enrolamento na direção do núcleo, como ilustra a Figura 66. Assim como no enrolamento externo, no interno as forças geradas são mais intensas na metade da altura do enrolamento.

Figura 66 – Força gerada no enrolamento interno para a condição de curto-circuito.

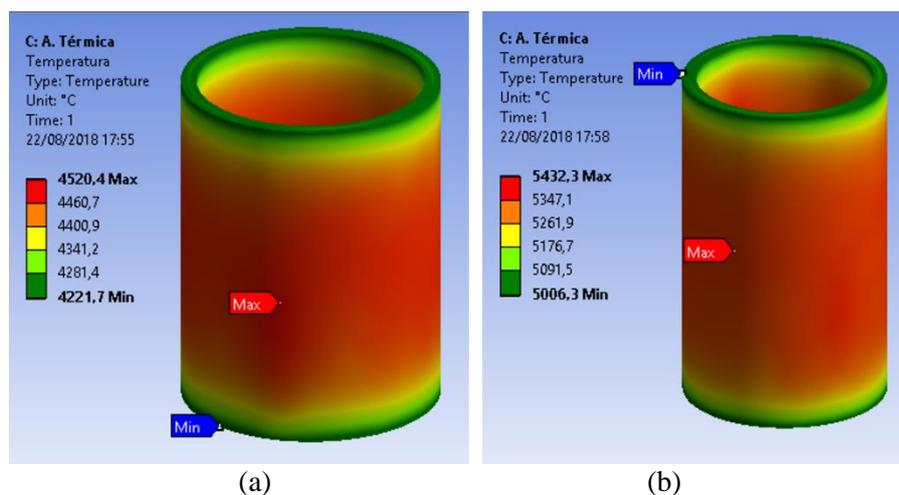


Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Analisando as forças geradas com as correntes de curto-circuito nota-se que alcançaram valores 5.500 vezes maiores que as forças geradas com as correntes nominais de operação, evidenciando o quão destrutivo pode ser um curto-circuito.

Seguindo a metodologia de acoplamento das simulações, os resultados obtidos na análise eletromagnética são implementados para a simulação térmica na qual inicialmente é determinada a distribuição térmica ao longo do enrolamento, bem como as temperaturas máximas que os enrolamentos podem alcançar durante a ocorrência deste transitório.

Figura 67 – Temperatura nos enrolamentos, (a) externo, (b) interno, para a condição de curto-circuito.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

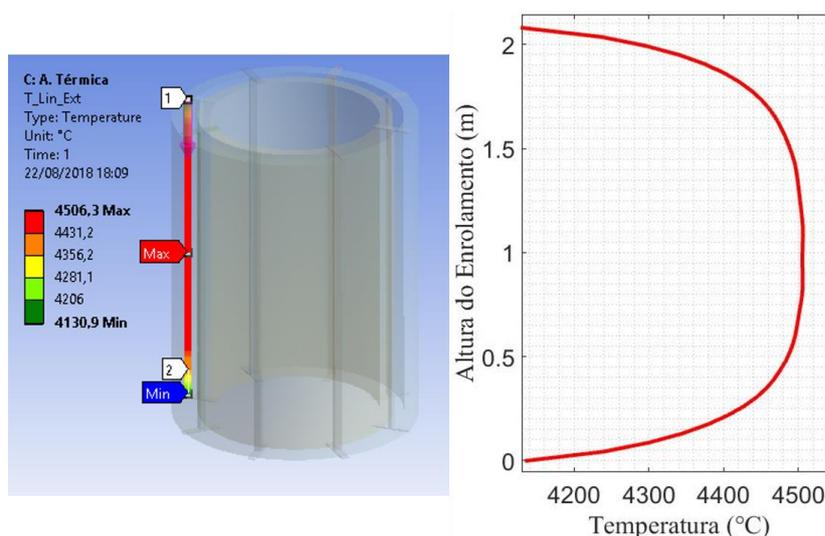
A Figura 67 ilustra as temperaturas que os enrolamentos externo e interno podem chegar durante a ocorrência do curto-circuito. Esta elevação de temperatura pode ser

extremamente prejudicial à integridade física do transformador, podendo facilmente romper o isolamento ou derreter parte dos condutores, impossibilitando a recuperação do equipamento.

Lembrando que nestas análises não considerou-se nenhum elemento de resfriamento do transformador, tais como: óleo, radiador, etc. Estes dispositivos de refrigeração têm a finalidade de, justamente, evitar que a parte ativa do transformador atinja níveis de temperatura tão elevados como aqueles mostrados na simulação térmica. Por norma, os transformadores são equipamentos projetados para operar em uma faixa de temperatura entre -50°C e 200°C .

As Figuras 68 e 69 ilustram de forma detalhada a distribuição da temperatura ao longo dos enrolamentos externo e interno, respectivamente.

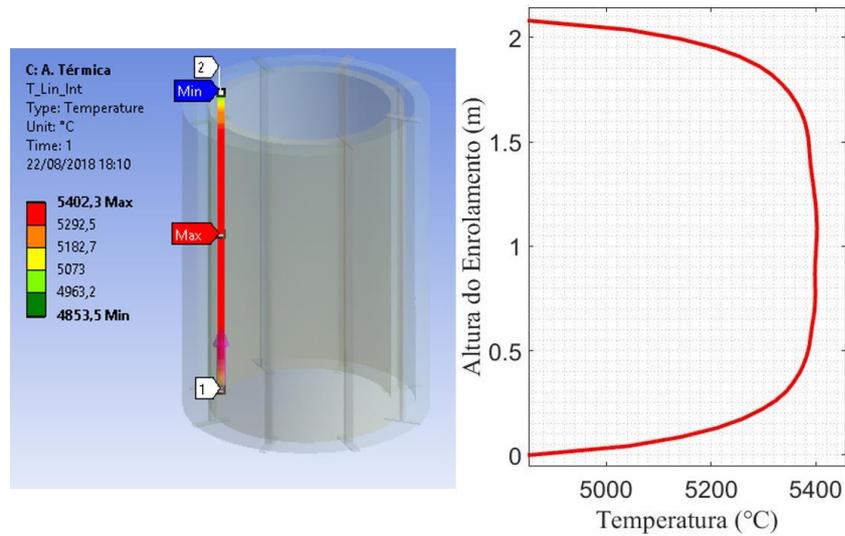
Figura 68 – Comportamento da temperatura ao longo do enrolamento externo para a condição de curto-circuito.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Desse modo, é possível observar que as temperaturas nos enrolamentos interno e externo ultrapassam 4500°C , valor este que viola totalmente a temperatura máxima permitida para o funcionamento do equipamento. Observa-se, ainda, que os pontos mais quentes se concentram na metade da altura dos enrolamentos, fator que torna esta região muito vulnerável à ocorrência de desgastes e falhas.

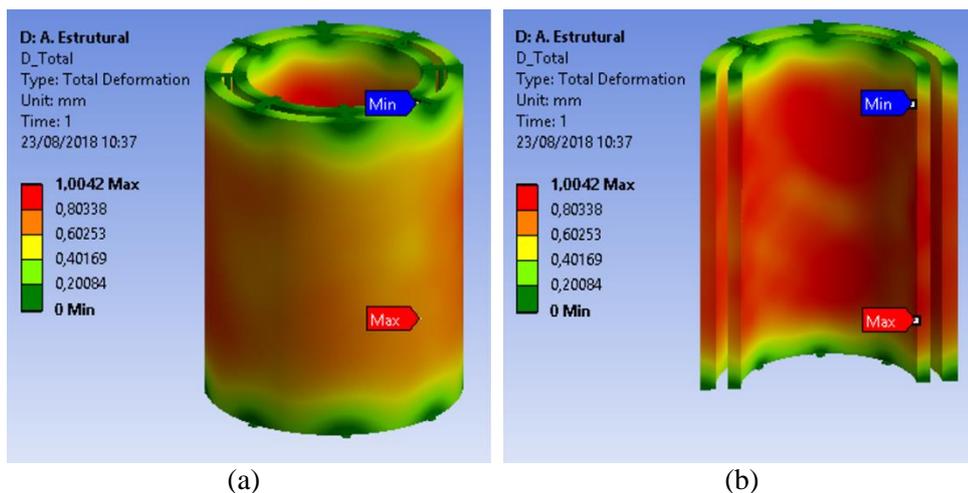
Figura 69 – Comportamento da temperatura ao longo do enrolamento externo para a condição de curto-circuito.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Finalizando a análise térmica, o passo seguinte é realizar a análise estrutural acoplada às demais simulações já executadas para a condição de curto-circuito. Assim, os parâmetros calculados anteriormente, como força eletromagnética, densidade de corrente e temperatura, são inseridos como condição de contorno para avaliar o efeito que esse conjunto de fatores pode ter sobre a deformação estrutural dos enrolamentos do transformador.

Figura 70 – Deformação gerada nos enrolamentos, (a) externo, (b) interno, para a condição de curto-circuito.

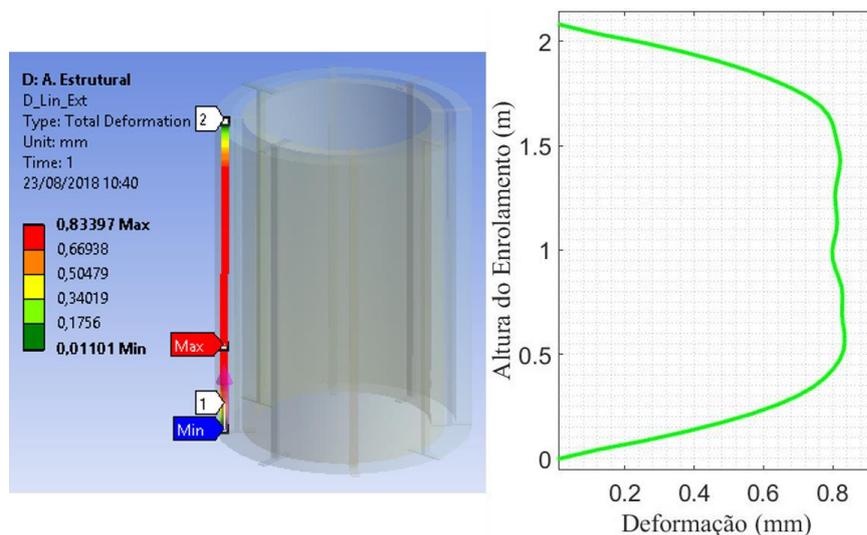


Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Após executar a simulação estrutural, com os resultados obtidos, é possível observar que ocorre uma deformação nos enrolamentos superior a 1 mm nas regiões mais críticas. Esta

deformação, apesar de parecer pequena, é bastante prejudicial à estrutura dos enrolamentos uma vez que pode romper o isolamento facilmente.

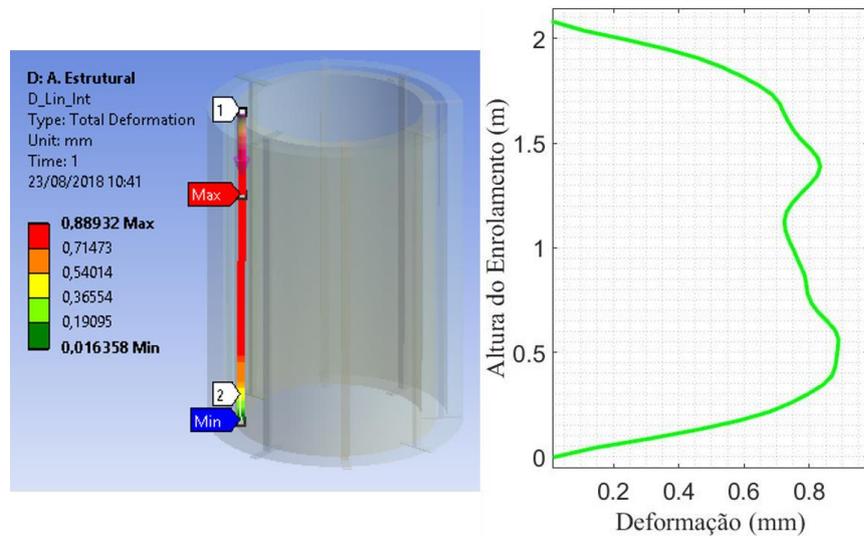
Figura 71 – Comportamento da deformação ao longo do enrolamento externo para a condição de curto-circuito.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

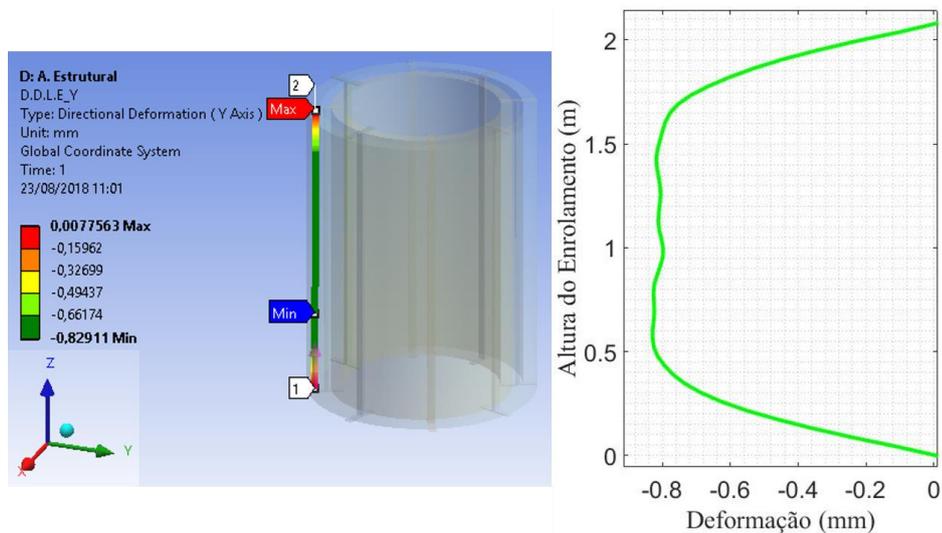
As Figuras 71 e 72 ilustram de forma detalhada a deformação ao longo da altura dos enrolamentos externo e interno, respectivamente. Comparando estes dois resultados, nota-se que o enrolamento interno sofre deformações mais severas que o enrolamento externo. Da mesma forma, observa-se que a deformação ao longo da altura do enrolamento interno varia mais em comparação à deformação no externo.

Figura 72 – Comportamento da deformação ao longo do enrolamento interno para a condição de curto-circuito.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

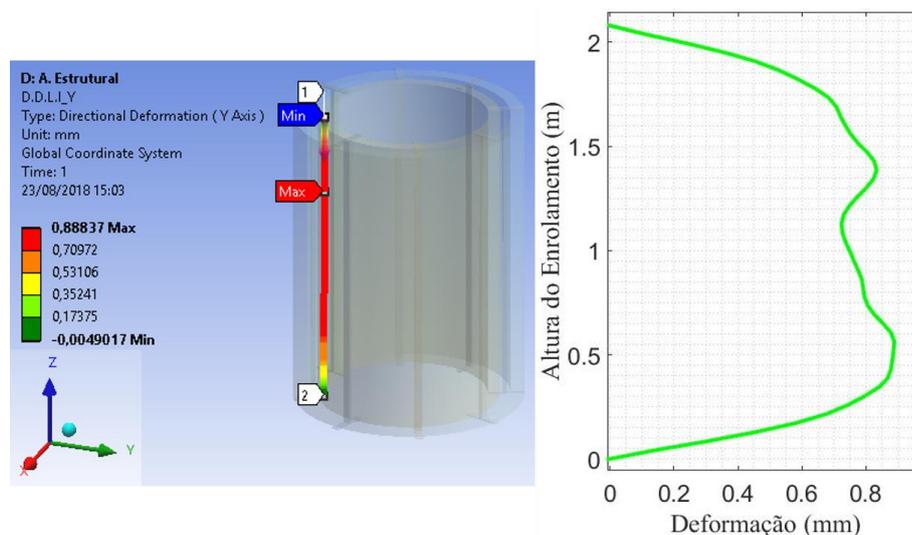
Figura 73 – Deformação na direção do eixo Y no enrolamento externo para a condição de curto-circuito.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

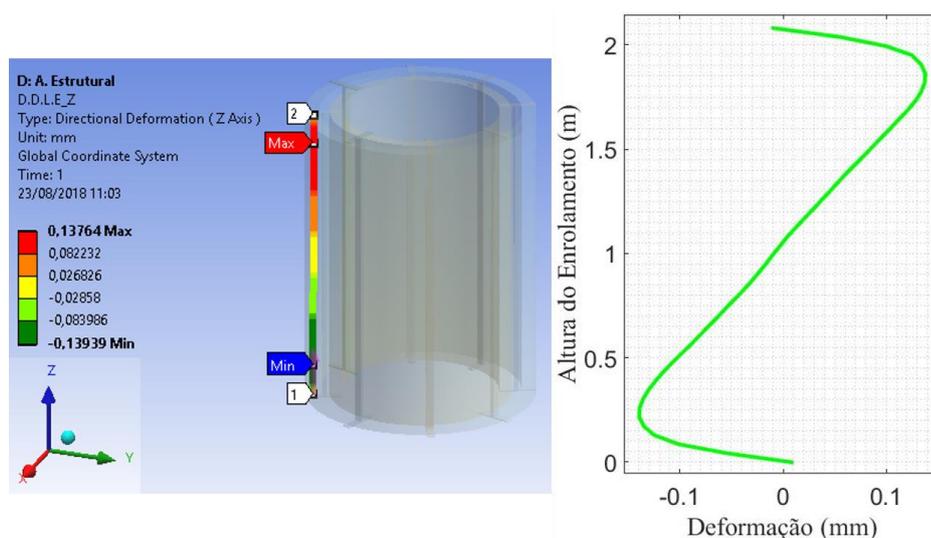
As deformações radiais nos enrolamentos externo e interno (Figuras 73 e 74) para a condição de curto-circuito são mais severas quando comparadas às deformações axiais para a mesma condição, como evidencia-se na densidade de fluxo magnético axial que gera as forças radiais. Logo, as deformações radiais apresentam sentidos opostos de deformação nos enrolamentos, seguindo o comportamento da densidade de fluxo magnético axial nos enrolamentos.

Figura 74 – Deformação na direção do eixo Y no enrolamento interno para a condição de curto-circuito.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

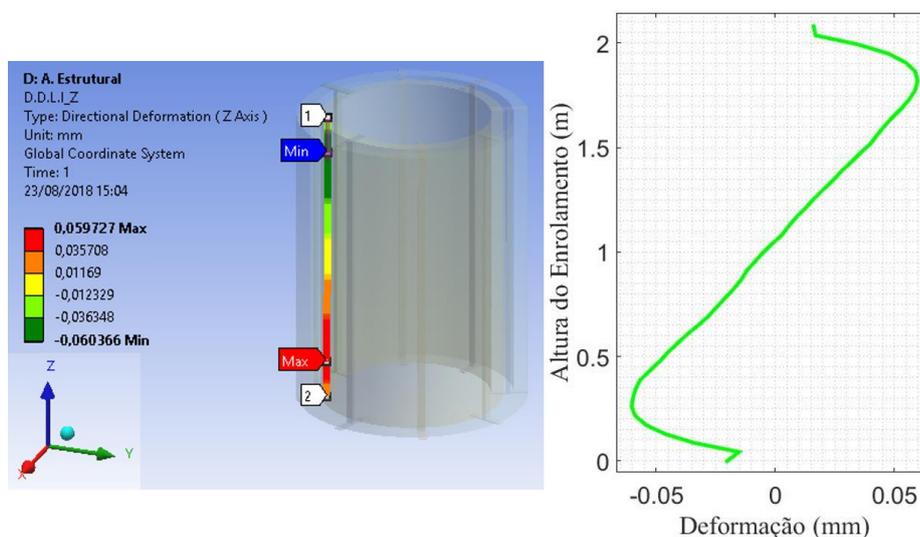
Figura 75 – Deformação na direção do eixo Z no enrolamento externo para a condição de curto-circuito.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

As deformações axiais nos enrolamentos externo e interno (Figuras 75 e 76), respectivamente, apesar de menos intensas que as deformações radiais, também apresentam riscos para a integridade física dos enrolamentos, uma vez que as deformações axiais oriundas das forças geradas por corrente de curto-circuito chegam a ser em média 4.500 vezes superior às mesmas componentes geradas por correntes nominais.

Figura 76 – Deformação na direção do eixo Z no enrolamento interno para a condição de curto-circuito.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

Tomando como base os estudos de Wang et al (2016), onde são analisadas as deformações geradas por correntes de curto-circuito em um transformador de 25 MVA através do acoplamento magnético-estrutural. Onde os autores demonstram que durante um curto-circuito ocorrem deformações plásticas nos enrolamentos, logo o acúmulo dessas deformações podem corroborar com o rompimento do isolamento dos condutores e danificar os espaçadores que fixam as espiras que formam os enrolamentos.

Tabela 4 – Resumo das deformações

Parâmetros	Enrolamento Externo	Enrolamento Interno
Deformação Radial (mm)	0,829	0,888
Deformação Axial (mm)	0,139	0,060
Deormação Total (mm)	0,833	0,889

Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

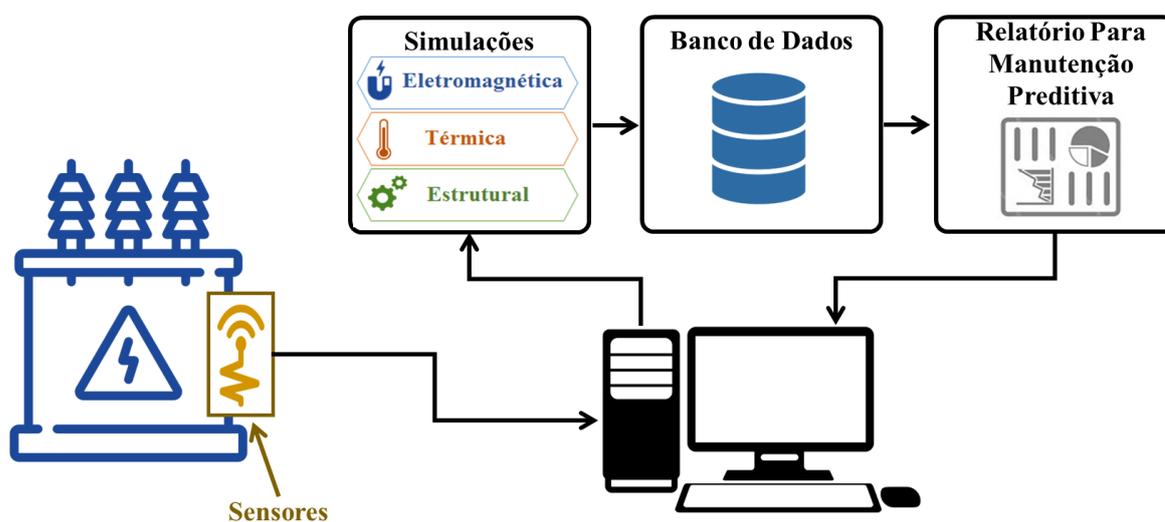
Os resultados de Wang et al (2016), foram proporcionalmente inferiores aos resultados apresentados neste trabalho, isso ocorre devido o fato do transformador utilizado por Wang ter uma potência inferior ao transformador utilizado nesta pesquisa e ainda ao fato de terem sido adotadas simplificações geométricas na modelagem do transformador desta dissertação, entretanto os resultados obtidos (Tabela 4), estão condizentes com a literatura e com o que se espera fisicamente.

5.7 Aplicabilidade da Metodologia Proposta.

A adoção de uma etapa que envolva o desenvolvimento de modelos computacionais para a otimização de projetos de equipamentos é algo que já vêm sendo amplamente utilizado no atual panorama industrial, uma vez que a utilização destes recursos proporcionam um processo produtivo menos dispendioso, pois são realizadas análises mais detalhadas e eficientes com custos menores, sem a necessidade de construção de protótipos na fase inicial.

Por outro lado, a utilização de simulações computacionais acopladas às manutenções preditivas para os equipamentos elétricos ainda não é uma metodologia muito usual, porém torna-se cada vez mais necessária em função da necessidade do sistema elétrico continuar em operação o máximo tempo possível sem paradas para manutenções periódicos, o que resulta em um impacto positivo para a parcela variável. Neste sentido, na presente dissertação foi apresentada a proposta de uma estrutura que torna viável a aplicabilidade de metodologia baseada na modelagem precisa dos transformadores via MEF, para à manutenção preditiva destes, como apresentado na Figura 77, a seguir:

Figura 77: Fluxograma do sistema de monitoramento virtual.



Fonte: O autor da pesquisa, 2018.

A estrutura proposta basicamente é um sistema de monitoramento virtual para cada condição operacional, onde o objeto sob estudo é o transformador, destacando-se porém que a mesma estrutura pode ser replicada para outros equipamentos das subestações. No

transformador são colocados sensores para coletar dados de carregamento em tempo real, seguindo a metodologia de simulações demonstrada nos tópicos anteriores. Estes dados de carregamentos são implementados em uma simulação computacional multifísica, baseada no MEF, onde são levantados e analisados todos os aspectos relevantes que possam reduzir a vida útil do equipamento.

Os resultados desta simulação computacional, são tratados através de um método de inteligência computacional, sendo arquivados e comparados com dados de suportabilidade do equipamento elétrico em um banco de dados especificamente construído para tal inferência. Desta forma, tem-se um histórico de desgaste para o transformador que indicará com antecedência a necessidade da realização de manutenções preditivas, visando prevenir possíveis paradas futuras deste equipamento.

Esta mesma inteligência computacional, baseada no histórico de operação durante o funcionamento do equipamento, deve estimar uma projeção da vida útil do transformador, indicando também aos operadores do sistema, na forma de um relatório, o momento mais oportuno para a realização da manutenção preditiva, que certamente implicará na redução de paradas do sistema elétrico devidas a defeitos neste equipamento, reduzindo em consequência o pagamento de parcela variável pela concessionária.

Conclui-se desta forma que a metodologia apresentada nesta dissertação pode ser aplicada de maneira eficiente, como uma ferramenta valiosa utilizada no prolongamento da vida útil dos transformadores do sistema elétrico de potência, reduzindo por outro lado, os custos com a manutenção regular deste importante e vital equipamento do sistema de energia elétrica.

5.8 Considerações Finais

Neste capítulo procurou-se demonstrar a aplicação da metodologia de simulações multifísicas apresentada nesta dissertação, acoplando simulações eletromagnéticas, térmicas e estruturais de um transformador de 50MVA sob diferentes condições de carregamento, tais como: corrente nominal, corrente de *inrush* e corrente de curto-circuito.

Foram descritos os principais passos para a realização do acoplamento das diferentes etapas das simulações computacionais interligando os dois *softwares* utilizados, Ansoft Maxwell e ANSYS Workbench, para a realização de uma análise multifísica 3D. Como um

dos objetivos pautou-se em mostrar a contribuição que os fenômenos eletromagnéticos, térmicos e estruturais têm para reduzir a vida útil dos transformadores.

A execução da metodologia utilizada foi dividida em 3 condições diferentes. Inicialmente as simulações foram executadas com carregamento de correntes nominais medidas durante o funcionamento do transformador em estudo; foram coletadas, ainda, medições de temperatura nos enrolamentos através de sensores internos no equipamento. Após realizar as simulações, os resultados obtidos foram comparados e validados com os dados coletados durante o funcionamento do transformador.

Para o segundo caso o transformador foi carregado com correntes de *inrush*, onde foram avaliados o aquecimento e as deformações geradas no enrolamento energizado. Analisando os resultados obtidos, verificou-se que podem ocasionar falhas uma vez que o fenômeno de energização ocorre centenas de vezes ao longo da vida útil do transformador.

Como último caso, o transformador foi carregado com correntes de curto-circuito, o que possibilitou avaliar a severidade deste fenômeno transitório sobre os enrolamentos sem pôr em risco a integridade física do equipamento.

E foi demonstrado ainda a ideia de uma estrutura para a aplicação prática na indústria da metodologia apresentada neste trabalho, destacando uma forma de monitorar o estado do transformador em um ambiente visual.

Com isto as avaliações provenientes dos resultados desta dissertação podem contribuir no projeto e na previsão de falhas em transformadores, considerando os desgastes dos materiais gerados por aquecimentos excessivos e deformações dos condutores, desgastes estes evidenciados pelas simulações realizadas.

6 CONCLUSÕES

O acompanhamento do estado de manutenção bem como das condições operativas de transformadores de potência, equipamentos estes estratégicos e de custo elevado ao sistema elétrico de potência, é de fundamental importância para garantir o fornecimento adequado e firme de energia elétrica. Para isto, é necessário reunir informações suficientes relativas às partes integrantes de cada transformador, as quais podem ser obtidas empregando-se um conjunto de técnicas preditivas que permitam uma visão holística destes equipamentos, para se fazer uma avaliação acurada, o diagnóstico e a classificação de seus estados operacionais, permitindo, em decorrência disto, o acompanhamento e o correto planejamento ao que tange à manutenção preventiva destes (MARQUES, 2018).

Dessa forma, foi proposto na presente dissertação uma metodologia de análise computacional utilizando o método de elementos finitos (MEF), onde foram integrados três domínios físicos distintos, eletromagnético, térmico e estrutural, com o intuito de avaliar todas as contribuições que estes têm sobre a redução da vida útil dos transformadores de potência, contribuindo assim para a elaboração de manutenções preditivas mais eficientes nestes equipamentos.

A metodologia proposta foi executada em um transformador de 50 MVA, onde foram simuladas três condições de operação. Primeiro operando em condições nominais. Nesta fase, a metodologia foi validada com resultados coletados e com resultados presentes na literatura. Em seguida, o transformador foi energizado com correntes de *inrush*, onde foi constatado que mesmo sendo um fenômeno menos danoso que um curto-circuito, as correntes de *inrush* por ocorrerem inúmeras vezes durante a vida útil do transformador podem provocar o desgaste do isolamento e danificar severamente o equipamento. Por último, o transformador foi simulado com correntes de curto-circuito, sendo comprovado o quanto esse fenômeno transitório é bastante prejudicial para a parte ativa dos transformadores.

Sendo assim, a aplicação destas técnicas permite avaliar as características e as propriedades dos diversos componentes do equipamento; verificar indicativos e tendências de defeitos e de falhas incipientes; e intervir antecipadamente quando se constatar que determinado transformador apresenta tendência ou se encontra na iminência de falhar. Com estas ações, também se evita, por outro lado, intervenções precoces e substituições de

componentes que ainda apresentem boas condições de uso, minimizando em consequência custos adicionais muitas vezes consideráveis, (MARQUES, 2018).

Afirma-se ainda que não basta somente apresentarem-se os dados e os gráficos resultantes das técnicas preditivas sem se fazer uma análise integrada, correlacionando as grandezas, as classificações individuais e as ações recomendadas em cada técnica, obtendo-se, ao final, uma visão geral, com diagnóstico acurado para auxiliar a manutenção a tomar uma decisão acertada de se intervir ou não no equipamento.

Portanto, conclui-se que a utilização das simulações desenvolvida na presente dissertação pode contribuir de forma significativa com a eficiência operacional e com a redução de custos sem intervenções desnecessárias nos transformadores, visando, dessa forma, a diminuição nas interrupções não programadas e o aumento na qualidade do serviço de fornecimento de energia elétrica ao consumidor final.

6.1 Proposta de trabalhos futuros

Futuros trabalhos podem ser desenvolvidos como continuidade desta pesquisa, de forma a ampliar o desenvolvimento de metodologias para análise multifísica em transformadores, bem como as investigações sobre os efeitos das correntes de *inrush* e correntes de curto-circuito.

Apesar deste trabalho ter atingido seus objetivos, correspondendo principalmente à análise computacional dos comportamentos eletromagnético, térmico e estrutural dos enrolamentos do transformador em estudo, propõem-se como pesquisas futuras dentro deste tema os seguintes tópicos:

- a) Análises multifísicas, considerando toda a atenuação (todos os picos) das correntes de *inrush*.
- b) Análise baseada no *High Frequency Structure Simulator* (HFSS), para avaliação dos harmônicos gerados durante as correntes de *inrush*.
- c) Análise baseada no *Time Stepping Finite Element Method* (TSFEM), para avaliação tridimensional das correntes de *inrush* em transformadores;

Análise da suportabilidade do cobre nos enrolamentos dos transformadores durante os diversos períodos de sua vida útil.

REFERÊNCIAS

- ADDLY, A. A. Computation of inrush current forces on transformer windings. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 37, n. 4, p. 2855-2857, Jul.2001.
- AGUIAR, E. R. **Análise de resposta em frequência aplicada em transformadores de potência**. 2007. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- AHN, H.; KIM, J.; HA, J.; KWAK, K.; OH, Y. and HAHN, S. Computation of transient electromagnetic force on power transformer windings by inrush current. **International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics**, p. 605–612, 2014.
- AHN, H.; OH, Y. H.; KIM, J. K.; J. SONG, S. and HAHN, S. C.Experimental Verification and finite element analysis of short-circuit electromagnetic force for dry-type transformer. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 48, n. 2, p. 819-822, Feb. 2012.
- ALVES, L. M. **Introdução aos métodos aproximados em engenharia**. 2007. 287 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- AZEVEDO, A. C. **Estresse eletromecânico em transformadores causado por curtos-circuitos “passantes” e correntes de energização**. 2007. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- BARNERS, P. R.; DAS, D.; MCCONNELL, B. W.; DYKE, J. W. Supplement to the “Determination Analysis” (ORNL-6847) and Analysis of the NEMA Efficiency Standard for Distribution Transformers. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 1997.
- BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo e cálculo de campo**. 3. ed. Florianópolis: EDUFSC, 1996.
- BARBOSA, S. R. Estudo dos Efeitos da Sobretensão em Transformadores de Potência Aliada a Carregamentos Acima da Potência Nominal. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG – Brasil, 30 de setembro de 2005.
- _____. **Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- _____. **Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática**. 2. ed. Florianópolis: EDUFSC, 2008.
- BEHJAT, V.; VAHEDI, A. Numerical modelling of transformers interturn faults and characterising the faulty transformer behavior under various faults and operating conditions. **IET Electric Power Application**, v. 5, n. 5, p. 415-431, May 2011.

BIANCHI, N. **Electrical machine analysis using finite elements**: basic principles of finite element methods. Nova York: Taylor and Francis Group, 2005.

BIM, E. **Máquinas elétricas e acionamento**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

BOTELHO, D. P. **Desenvolvimento de um processador numérico baseado no Método dos Elementos Finitos no domínio do tempo**. 2010. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

BRONZEADO, H. S.; AZEVEDO, A. C.; DELIABA, A. C.; OLIVEIRA, J. C. e CARVALHO, B. C. Estresse eletromecânico em transformadores: análise no domínio do tempo. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 4., 2007, Minas Gerais. **Anais...** Minas Gerais: Universidade Ceuma, 2007.

BRUSA, E.; PASQUALE, G.; SOMA, A. experimental characterization of electro–thermo–mechanical coupling in gold RF microswitches. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 22, n. 4, p. 919-929, Aug. 2013.

DAWOOD, K.; ALBOYACI, B.; CINAR, M. A. and SONMEZ, O. Modelling and Analysis of Transformer using Numerical and Analytical Methods. In: 18° International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Book of Abstracts, Nov. 2017.

CHIESA, N. **Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation**. 2010. 226 f. Tese (Doutorado em Tecnologia da Informação) – Mathematics and Electrical Engineering Department of Electric Power Engineering, Faculty of Information Technology, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2010.

CIGRE. Working Group 12.19. **The Short Circuit Performance of Power Transformers**, Brochure 209, CIGRE, 2002.

DANESHMAND, S. V.; HEYDARI, H. Multiphysics approach in HTS transformers with different winding schemes. **IEEE Transactions On Applied Superconductivity**, v. 24, n. 2, Apr. 2014.

ELECTRIC POWER INDUSTRY STANDARD OF PEOPLE’S REPUBLIC OF CHINA. **Frequency response analysis on winding deformation of power transformers**. [Std. DL/T911-2004, ICS27.100, F24, Document No. 15182-2005], Jun. 2005.

FITZGERALD, A. E.; UMANS, S. D.; KINGSLEY, J. C. **Máquinas elétricas com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FONSECA, W. S. **Análise de esforços eletromagneto-mecânicos nos enrolamentos de um transformador sob condições de correntes de inrush**. 2016. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

FONSECA, W.S.; LIMA, D. S.; LIMA, A.K.F.; NUNES, M.V.A.; BEZERRA, U.H. and SOEIRO, N. S. Analysis of structural behavior of transformer's winding under inrush current conditions. **IEEE Transactions on Industry Applications**, n. 99, Feb. 2018.

FONSECA, W. S. **Modelagem de esforços eletromecânicos de transformador de núcleo amorfo através do Método de Elementos Finitos**. 2010. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

FRANZEN, A.; KARLSSON, S. **Failure modes and effects analysis of transformers**. Stockholm: Royal Institute of Technology / School of Electrical Engineering, 2007.

GEORGILAKIS, P. S. **Spotlight on modern transformer design**. London; New York: Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2009.

GESUALDO, F. A. R. **Método dos Elementos Finitos**. 2010. 54 f. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

GUIMARÃES, R. **Suportabilidade mecânica e vida útil de transformadores submetidos a correntes de energização e de curto-circuito**. 2013. 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

HAGHJOO, F.; MOSTAFAEI, M.; MOHAMMADZADEH, M. A novel flux-based protection scheme for power transformers. In: **POWER SYSTEMS PROTECTION & CONTROL CONFERENCE**, 9., 2015, Tehran. **Proceedings...** Tehran, Iran: Amirkabir University of Technology, 2015.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER J. **Fundamentos de física: eletromagnetismo**. v. 3. 8. ed. São Paulo: LTC, 2009.

HASHEMNIA, N.; ABU-SIADA, A.; ISLAM, S. Impact of axial displacement on power transformer fra signature. **IEEE Power & Energy Society General Meeting**, v. 25, Nov. 2013.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**. 5.º Ed., Editora Livros Técnicos e Científicos, 2006.

HOLLAUER, C. **Modeling of thermal oxidation and stress effects**. 2007. 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Técnica de Viena Faculdade de Engenharia Elétrica e Tecnologia da Informação, Viena, 2007.

IEEE Std. C57.91-1995. **Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers**. New York: IEEE, 2003.

KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer engineering: design and practice**. New York: Marcel Dekker, 2004.

LAWRENCE, R. R.; RICHARDS, H. E. **Principles of Alternating-Current Machinery**. 1953.

LIMA, D. S.; FONSECA, W. S. Análise computacional de esforços eletromecânicos nos enrolamentos de transformadores ocasionados por corrente de curto-circuito utilizando o Método de Elementos Finitos. In: CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA A INDÚSTRIA, 2014, Caldas Novas. **Anais...** Goiás: UFG, 2014.

LIRA, W. W. M. **Modelagem geométrica para elementos finitos usando multi-regiões e superfícies paramétricas**. 2002. 129p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

LIU, Y. et al. Transformer winding deformation detection analysis and typical cases. **IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)**, 2016.

MAKARAND, S. B.; GAJANAN, C. J.; DHANANJAY, R. T.; PRASAD, A. V.; MAHESH, K. M. and HIRALAL M. S. Online condition monitoring system for substation and service transformers. **IET Electric Power Applications**, Mar. 2017.

MARCELINO, G. V. **Análise de medições das sobrecorrentes de energização de um transformador monofásico**. 2011. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MARQUES, A. P. **Diagnóstico otimizado de transformadores de potência mediante a integração de técnicas preditivas**. 2018. 195 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

MARQUES, A. P.; SOUSA, F. R. C.; BRITO, L. C.; RIBEIRO, C. J.; AZEVEDO, C. H. B.; SANTOS, J. A. L. A. A mathematical contribution to the analysis of moisture migration in power transformer oil-paper insulation systems. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DIAGNOSTIC FOR ELECTRIC MACHINES, 10., Guarda, 2015. **Proceedings...** Guarda: SDEMPED, 2015.

MARTIGNONI, A. **Transformadores**. 7. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987.

MARTÍN, J. C. La Escuela del Técnico Electricista - Teoría, Cálculo y Construcción de Transformadores. 1960.

MARTÍN, J. C. **Teoria, cálculo e construção de transformadores**. 5. ed. Portugal: Labor, 1969.

MEDINA P. M. C. **Falhas em transformadores de potência: uma contribuição para análises, definições, causas e soluções**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

MEEKER, D. **Finite Element Method Magnetics: user's manual version 4.2**. [S.l.], 25 Oct. 2015. Disponível em: <<http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2017.

MENDES, C. A. T. **GeMA, um novo framework para a prototipação, desenvolvimento e integração de simulações multifísicas e multiescalas em grupos multidisciplinares**. 2016. 168 f. Tese (Doutorado em Informática) – Programa de Pós-graduação em Informática, Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

OLIVEIRA, J.C.; COGO, J.R.; ABREU, J.P.G. **Transformadores, Teoria e Ensaio**. Ed. Edgard Blücher, 1a ed., 1984.

ORTIZ, J. L. R.: **Método de Elementos Finitos na simulação de dispositivos eletromagnéticos acoplados a conversores estáticos com laço de controle**. 2002. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

ROSENTINO JUNIOR, A. J. P. **Estimativa dos esforços eletromecânicos em transformadores submetidos a um curto-circuito trifásico**. 2010. 200 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

SARAIVA E. **Um estudo das alterações dos parâmetros de transformadores oriundas de deformações nos enrolamentos: uma contribuição para o diagnóstico de vida útil**. 2011. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SCHMIDT, E. Finite Element analysis of electrical machines and transformers state of the art and future trends. **The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**, v. 30, n. 6, 2011.

SILVA, H. A. B. **Utilização da frequência de 915 mhz para monitoramento e supervisão de isoladores poliméricos classe de tensão de 500 kv**. 2012. 273 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e Tecnológicas, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2012.

SILVA, J. R. **Avaliação “on-line” de temperatura do transformador de potência através de modelagem numérica magnética e termodinâmica**. 2015. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SILVA, J. R.; BASTOS, J. P. A. Analysis of power transformer geometry simplifications on electromagnetic and thermodynamic simulations. **IEEE Transactions On Magnetics**, v. 51, n. 3, Mar. 2015.

SILVA, J. R. **Modelagem para monitoramento térmico de transformadores em operação e avaliação do envelhecimento em função do perfil de carregamento**. 2005. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SILVESTER, P. P.; CHARI, M. V. K. Finite elements solution for saturable magnetic fields problems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS**, United States, v. 89, n. 7, p. 1642-1651, Oct. 1970.

SOUSA, A. R. M.; FONSECA, W.S.; NUNES, M.V.A.; LIMA, D. S. e CONCEIÇÃO, F. W. S. Análise do comportamento termo-magnético do enrolamento de transformadores durante correntes de *inrush*. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 12., Mar del Plata., 2017. **Proceedings...** Argentina: Universidad Nacional de Mar del Plata, 2017.

SOUSA, A. R. M.; FONSECA, W.S.; NUNES, M.V.A. e LIMA, D. S. Análise eletromecânica do comportamento dos enrolamentos de transformadores de potência quando submetidos a transitórios através do Método de Elementos Finitos. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 9., Forleza, 2016. **Anais...** Fortaleza: ABCM, 2016.

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, Jan. 2002.

TAVARES, J. M. R. S. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. [Relatório técnico]. Porto: FEUP, 1998.

TORRES, I. F. R. **Desenvolvimento e aplicação dos Métodos dos Elementos Finitos generalizados em análise tridimensional em análise tridimensional não-linear em sólidos**. 2003. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2003.

UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR. Bureau of Reclamation. **Facilities Instructions, Standards and Techniques (FIST) Manuals**: v. 3-31. United States: United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 2000. Disponível em: <https://www.usbr.gov/power/data/fist/fist3_31/fist3-31.pdf>. Acesso em: 2 set. 2018.

WANG, M.; VANDERMAAR, A.; SRIVASTAVA, K. Review of condition assessment of Power transformers in service. **Electrical Insulation Magazine, IEEE**, v. 18, n. 6, p. 12- 25, Dec. 2002.

WANG, S.; ZHANG, H.; WANG, S.; LI, H. and YUAN, D. Cumulative Deformation Analysis for Transformer Winding Under Short-Circuit Fault Using Magnetic-Structural Coupling Model. **IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 26, NO. 7, OCT 2016**.

WATERS, M. **The short-circuit strength of power transformers**. London: Macdonald, 1966.

YACAMINI, R.; BRONZEADO, H. **Transformer inrush calculations using a coupled electromagnetic model**. Indesing terms. Power system design, Transjormers. 1994.

APENDICE A

Artigos Publicados

Evento: IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – IX CONEM 2016.

Título: Análise Eletromecânica do Comportamento dos Enrolamentos de Transformadores de Potência Quando Submetidos a Transitórios Através do Método de Elementos Finitos.

Resumo: Atualmente, o Sistema Interligado Nacional (SIN) permite a conexão dos diversos tipos de geração no Brasil, como solar, eólica, hidráulica ou termoelétrica. Independentemente da forma, todas podem ser conectadas, permitindo a melhoria da qualidade do fornecimento do produto. Isso é possível através de linhas de transmissão. No entanto, os transformadores de potência são os verdadeiros responsáveis pela conexão entre os centros geradores e os centros consumidores. Os mesmos possibilitam a elevação da tensão aos níveis exigidos pela transmissão, diminuindo consideravelmente as perdas. No entanto, esses equipamentos estão sujeitos frequentemente a falhas. Essas falhas podem ser de origem elétrica, mecânica, química, térmica, entre outras. Todos os componentes do transformador estão sujeitas a falhas, porém neste artigo os enrolamentos serão o objeto de estudo. Outro fenômeno que pode corroborar com falhas nos transformadores é o fenômeno transitório, esse fenômeno provoca o aumento da corrente de energização nos enrolamentos podendo provocar desalinhamento das bobinas, deslocamento das espiras, defeito na isolação e até curto-circuito. Isso é possível devido à interação de forças e das componentes axial e radial. As densidades do fluxo magnético de dispersão axial e radial ao interagirem com a densidade de corrente resultam nas forças radiais e axiais. Portanto, as causas e consequências dessas componentes podem ser simuladas e analisadas preliminarmente. Para isso, utiliza-se o Método de Elementos Finitos (MEF) para a determinação e avaliação dos efeitos das forças atuantes nos enrolamentos do transformador. Esse método permite a observação do equipamento quando submetido a possíveis perturbações na rede elétrica, sendo uma ferramenta poderosa para a simulação de equações diferenciais que regem o comportamento de diversos fenômenos físicos. A solução de um fenômeno relativamente complexo é realizada através da discretização em diversos subproblemas mais simples, sendo estes em elementos triangulares ou tetraédricos. Assim, esse trabalho tem por objetivo apresentar uma

análise dos estresses eletromecânicos desses dispositivos em decorrência dos esforços adicionais provocados por correntes transitórias de energização. Esse fenômeno pode ter duração de dezenas de milissegundos com efeitos atuantes somente nos enrolamentos energizados produzindo correntes com amplitudes de 6 a 8 vezes o valor da corrente nominal do transformador, afetando significativamente a vida útil deste equipamento. Dessa forma, será utilizado um transformador monofásico de 50MVA para as análises em condição nominal e em estado transitório. Todos os resultados computacionais apresentados serão comparados com os obtidos através das equações apresentadas neste trabalho.

Palavras-chave: elementos finitos¹, forças², axial³, radial⁴, transformador⁵

Evento: Decimoséptimo Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré - XVII ERIAC 2017

Título: Análise Eletrotérmica do Comportamento dos Enrolamentos de Transformadores de Potência Quando Submetidos a um Curto-Circuito Através do Método de Elementos Finitos.

Resumo – Atualmente, o Sistema Interligado Nacional (SIN) permite a conexão dos diversos tipos de geração no Brasil, como solar, eólica, hidráulica ou termoelétrica. Independentemente da forma, todas podem ser conectadas, permitindo a melhoria da qualidade do fornecimento do produto. No entanto, os transformadores de potência são os verdadeiros responsáveis pela conexão entre os centros geradores e os centros consumidores. No entanto, esses equipamentos estão sujeitos frequentemente a falhas que podem afetar todos os componentes, porém neste artigo os enrolamentos serão o objeto de estudo. Outro fenômeno que pode corroborar com falhas nos transformadores é o fenômeno transitório, esse fenômeno provoca o aumento da corrente de energização nos enrolamentos. As causas e consequências desses fenômenos podem ser simuladas e analisadas preliminarmente, para isso, utiliza-se o Método de Elementos Finitos (MEF). Assim, esse trabalho tem por objetivo apresentar uma análise térmica dos estresses eletromecânicos desses dispositivos em decorrência dos esforços adicionais provocados por correntes transitórias de energização.

Palavras chave: Transformador, Elementos finitos, Transitórios, Análise térmica

Evento: The 12^o Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2017

Título: Análise do Comportamento Termomagnético do Enrolamento de Transformadores Durante Correntes de *Inrush*.

Resumo - Transformadores de potência são considerados equipamentos vitais para a transmissão e distribuição de energia elétrica, conectando os centros geradores aos centros consumidores. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo investigar e analisar a operação elétrica acoplada ao comportamento térmico dos transformadores de potência através do Método dos Elementos Finitos (MEF), a fim de evidenciar fatores que possam diminuir a vida útil dos equipamentos, corroborando assim o planejamento da manutenção preditiva nele. No desenvolvimento do trabalho foi utilizado um transformador de 50 MVA que está conectado ao sistema de transmissão da região norte do Brasil, as análises foram feitas usando simulações computacionais tridimensionais através de dois softwares. Ao final da análise, verificou-se que o aquecimento excessivo causado pelas correntes de inrush causam expansão térmica nas espiras do enrolamento, o que pode causar ruptura do isolamento, provando um curto-circuito interno e levando a máquina operando.

Palavras chave: Transformador, Corrente de irrupção, Análise térmica, Elementos finitos, Manutenção.