

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

ANÁLISE MAGNÉTICA E MECÂNICA EM TRANSFORMADORES SOB CORRENTES  
DE ENERGIZAÇÃO E ENERGIZAÇÃO SOLIDÁRIA

DIORGE DE SOUZA LIMA

TD: 25 / 2019

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2019



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

DIORGE DE SOUZA LIMA

ANÁLISE MAGNÉTICA E MECÂNICA EM TRANSFORMADORES SOB CORRENTES  
DE ENERGIZAÇÃO E ENERGIZAÇÃO SOLIDÁRIA

TD: 25 / 2019

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2019

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

DIORGE DE SOUZA LIMA

ANÁLISE MAGNÉTICA E MECÂNICA EM TRANSFORMADORES SOB CORRENTES DE  
ENERGIZAÇÃO E ENERGIZAÇÃO SOLIDÁRIA

Tese submetida à Banca Examinadora do  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica da UFPA para a obtenção do grau de  
Doutor em Engenharia Elétrica na área de  
Sistemas de Energia.

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2019

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

---

L732a LIMA, DIOERGE DE SOUZA LIMA  
ANÁLISE MAGNÉTICA E MECÂNICA EM  
TRANSFORMADORES SOB CORRENTES DE  
ENERGIZAÇÃO E ENERGIZAÇÃO SOLIDÁRIA / DIOERGE DE  
SOUZA LIMA LIMA. — 2019.  
170 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra Bezerra  
Coorientador(a): Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca  
Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará,  
Belém, 2019.

1. Transformador de potência. 2. modelagem magneto-  
mecânica. 3. análise estática. 4. análise no domínio do tempo.  
5. método de elementos finitos. I. Título.

CDD 621.30221

---

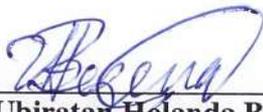
**“ANÁLISE MAGNÉTICA E MECÂNICA EM TRANSFORMADORES SOB  
CORRENTES DE ENERGIZAÇÃO E ENERGIZAÇÃO SOLIDÁRIA”**

AUTOR: **DIORGE DE SOUZA LIMA**

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

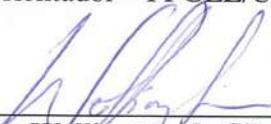
APROVADA EM: 01/10/2019

**BANCA EXAMINADORA:**



---

**Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra**  
(Orientador – PPGEE/UFPA)



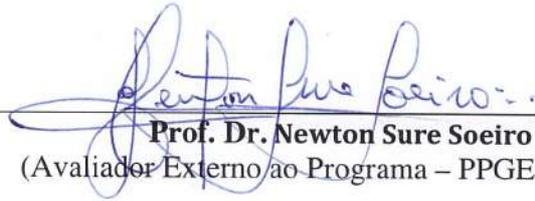
---

**Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca**  
(Co-Orientador – ITEC/UFPA)



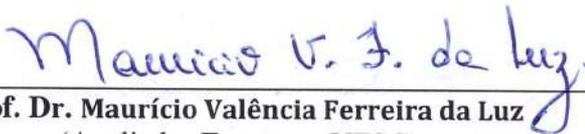
---

**Prof. Dr. Marcus Vinícius Alves Nunes**  
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



---

**Prof. Dr. Newton Sure Soeiro**  
(Avaliador Externo ao Programa – PPGEM/UFPA)



---

**Prof. Dr. Maurício Valência Ferreira da Luz**  
(Avaliador Externo – UFSC)

**VISTO:**

---

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

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo Dom da vida e por me permitir ser sempre mais forte frente aos desafios.

Aos meus pais Elza Maria e Francisco de Assis por estarem sempre ao meu lado em todos os momentos, inclusive os mais difíceis. Ao meu amado irmão Diego Lima e toda a sua Família que sempre estiveram ao meu lado.

Aos meus primos que são irmão de vida, Antonio Roniel e Marcelo Silva. A todos os meus familiares, tios, tias, primos e primas, que estão sempre na torcida. Aos meus amigos Allan Manito e Rodrigo Carvalho pelo apoio quando precisei.

Ao professor Ubiratan Bezerra, por todos os ensinamentos e orientações valorosas ao longo de toda esta etapa. Ao professor Wellington Fonseca, amigo de todas as horas, agradeço por todos os conselhos e discussões produtivas ao longo da orientação.

Aos professores Marcus Vinícius e Newton Soeiro, os meus agradecimentos devido à dedicação, apoio e contribuições que proporcionou a melhoria de todo o trabalho.

Ao professor Mauricio V. F. da Luz agradeço pela sua disponibilidade e a sua valorosa contribuição durante todo o trabalho. Obrigado pelo ensinamento e paciência, proporcionando o engrandecimento deste trabalho.

A todos os meus amigos do CEAMAZON que sempre se estiveram à disposição quando precisei. Aos colegas de trabalhos e amigos da UNIFESSPA – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, assim como a estrutura computacional disponibilizada pelo CTIC – Centro de Tecnologia da Informação e Comunicação para a realização deste trabalho.

Assim, agradeço a todos que de certa forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	I
SUMÁRIO .....	II
LISTA DE FIGURAS .....	V
LISTA DE TABELAS .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VIII
LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS .....	XI
RESUMO.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO CAPÍTULO.....	1
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
1.2.1 ATP .....	5
1.2.2 CORRENTE DE INRUSH.....	6
1.2.3 ENERGIZAÇÃO SOLIDÁRIA ( <i>SYMPATHETIC INRUSH</i> ) .....	8
1.2.4 O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	10
1.2.5 ANÁLISE TRANSITÓRIA NO MEF .....	12
1.3 OBJETIVOS.....	13
1.4 CONTRIBUIÇÕES DA TESE.....	14
1.5 ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	15
2 FALHAS EM TRANSFORMADORES .....	17
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO CAPÍTULO.....	17
2.2 TIPOS DE TRANSFORMADORES .....	18
2.3 FALHAS EM TRANSFORMADORES .....	20
2.3.1 ANÁLISES DE FALHAS.....	20
2.3.2 CUSTOS DAS FALHAS .....	27
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	30
3 ENERGIZAÇÃO EM TRANSFORMADORES .....	31
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO CAPÍTULO.....	31
3.2 CORRENTE DE <i>INRUSH</i> .....	32
3.3 ENERGIZAÇÃO SOLIDÁRIA ( <i>SYMPATHETIC INRUSH</i> ).....	36
3.4 FATORES QUE AFETAM A ENERGIZAÇÃO E MITIGAÇÃO.....	39
3.5 EFEITOS PROVOCADOS PELA ENERGIZAÇÃO .....	40
3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	41
4 MODELAGEM MAGNETO-MECÂNICA COMPUTACIONAL .....	42
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO CAPÍTULO.....	42
4.2 CORRENTE DE <i>INRUSH</i> EM TRANSFORMADORES .....	43
4.3 MÉTODO TRAPEZOIDAL.....	46
4.3.1 FORMULAÇÃO DO CIRCUITO .....	46
4.3.2 SOFTWARE ATP.....	47
4.4 ANÁLISES NO MEF.....	48
4.4.1 <i>SOFTWARE</i> ANSYS MAXWELL .....	50

4.4.2	<i>SOFTWARE</i> ANSYS STRUCTURAL .....	51
4.5	PROBLEMA MAGNETOSTÁTICO .....	52
4.5.1	FORMULAÇÃO EM POTENCIAL VETOR MAGNÉTICO: FORMA FORTE .....	53
4.5.2	FORMULAÇÃO EM POTENCIAL VETOR MAGNÉTICO: FORMA FRACA .....	53
4.6	PROBLEMA MAGNETODINÂMICO .....	54
4.6.1	FORMULAÇÃO EM POTENCIAL VETOR MAGNÉTICO E EM POTENCIAL ESCALAR: FORMA FORTE .....	55
4.6.2	FORMULAÇÃO EM POTENCIAL VETOR MAGNÉTICO E EM POTENCIAL ESCALAR: FORMA FRACA .....	56
4.7	CÁLCULO DA FORÇA DE LAPLACE .....	57
4.8	ACOPLAMENTO MECÂNICO .....	57
4.8.1	ELASTICIDADE LINEAR .....	57
4.8.2	FORMULAÇÃO EM DESLOCAMENTO (CINEMATICAMENTE ADMISSÍVEL) .....	59
4.9	FUNÇÕES DE BASE NODAIS E DE ARESTA .....	60
4.9.1	FUNÇÕES DE BASE OU DE APROXIMAÇÃO NODAIS .....	60
4.9.2	FUNÇÕES DE BASE OU DE APROXIMAÇÃO DE ARESTA .....	61
4.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	62
5	ANÁLISE DO TRANSFORMADOR .....	63
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO CAPÍTULO .....	63
5.2	ESTRUTURA E FUNCIONAMENTOS DOS <i>SOFTWARES</i> .....	64
5.2.1	<i>SOFTWARE</i> ATP .....	64
5.2.2	<i>SOFTWARE</i> ANSYS MAXWELL .....	65
5.2.3	<i>SOFTWARE</i> ANSYS STRUCTURAL .....	66
5.3	ANÁLISES DE ACOPLAMENTOS EM TRANSFORMADORES .....	67
5.4	METODOLOGIA COMPUTACIONAL .....	72
5.5	CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR DE 50MVA .....	75
5.6	SOLUÇÃO DA CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO .....	78
5.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	81
6	RESULTADOS FINAIS .....	83
6.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO CAPÍTULO .....	83
6.2	SOLUÇÃO DO PROBLEMA MAGNÉTICO .....	84
6.2.1	CONDIÇÃO NOMINAL .....	87
6.2.2	ENERGIZAÇÃO SOLIDÁRIA .....	91
6.2.3	CORRENTE DE INRUSH .....	96
6.2.4	ANÁLISE MAGNÉTODINÂMICA .....	101
6.2.5	SÍNTESE DOS RESULTADOS MAGNÉTICOS .....	107
6.3	SOLUÇÃO DO PROBLEMA MECÂNICO .....	108
6.3.1	CONDIÇÃO NOMINAL .....	110
6.3.2	ENERGIZAÇÃO SOLIDÁRIA .....	114
6.3.3	CORRENTE DE <i>INRUSH</i> .....	118
6.3.4	ANÁLISE MECÂNICA TRANSITÓRIA .....	122
6.3.5	SÍNTESE DOS RESULTADOS MECÂNICOS .....	129
6.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	129
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	132

7.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO CAPÍTULO .....	132
7.2	DISPONIBILIDADE E CUSTO COMPUTACIONAL.....	132
7.3	CONCLUSÕES DA TESE.....	133
7.4	DIFICULDADES .....	136
7.5	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	136
ANEXOS .....		138
A.	ANEXO 01: SUBESTAÇÃO GUAMÁ .....	138
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		140

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipo de transformador núcleo envolvido ( <i>core-type</i> ). .....	19
Figura 2 – Tipo de transformador núcleo envolvente ( <i>shell-type</i> ). .....	19
Figura 3 - Taxa de falhas para transformadores em diferentes níveis de tensão. ....	21
Figura 4 – Principais componentes defeituosos em transformadores. ....	23
Figura 5 - Diagrama com as causas e efeitos de falhas em transformadores de potência. ....	25
Figura 6 – Forma de onda da corrente de magnetização em regime permanente produzido pela curva não linear do fluxo magnético do núcleo. ....	33
Figura 7 – Demonstração para o caso da máxima corrente de <i>inrush</i> . ....	34
Figura 8 – Representação da corrente de <i>inrush</i> e o efeito do fluxo residual. ....	35
Figura 9 – Energização solidária ( <i>sympathetic inrush</i> ). ....	36
Figura 10 - Energização solidária em uma conexão em série. ....	37
Figura 11 - Energização solidária em uma conexão em paralelo. ....	38
Figura 12 - Corrente de <i>inrush</i> em transformadores paralelo. ....	38
Figura 13 – Função $f(t)$ e a área $\Delta S$ .....	47
Figura 14 – Demonstração da definição do MEF: (a) problema geométrico complexo. (b) discretização do problema com diversos elementos. (c) elemento tetraédrico. ....	49
Figura 15 – Problema de elasticidade linear definido por um corpo elástico, isotrópico e homogêneo ocupando um domínio $\Omega \in \mathbb{R}^3$ . ....	58
Figura 16 – Entidades geométricas: nó e aresta ( $i, j \in N$ ). ....	61
Figura 17 - Interação entre os acoplamentos de campo em transformadores. ....	69
Figura 18 – Fluxograma com a representação do acoplamento fraco magnético-mecânico. ....	71
Figura 19 – Fluxograma da metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho. ....	73
Figura 20 – Fluxograma para análise da condição de energização do transformador. ....	74
Figura 21 - Demonstração das disposições e dimensões do transformador de 50MVA (medidas em milímetros). ....	76
Figura 22 – Curva de saturação do núcleo do transformador. ....	77
Figura 23 - Dados de ensaios do transformador monofásico de 50MVA. ....	78
Figura 24 – Modelagem dos bancos de transformadores monofásicos da subestação Guamá. ....	79
Figura 25 – Corrente de <i>inrush</i> para o banco 01 de transformadores. ....	80
Figura 26 – Energização solidária para o banco 02 de transformadores. ....	81
Figura 27 – Geometria em 3D do transformador de 50MVA de elementos tetraédricos. ....	85
Figura 28 – Geometria em 3D do transformador de 50MVA de elementos tetraédricos. ....	86
Figura 29 – Indução magnética no núcleo do transformador para a condição nominal. ....	87
Figura 30 – Vetor de indução magnética no enrolamento externo (AT) do transformador para a condição nominal. ....	88
Figura 31 – Indução magnética nas componentes radial e axial sobre para a condição nominal. ....	89
Figura 32 – Vetores das forças magnéticas no enrolamento do transformador em condição nominal. ....	90
Figura 33 – Força magnética em componente radial e axial no enrolamento do transformador para a condição nominal. ....	91
Figura 34 – Indução magnética no núcleo do transformador durante a energização solidária. ....	92
Figura 35 – Vetor de indução magnética no enrolamento externo (AT) do transformador durante a energização solidária. ....	93
Figura 36 – Indução magnética nas componentes radial e axial no enrolamento do transformador durante a energização solidária. ....	94
Figura 37 – Vetores das forças magnéticas no enrolamento do transformador durante a energização solidária. ....	95
Figura 38 – Força magnética em componente radial e axial no enrolamento do transformador durante a energização solidária. ....	96
Figura 39 – Indução magnética no núcleo do transformador durante a corrente de <i>inrush</i> . ....	97
Figura 40 – Vetor de indução magnética no enrolamento externo (AT) do transformador durante a corrente de <i>inrush</i> . ....	98
Figura 41 – Indução magnética nas componentes radial e axial no enrolamento do transformador durante a corrente de <i>inrush</i> . ....	99
Figura 42 – Vetores das forças magnéticas no enrolamento do transformador durante a corrente de <i>inrush</i> . ....	100
Figura 43 – Forças magnéticas em componente radial e axial no enrolamento do transformador durante a corrente de <i>inrush</i> . ....	101
Figura 44 – Indução magnética no núcleo do transformador durante a corrente de <i>inrush</i> em diferentes instantes de tempo. ....	102
Figura 45 – Indução magnética radial no enrolamento externo para a corrente de <i>inrush</i> . ....	103

Figura 46 – Indução magnética axial no enrolamento externo para a corrente de <i>inrush</i> .	104
Figura 47 – Vetores das forças magnéticas no enrolamento do transformador durante a corrente de <i>inrush</i> em diferentes instantes de tempo.	105
Figura 48 – Força radial no enrolamento externo para a corrente de <i>inrush</i> .	106
Figura 49 – Força radial no enrolamento externo para a corrente de <i>inrush</i> .	107
Figura 50 – Modelo em 3D com os enrolamentos do transformador e os espaçadores.	109
Figura 51 – Modelo em 3D utilizado na análise mecânica.	110
Figura 52 – Importação das forças combinadas para a condição nominal.	111
Figura 53 – Deformação total no enrolamento externo (AT) para a condição nominal.	112
Figura 54 – Tensões mecânicas no enrolamento externo (AT) para a condição nominal.	113
Figura 55 – Fator de segurança no enrolamento externo (AT) para a condição nominal.	114
Figura 56 – Importação das forças combinadas para a energização solidária.	115
Figura 57 – Deformação total no enrolamento externo (AT) para a energização solidária.	116
Figura 58 – Tensões mecânicas no enrolamento externo (AT) para a energização solidária.	117
Figura 59 – Fator de segurança no enrolamento externo (AT) para a energização solidária.	118
Figura 60 – Importação das forças combinadas para a corrente de <i>inrush</i> .	119
Figura 61 – Deformação total no enrolamento externo (AT) para corrente de <i>inrush</i> .	120
Figura 62 – Tensões mecânicas no enrolamento externo (AT) para a corrente de <i>inrush</i> .	121
Figura 63 – Fator de segurança no enrolamento externo (AT) para a corrente de <i>inrush</i> .	122
Figura 64 – Deformação total no enrolamento externo (AT) para a simulação no domínio do tempo.	123
Figura 65 – Comportamento da deformação total no enrolamento externo (AT) em função do tempo.	124
Figura 66 – Tensões mecânicas no enrolamento externo (AT) para a simulação no domínio do tempo.	125
Figura 67 – Comportamento das tensões mecânicas no enrolamento externo (AT) em função do tempo.	125
Figura 68 – Fator de segurança no enrolamento externo (AT) para a simulação no domínio do tempo.	126
Figura 69 – Comportamento do fator de segurança no enrolamento externo (AT) em função do tempo.	127
Figura 70 – Comportamento do fator de segurança no enrolamento externo (AT) em função do tempo.	128
Figura 71 – Comportamento da tensão mecânica e deformação no enrolamento externo em função do tempo.	128
Figura 72 - Diagrama unifilar da Subestação Guamá.	139

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Concentração do mercado global de transformadores.....	20
Tabela 2 - Principais causas de falhas em transformadores. ....	22
Tabela 3 – Número de casos de perdas por ano. ....	28
Tabela 4 – Representação dos custos por falhas. ....	28
Tabela 5 – Percentual de falhas em transformadores de potência.....	29
Tabela 6 – Características geométricas dos enrolamentos do transformador.....	76
Tabela 7 – Síntese dos resultados da análise magnética para as diferentes condições de operação do equipamento. .....	108
Tabela 8 – Síntese dos resultados obtidos para o problema mecânico. ....	129

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_1$ e $V_2$	Tensão no enrolamento primário e secundário (V)
$R_1$ e $R_2$	Resistência no enrolamento primário e secundário (Ohm)
$L_1$ e $L_2$	Indutância no enrolamento primário e secundário (Henry)
$R_p$	Resistência no enrolamento primário (Ohm)
$V_p$	Tensão de pico aplicado no enrolamento (V)
$X_s$	Reatância do ar (Ohm)
$A_c$	Área da secção transversal do núcleo
$i_{0 \max}$	Valor de pico máximo da corrente de <i>inrush</i> (A)
$\phi_m$	Fluxo magnético máximo
$\phi_a$	Fluxo magnético de dispersão no ar
$\phi_r$	Fluxo residual
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do vácuo ( $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m)
$B_m$	Indução magnética nominal
$B_r$	Indução residual
$K_1$	Fator de correção para o ângulo de saturação
$K_2$	Fator de correção para o ângulo
$K_1$	Fator de correção para os picos da corrente
$h_w$	Altura do enrolamento
$N$	Número de voltas do enrolamento
$\Delta S$	Variação de área
$\Delta t$	Variação de tempo
$[Y]$	Matriz admitância nodal
$[e(t)]$	Vetor de tensões desconhecidas
$[i(t)]$	Vetor de corrente injetadas
$[I]$	Vetor de corrente da fonte
$\vec{E}$	Vetor de campo elétrico (V/m)
$\vec{H}$	Vetor de campo magnético (A/m)
$\vec{J}$	Densidade superficial de corrente (A/m <sup>2</sup> )

$\vec{B}$	Indução magnética (T)
$\vec{n}$	Vetor normal a superfície em análise
$\vec{A}$	Potencial vetor magnético (Wb/m)
$\mu$	Permeabilidade magnética
$d\vec{F}$	Densidade volumétrica da força
$k$ e $\lambda$	Coefficientes para o cálculo de restrições mecânicas
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\varepsilon$	Tensor de deformação linear
$\sigma$	Estresse no material
$\vec{u}$	Vetor de descolamento
$x$	Comprimento (m)
$\varepsilon_0$	Permissividade relativa no vácuo ( $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m)
$i$	Corrente elétrica (A)
$n_s$	Número de espiras.
$l_s$	Comprimento do solenoide (m)
$\vec{\Phi}$	Fluxo magnético (Wb)
$A_p$	Área do plano perpendicular ao fluxo magnético (m <sup>2</sup> )
$\mu_r$	Permeabilidade magnética específica do material (H/m)
$\rho_v$	Densidade volumétrica de carga (C/m <sup>3</sup> )
$P_T$	Total de perdas no transformador (W)
$I_{(t)}$	Corrente circulante pelo enrolamento (A)
$\omega$	Frequência angular ( $2\pi f$ )
$\alpha$	Relação de transformação
$h$	Altura do enrolamento (m)
$S_n$	Potencia nominal do transformador (MVA)
$V$	Tensão nominal de linha do transformador (V)
$Z$	Impedância do transformador (Ohm)
$\theta$	Ângulo para o calculo da atenuação de <i>inrush</i>
$P_H$	Perda por efeito de histerese (W)
$K_s$	Constante dependente do material usado no núcleo

$R_p$	Resistência do enrolamento primário (Ohm)
$R_S$	Resistência do enrolamento secundário (Ohm)
$I_p$	Corrente no enrolamento primário (A)
$I_S$	Corrente no enrolamento secundário (A)
$\Omega$	Domínio limitado no espaço Euclidiano tridimensional
$\Gamma$	Fronteira do domínio

## LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

<b>ATP</b>	<i>Alternative Transient Program</i>
<b>FEA</b>	<i>Finite Elements Analysis</i>
<b>MEF</b>	Método de Elementos Finitos
<b>TSFEM</b>	<i>Time Stepping Finite Element Method</i>
<b>CIGRE</b>	<i>International Council on Large Electric Systems</i>
<b>CEA</b>	<i>Canadian Electricity Association</i>
<b>ZTZ</b>	<i>Scientific and Engineering Centre</i>
<b>IEC</b>	<i>International Electrotechnical Commission</i>
<b>OLTC</b>	<i>On Load Tap Changer</i>

## RESUMO

O transformador de potência é um dos equipamentos mais importantes no sistema elétrico de potência, permitindo a viabilidade da conexão dos centros geradores aos centros consumidores, mesmo estando a longas distâncias. O seu funcionamento de forma confiável e contínuo é de fundamental importância para a manutenção do serviço estando sujeitos a vários tipos de perturbações que podem acarretar em falhas. Nesta perspectiva, a realização de estudos do comportamento dinâmico dos enrolamentos de transformadores por meio de simulações computacionais, tem sido amplamente utilizada para avaliar de forma segura e precisa o seu funcionamento. Portanto, neste documento é apresentada a metodologia para investigação em um transformador de potência de 50 MVA por meio do método de elementos finitos para análise estática e no domínio do tempo. Com isso, o estudo foi realizado por meio de acoplamentos magneto-mecânico. Na primeira análise (estudo do circuito), utilizou-se do *software* ATPDraw para obter o comportamento da corrente de *inrush* e energização solidária durante a energização do banco de transformadores. Por conseguinte, no *software* ANSYS MAXWELL foram realizados os estudos magnéticos. Para isso, um modelo em 3D próximo ao real foi utilizado (levando em consideração as características da laminação do núcleo e dos enrolamentos, sendo alguns destes em formato de discos). Com isso, são apresentados como resultados o comportamento da indução magnética e das forças magnéticas nos enrolamentos do equipamento. Por fim, no *software* ANSYS STRUCTURAL foram realizados os estudos estruturais (mecânicos). Ainda, da mesma forma como anteriormente, foi utilizado um modelo em 3D próximo ao real, apresentando como resultados o comportamento da deformação total no enrolamento, o estresse mecânico sofrido e o grau de segurança durante a ocorrência da energização. Nas análises estáticas foram considerados três condições de operação: condição nominal, energização solidária e corrente de *inrush*. Para a condição nominal, utilizou-se dos dados de placa do equipamento, para a condição de energização (energização solidária e corrente de *inrush*) foi utilizado a maior amplitude obtida durante a simulação. Ressalta-se que para a análise no domínio do tempo, somente a condição da corrente de *inrush* foi analisada, tanto pelo elevado custo computacional exigido quanto por ser a pior condição constada na análise estática.

Palavras-chaves: transformador de potência, modelagem magneto-mecânica, análise estática, análise no domínio do tempo, método de elementos finitos.

## ABSTRACT

The power transformer is one of the most important equipment in the electric power system, allowing the feasibility of connecting the generating centers to the consumer centers, even over long distances. Reliable and continuous operation is of fundamental importance for service maintenance and is subject to various types of disturbances that can lead to failures. In this perspective, studies of the dynamic behavior of transformer windings through computer simulations have been widely used to safely and accurately evaluate their operation. Therefore, this paper presents the methodology for research on a 50 MVA power transformer using the finite element method for static and time domain analysis. Thus, the study was performed by means of magnetic-mechanical couplings. In the first analysis (circuit study), the ATPDraw software was used to obtain the behavior of the inrush current and solidarity energization during the transformer bank energization. Therefore, in the ANSYS MAXWELL software magnetic studies were performed. For this, a real 3D model was used (taking into account the characteristics of the lamination core and windings, being in disc). Thus, the results of the behavior of magnetic induction and magnetic forces in the windings of the equipment are presented. Finally, in the ANSYS STRUCTURAL software, structural (mechanical) studies were performed. Also, as before, a close-to-real 3D model was used, presenting as results the behavior of the total deformation in the winding, the mechanical stress suffered and the degree of safety during the occurrence of energization. The static studies were considered three operating conditions: nominal condition, sympathetic inrush and inrush current. For the nominal condition, the equipment's plate data was used, for the energizing condition (sympathetic inrush and inrush current) the largest amplitude obtained during the simulation was used. It is noteworthy that for the time domain analysis, only the condition of the inrush current was analyzed, both for the high computational cost required and for being the worst condition in the static analysis.

Key-words: power transformer, magnetic-mechanical modeling, static analysis, time stepping analysis, finite element method.

# CAPÍTULO I

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO CAPÍTULO

O transformador é considerado como um dos mais importantes equipamentos do sistema elétrico de potência. A sua estabilidade quanto ao fornecimento de energia elétrica, influencia diretamente na segurança do sistema (ZHANG et al, 2016). Por isso, os mesmos são os verdadeiros responsáveis para a manutenção da tensão em níveis adequados e ainda, são submetidos frequentemente às solicitações ocasionadas por elevadas amplitudes de corrente durante a sua energização (corrente de *inrush*). Logo, a energização pode ocorrer com frequência, podendo ser representado pelo chaveamento de uma fonte senoidal de tensão que fornece uma carga indutiva com o núcleo magnético (KUMBHAR et al, 2007).

A vida útil e o custo para manutenção e/ou substituição dos transformadores são os fatores fundamentais levado em consideração no desenvolvimento de um projeto. Destaca-se como um dos motivos que podem levar a diminuição da vida útil desses equipamentos é o uso excessivo sem a devida manutenção, proporcionando desgaste excessivo, fadiga térmica e mecânica, sobreaquecimento, elevação na magnitude das forças mecânicas, aumento na vibração, aumento de perdas (tanto no enrolamento quanto no núcleo) e conseqüentemente, danos ao equipamento. Tudo isso, corrobora ao aumento de custos para todo o sistema elétrico (FONSECA et al, 2016).

Grande parte dos defeitos em transformadores são provocados pelos esforços mecânicos, devido às condições de energização, às quais, frequentemente os mesmos são expostos quando conectados às redes elétricas (FONSECA et al, 2010).

Com a saturação do núcleo magnético, a representação precisa do seu comportamento torna-se como o principal desafio para fins de simulação. Além disso, torna-se importante ressaltar a necessidade de parâmetros intrínsecos do equipamento para a obtenção dos resultados precisos e

confiáveis (RUDEZ et al, 2016). O fenômeno da corrente de *inrush* pode ser afetado por vários fatores, por exemplo: o ângulo da fonte de tensão, a densidade de magnetismo residual, a resistência em série, presença de elevadas cargas, estrutura do equipamento, entre outros (KULKARNI & KHAPARDE, 2012).

Devido a isso, os transformadores de potência podem sofrer diversos efeitos, como: elevação nas amplitudes das forças magnéticas nos enrolamentos, distorções na tensão (devido a presença de harmônicos), energização solidária (ocorre durante a energização de um transformador quando outros equipamentos já estão conectados), aumento na vibração (devido ao movimento geométrico das partes), aquecimento (aumento de perdas tanto nos enrolamentos quanto no núcleo), diminuição da vida útil do transformador, entre outros efeitos (FONSECA et al, 2018).

Ainda, pode-se destacar que a energização solidária (*sympathetic inrush*) também pode causar problemas relacionados a qualidade da energia, queda de tensão, e a redução temporária na magnitude da tensão em um ponto do sistema elétrico abaixo dos limites estabelecidos (PENG et al, 2013). Nesta perspectiva, alguns métodos baseados em princípios matemáticos são utilizados para a identificação e posteriormente podem auxiliar na mitigação das elevadas correntes de energização por meio de princípios matemáticos (ZHANG et al, 2018).

Portanto, neste trabalho será apresentada uma análise por meio de acoplamento magneto-mecânico por meio de estudos em um transformador de potência. Na análise do circuito foi possível obter o comportamento da corrente durante a energização do transformador utilizando o *software* ATPDraw (corrente de *inrush* e energização solidária). Posteriormente, esse comportamento foi utilizado na análise magnética (ANSYS MAXWELL) e mecânica (ANSYS STRUCTURAL), ambas por meio de um modelo tridimensional.

Na análise magnética são apresentados como resultados o comportamento da indução magnética no núcleo e no enrolamento do transformador e as forças magnéticas em suas componentes axial e radial no enrolamento do transformador. As forças magnéticas são importadas para o ambiente computacional da análise mecânica, onde serão apresentados como resultados o comportamento estrutural do enrolamento frente às perturbações, como o estresse mecânico, deformação máxima sofrida devido ao carregamento combinado das forças magnéticas e o grau de segurança frente a essas perturbações.

De acordo com Araújo et al (2016), o monitoramento dos efeitos eletromagnéticos em transformadores, como aferir e verificar as forças magnéticas, estresse mecânico, entre outros, é

uma das técnicas que podem ser usadas para prever a ocorrência de falhas mecânicas nos enrolamentos de transformadores. No entanto, a realização dessas medições *in loco* não é trivial, devido à dificuldade de inserir sensores em pontos estratégicos, uma vez que o equipamento está montado. Ainda, deve-se ressaltar que esses sensores apresentam elevados custos. Por outro lado, estudos de comportamento dinâmico nos enrolamentos de transformadores, têm sido amplamente analisados numericamente e os cálculos tem sido a questão segura na operação desses equipamentos. Assim, as simulações computacionais podem ser utilizadas como uma técnica alternativa para monitorar o comportamento das forças magnéticas e do estresse mecânico em transformadores. Com isso, são destacadas algumas características quanto ao desenvolvimento de análises por meio das simulações (AHN et al, 2012; YANG et al, 2013):

- Possibilita a modelagem de transformador em 3D de forma detalhada, para determinar as forças magnéticas e o estresse mecânico por meio do MEF, sendo esta uma técnica consolidada;
- É considerada como uma técnica não evasiva, tendo em vista que não é necessário submeter o equipamento a solicitações severas de operação;
- Possibilita a realização de análises multifísicas, estudos por meios de acoplamentos físicos, como o magnético-mecânico, onde poderão ser avaliados os fenômenos eletromecânicos;
- Não é necessário o uso de sensores para medir as forças magnéticas e o estresse mecânico com intuito de avaliar a integridade do enrolamento;
- Reduz consideravelmente o custo com as análises, sendo possível testar diferentes configurações de projetos, como características de materiais e da geometria;
- Auxiliam na tomada de decisão no processo de desenvolvimento de projeto, de acordo com as intensidades das forças magnéticas e o estresse mecânico que o equipamento será submetido em situações severas.

Após a demonstração sobre a importância em realizar estudos em transformadores quando são submetidos às elevadas amplitudes de correntes durante a energização, que contribuem para o aumento considerável das forças magnéticas e conseqüentemente para a redução da vida útil do equipamento.

Com isso, neste documento é apresentada uma metodologia por meio de um acoplamento magneto-mecânico para auxiliar as investigações em transformadores de potência quando

submetidos a energizações. Para isso, a metodologia foi estruturada em três partes: solução do circuito, obtendo o comportamento das diferentes condições de operação do transformador (energização solidária e corrente de *inrush*); solução do problema magnético, obtendo o comportamento da indução magnética no núcleo do transformador e as forças magnéticas no enrolamento; e por fim a análise do problema mecânico, obtendo as deformações sofridas nos enrolamentos, tensão mecânica máxima e fator de segurança. Com isso, torna-se possível avaliar a integridade do equipamento frente às perturbações sofridas. Ressalta-se que as análises são apresentadas tanto na estática (sendo utilizada a maior amplitude de corrente durante a energização) quanto no domínio do tempo (sendo utilizado um conjunto de picos de correntes durante a energização).

## 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os 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 mais interessadas em evitar falhas de transformadores. Quaisquer que sejam as consequências das falhas, tais eventos são indesejáveis, uma vez que provocam uma redução da confiabilidade geral do sistema, além de impor demanda adicional de mão-de-obra, de recursos financeiros e, de tempo, para que se possa corrigir o problema, além das perdas no fornecimento de energia (BEHJAT & VAHEDI, 2011; FONSECA et al, 2016).

Esses equipamentos são submetidos constantemente a grandes esforços mecânicos, originados principalmente pela interação dos campos magnéticos de seus enrolamentos. Com isso, os mesmos estão sujeitos a defeitos que ocorrem em suas partes ativas (enrolamentos, núcleo, buchas, OLTC) e constituem-se da deformação e/ou desalinhamento dos enrolamentos (WINDERS, 2002; AGUIAR, 2007).

Neste tópico será apresentada uma síntese de publicações de relevância para análises de esforços magnéticos e mecânicos em transformadores, advindos das correntes de energização solidária e que servirão para substanciar a realização desta pesquisa. Para facilitar a compreensão sobre os resultados apresentados das pesquisas desenvolvidas, os mesmos estão agrupados por conteúdos pesquisados, como a seguir apresentados.

### 1.2.1 ATP

O ATP (*Alternative Transient Program*) é considerado como um dos *softwares* mais utilizado nos sistemas elétricos para simulação digital de fenômenos transitórios, sendo de natureza eletromagnética ou eletromecânica. Com esse *software*, uma rede complexa pode ser simulada, além de contar com recursos de modelagens além do cálculo de transitórios (CHIESA et al, 2005).

Diferentes trabalhos foram realizados com objetivo de disponibilizar modelos para diferentes estudos computacionais em sistemas elétricos. Em Dick e Watson (1981) foi apresentado a derivação de um modelo de transformador de três colunas de núcleo empilhado. As principais contribuições deste trabalho foram as propostas de novas curvas de histerese nos modelos e a determinação de parâmetros a partir de medições. Posteriormente, Arturi (1991) apresentou uma técnica para a representação de um transformador elevador em elevada condição de saturação.

Em De León e Semlyen (1994) foi proposto um modelo completo de transformador, sendo derivada de uma abordagem do modelo híbrido, uma combinação de dualidade (características do circuito e da geometria), que foi usado para obter o modelo do ferro do núcleo do transformador e suas próprias técnicas para o cálculo de indutância. Em Bronzeado e Yacamini (1994) foi apresentado um modelo de acoplamento magnético para simulações de corrente de *inrush* em transformadores.

Em Chen (1996) foi desenvolvido e implementado um modelo no *software* ATP baseado na própria topologia do núcleo. Esse modelo utiliza o transformador com um conjunto de indutâncias acopladas. O fluxo concatenado é escolhido como variáveis de estado e as correntes são calculadas a partir da densidade de fluxo magnético.

Por isso, a representação computacional de transformadores se torna complicada devido ao grande número de projetos do núcleo (principalmente devido aos diversos tipos de transformadores) e o fato de que alguns parâmetros desses equipamentos são não lineares e dependentes da frequência. Atribuições físicas em que o comportamento, dependendo da frequência, precisam ser corretamente representados por um modelo de transformador, que são as configurações do núcleo e do enrolamento, indutâncias próprias e mútuas entre os enrolamentos, fluxo concatenado, efeito pelicular e efeito próximo aos enrolamentos, saturação no núcleo, histerese, fuga de corrente e efeitos capacitivos (MARTINEZ & MORK, 2005).

Diversas características podem ser usadas durante a modelagem computacional de um

transformador, tais como: número de fase, características de não linearidade, parâmetros constantes e os que são dependentes da frequência, entre outros. Esses tipos de modelos de transformadores podem ser implementados computacionalmente usando o *software* ATPDraw. Nesta perspectiva, vários trabalhos foram desenvolvidos tendo como objetivo disponibilizar rotinas para a realização de análises em transformadores durante a sua energização. Conforme apresentado por Mork et al (2007a) e Mork et al (2007b) a modelagem de transformadores no domínio do tempo são adequadas para a simulação do comportamento da corrente de *inrush*. Em Mork et al (2007a) foi proposto uma correção topológica para o modelo híbrido de transformadores utilizados em simulações transitórias em baixa e média frequência. Com isso, a implementação computacional e testes do modelo foi realizado para dois transformadores, sendo o primeiro um transformador de 15 kVA de três colunas (208-120V  $\Delta$ -Y), o segundo é um transformador de 150 kVA de cinco colunas (12.470- 208 Y-Y).

Segundo Tokic et al (2015) os modelos de transformadores podem ser separados em duas partes: representação dos enrolamentos e representação do núcleo. A primeira parte é linear e a segunda é não linear, no entanto, ambas as partes são dependentes da frequência. Cada uma apresenta uma finalidade diferente, dependendo o tipo de estudo ao qual será requerido um modelo de transformador.

Para isso, torna-se necessário conhecer especificamente as características dos transformadores analisados. No entanto, destaca-se que esses equipamentos apresentam diferentes geometrias, para os núcleos e para os enrolamentos, ainda apresentam características lineares e não lineares dependentes da frequência, sendo estes alguns dos aspectos que são considerados como complexos durante a sua modelagem. O nível de detalhamento necessário para construir um modelo de transformador específico dependerá do tipo de análise realizada. Logo, para estudos de saturação, fluxo residual, histerese, perdas por correntes parasitas e corrente de energização, um modelo detalhado do núcleo é fundamental para obter resultados precisos (MACHADO, 2014).

### 1.2.2 CORRENTE DE INRUSH

A energização de transformadores é uma operação regular nos sistemas de potência e possibilita que elevadas amplitudes de corrente no enrolamento primário do equipamento sejam alcançadas, chamadas de correntes de *inrush*. O tempo de decaimento da corrente depende de

várias características, como: impedância da linha, reatância de magnetização do transformador, tempo de chaveamento da energização (ângulo de chaveamento), entre outros fatores (KHEDERZADEH, 2010).

Essas correntes geram impactos significativos sobre a estrutura dos enrolamentos dos transformadores devidos aos esforços mecânicos gerados. Contudo, foram realizadas investigações do comportamento e distribuição das forças eletromecânicas produzidas por correntes de energização em transformadores. A partir disso, pode-se constatar que mesmo com picos a cerca de 1/3 menores que a corrente de curto-circuito, a corrente de *inrush* pode produzir forças com amplitudes semelhantes às provocadas pela corrente de curto-circuito, ainda é justificado devido o tempo de duração da corrente de energização, sendo em geral consideravelmente maior quando comparado ao tempo de falta (STEURER & FRÖHLICH, 2002).

As correntes de *inrush* podem apresentar amplitudes de 6 a 8 vezes o valor nominal da corrente do transformador (KULKARNI & KHAPARDE, 2012). Ainda, segundo Nagpal et al (2006), essas correntes podem proporcionar uma queda temporária na tensão devido a impedância entre a fonte e o transformador energizado. A partir disso, vários trabalhos têm sido apresentados com objetivo de apresentar propostas que possam minimizar o efeito das correntes de energização em transformadores. Nessa perspectiva, foi apresentado por Cui et al (2005) uma proposta relativamente simples, de baixo custo de implementação e eficiente para a minimização do efeito da corrente de *inrush*. Para isso, o aumento da impedância no condutor neutro do transformador possibilitou a redução da corrente de energização. Ao energizar cada uma das fases do transformador em sequência, o resistor do neutro se comportava como um resistor em série. Logo, com essa proposta foi possível diminuir consideravelmente a corrente de energização.

Segundo Chiesa et al (2010) as correntes de energização em transformadores proporcionam diminuição no tempo de vida dos equipamentos. Portanto, no mesmo trabalho foram realizadas investigações sobre novas abordagens para minimizar a corrente de *inrush* com uma estratégia do uso de disjuntores de potência. Para o transformador de potência em análise, o primeiro pico da corrente (maior pico obtido durante a corrente de *inrush*) foi reduzido pela metade a partir do uso da estratégia.

A corrente de *inrush* pode ser eficientemente mitigada por meio de uma comutação

controlada. Para isso, realizou-se uma análise comparativa entre as estratégias de mitigação da corrente de energização (comparação entre a dependência do fluxo residual medido e operação dos disjuntores por polos independentes ou ainda, sendo usado em três polos) (GONZÁLEZ et al, 2015).

Em Zhang et al (2017) é apresentado um método baseado em estatística de ordem superior para a discriminação entre a corrente de *inrush* e a falha interna em transformadores de potência. Na proteção destes equipamentos são utilizados os relés para proteger os transformadores de potência dos danos causados por falhas internas. No entanto, a energização de um transformador pode resultar em uma grande corrente diferencial que causa a operação do relé diferencial. Assim sendo, torna-se necessário discriminar a corrente de *inrush* de uma condição de falha interna, para que o relé possa restringir adequadamente.

Ge et al (2019) analisou o comportamento da corrente de *inrush* e das forças magnéticas (componente axial e radial) para diferentes valores de fluxo residual, sendo este um fator que influencia a obtenção de maiores amplitudes da corrente durante a energização. Para isso, foi utilizado o método de elementos finitos acoplado a um circuito externo, para obter as forças que atuam nos enrolamentos do transformador para os diferentes fluxos residuais. A partir disso, pode ser observado que há uma tendência das forças magnéticas geradas nos enrolamentos, sendo proporcionais aos fluxos residuais. Logo, o fluxo residual não influencia apenas na corrente durante a energização, mas também apresenta efeitos significativos nas forças magnéticas nos enrolamentos do transformador.

### 1.2.3 ENERGIZAÇÃO SOLIDÁRIA (*SYMPATHETIC INRUSH*)

Da mesma forma como a corrente de *inrush*, a energização solidária é uma interação simpática entre os transformadores ao qual a sua ocorrência é um fenômeno normal nos sistemas elétricos. Logo, a energização solidária (*sympathetic inrush*) ocorre quando um transformador é conectado em uma rede do sistema elétrico que apresenta outros transformadores que já estão energizados (conectados) (KULKARNI & KHAPARDE, 2012).

Ainda tem sido observado que a energização de transformadores não é perigosa somente por apresentar uma magnitude de corrente considerável, mas também devido a sua rápida taxa de aumento e o longo tempo de exposição (HALIM et al, 2014). Logo, com a exposição frequente dos transformadores aos efeitos da energização, pode ocorrer a deterioração dos enrolamentos

devido aos estresses mecânicos e térmicos, conseqüentemente podendo levar a uma falha.

De acordo com Bronzeado e Yacamini (1995) a interação solidária entre os transformadores podem ocorrer tanto para conexão em série quando em paralelo. Diversos outros trabalhos têm sido apresentados, como principal objetivo identificar a energização solidária, com intuito de propor medidas mitigadoras e posteriormente evitar falhas internas em transformadores.

Logo, em Kumbhar et al (2007) foi investigado o fenômeno da energização solidária usando um circuito de campo transitório não linear acoplado a formulação de método de elementos finitos. Para isso, foram considerados os casos de transformadores conectados em paralelo e em série. Os resultados foram obtidos para um transformador trifásico de 31,5 MVA, que incluiu a investigação de parâmetros que afetam a magnitude e a duração do fenômeno de energização solidária, como a resistência em série, ângulo de chaveamento, densidade de fluxo residual e condição de carga.

Em Tsourakis et al (2012) foi realizado um estudo de energização de um transformador de elevação de 510 MVA conectado a uma usina. A partir desta análise, os resultados apresentaram severas distorções harmônicas e correntes desbalanceadas, ocorrendo a perda de vários motores de 6 kV e também o bloqueio da proteção diferencial dos geradores síncronos. Com isso, foi realizado uma investigação dos fenômenos transitórios associados às possíveis formas de evitar problemas semelhantes no futuro.

Foi proposto em Ozgonenel & Karagol (2014) um método baseado na regra de árvore de decisão para a detecção das correntes de energização. A técnica proposta é baseada no processamento da corrente diferencial. Com isso, a partir da detecção de falhas no isolamento do enrolamento e então a distinção entre a corrente de magnetização e a energização solidária, tendo precisão nos resultados de 100% nas simulações e 95% para estudos com valores reais. As falhas internas eram reconhecidas com precisão a partir das condições da corrente de *inrsuh* em alguns ciclos de amostragem após a ocorrência de uma perturbação.

De forma semelhante, em Rudez et al (2016) foi realizado estudos das causas da energização solidária por reaplicação de fonte de tensão ao transformador, que opera em paralelo com dois ou mais outros transformadores. Para isso, uma abordagem modal para resolver o circuito equivalente expressando equações diferenciais na forma de equações de estado foi utilizada. A partir da derivação de autovalores e autovetores, o fenômeno poderia ser sistematicamente investigado. Finalmente, os resultados da simulação foram comparados com as medições do

fenômeno WANS (*Wide Area Monitoring System*) do fenômeno e as razões para as discrepâncias foram discutidas.

Em Qia et al (2016) foram analisados os fatores que influenciam na energização solidária por meio de simulações dinâmicas, sendo proposto ao fim do trabalho um método para identificação baseado na área de compartilhamento de informações da subestação. Em Marques et al (2018) foi proposto identificar as condições de energização solidária sem a necessidade de definir o limiar, tornando a metodologia compreensível para evitar o deslocamento indesejado do sistema de proteção. A partir dessa metodologia, a proposta mostrou-se ser promissora na identificação e discriminação entre a energização solidária e as falhas internas em transformadores.

Em Zhang et al (2018) foi proposto um método morfológico para identificação da energização solidária, sendo ressaltada uma das primeiras vezes que a morfologia matemática foi utilizada neste campo. Como a corrente diferencial é simétrica (para um caso de falta interna) e assimétrica (para um caso de energização solidária), o método usou um operado morfológico para extrair os picos e vales da corrente diferencial e posteriormente conseguir distinguir da energização solidária.

#### 1.2.4 O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

O MEF for inicialmente proposto em 1940 para análises de fenômenos mecânicos que ocorrem em meios contínuos, e que são descritos por meio de equações diferenciais parciais, com determinadas condições de contorno. Basicamente, o princípio consiste em dividir o domínio (meio contínuo) do problema em sub-regiões de geometria simples (BIANCHI, 2005; FONSECA, 2016).

Em Silvester e Chari (1970) foi proposta a utilização de uma variação do MEF para a solução de problemas não lineares adequados as análises magnéticas, sendo possível realizar a solução de problemas de saturação (equipamentos ferromagnéticos). Posteriormente, o MEF foi amplamente utilizado para a 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).

O Método dos Elementos Finitos foi considerado para direcionar muitas pesquisas, pelo fato do mesmo ser mais adequado para geometrias complexas e apresentar maior similaridade com os resultados experimentais (BARZEGARAN et al, 2010). Um bom exemplo está no trabalho de

Eslamian e Vahidi (2012), onde um novo método analítico para o cálculo da matriz de indutâncias do enrolamento do transformador, com frequências muito elevadas foi comparado com simulações do MEF, usando o *software* FEMM com análises em 2D, para provar a alta precisão da nova técnica por eles apresentada. Assim como no trabalho de Kefalas e Kladas (2012) que desenvolveram uma ferramenta computacional de elementos finitos, para auxiliar fabricantes na concepção de transformadores de distribuição, especificamente para o mercado de energia elétrica.

Em Silva e Bastos (2015) é apresentada a influência das simplificações realizadas nas geometrias de transformadores de potência para a realização das simulações magnéticas e termodinâmica. Isso tendo como objetivo a redução do tempo computacional para obtenção da densidade dos campos elétricos e magnéticos, assim como as temperaturas e o fluxo de calor interno no transformador.

Em Fonseca (2016) foi proposta uma análise do efeito de forças de origem magnética na deformação estrutural no enrolamento do equipamento, como: estresses, deformações e fator de segurança quando submetidos a corrente de energização (correntes de *inrush*). Neste trabalho foi utilizado uma análise em 2D para obter o comportamento das forças magnéticas nos enrolamentos do transformador e uma modelagem em 3D para obter o comportamento estrutural do enrolamento, ambos por meio de *softwares* baseado no uso do método de elementos finitos, visando assim, a obtenção de resultados precisos. Com os resultados pode-se observar que os pontos onde estão localizados os espaçadores apresentam uma fragilidade estrutural devido às forças magnéticas em componentes axiais, o que implica na redução do fator de segurança nos enrolamentos externos.

Em Fonseca et al (2018) foi apresentado uma investigação das forças magnéticas durante a ocorrência de transitórios em transformadores de potência. Para isso, utilizou-se o *software* ATP para obter o comportamento da corrente durante a energização dos transformadores monofásicos de 50 MVA. Posteriormente, foi realizada a análise magnética do equipamento, obtendo o comportamento das forças magnéticas (componentes axiais e radiais), sendo estas utilizadas na análise estrutural, onde foram avaliadas a deformação total sofrida, o estresse mecânico e fator de segurança devido à atuação das forças no enrolamento.

### 1.2.5 ANÁLISE TRANSITÓRIA NO MEF

Em Faiz et al (2011) são analisados o comportamento dinâmico da força magnética em função do tempo para os enrolamentos do transformador quando submetido a corrente de *inrush* e corrente de curto-circuito. Para isso, é utilizado o método de elementos finitos no domínio do tempo (*Time Stepping Finite Element Method – TSFEM*) usando modelos 2D e 3D. As forças magnéticas e a indução magnética são analisadas para avaliar o impacto mecânico com a presença da corrente de *inrush* e curto-circuito. O TSFEM 3D foi usado para avaliar as forças magnéticas e comparado com resultados do TSFEM 2D.

Em Ebrahimi et al (2013) foi apresentada uma metodologia analítica para simular a indução magnética nos transformadores, sendo incluída a característica não linear do material do núcleo, a sua laminação, correntes parasitas e as curvas de histerese simétricas e não simétricas. Por conseguinte, são calculadas analiticamente as amplitudes das correntes na condição estática e em curto-circuito para os enrolamentos AT e BT, assim como as forças axiais e radiais exercidas sobre esses enrolamentos, para as condições de operações citadas anteriormente. Ainda, neste trabalho os resultados de análises com o TSFEM em 3D foram usados para certificar os resultados em análises em 2D. Na abordagem tridimensional as características elétricas e magnéticas do equipamento são levadas em consideração, assim como as dimensões e especificações intrínsecas do dispositivo.

Em Iskender e Najafi (2014) foi usado o TSFEM em 3D para a análise de perdas e a redução da vida útil de transformadores de distribuição com a presença de cargas harmônicas por meio de um modelo tridimensional. As análises são apresentadas o comportamento da indução magnética no enrolamento do transformador com a presença de cargas harmônicas. Ainda, constata-se que com a presença dessas cargas conectadas aos transformadores, as perdas no cobre e as correntes parasitas aumentam consideravelmente.

Em Najafi e Iskender (2016) foi o TSFEM em 2D e 3D foram utilizados para investigar o comportamento da indução magnética e das forças magnéticas em um transformador de distribuição trifásico de 1000 kVA. No estudo, obteve-se como pior condição a situação de falha de um curto-circuito do tipo fase-terra, onde a indução magnética no enrolamento do transformador aumenta consideravelmente, proporcionando assim, maiores intensidades das forças magnéticas.

### 1.3 OBJETIVOS

Ao analisar todos os trabalhos demonstrados na revisão bibliográfica desta tese, sendo demonstrada a importância em realizar estudos e análises em transformadores de potência, tendo em vista que o monitoramento *in loco* dos efeitos eletromecânicos em transformadores é uma técnica não trivial devido à dificuldade em inserir sensores em pontos estratégicos e devido o mesmo apresentar elevados custos. Em contrapartida, os estudos do comportamento dinâmico nos enrolamentos de transformadores por meio de análises computacionais podem ser utilizados como uma ferramenta de auxílio no desenvolvimento de projeto desses equipamentos ou mesmo para monitorar o comportamento das forças magnéticas, da tensão mecânica e o grau de segurança frente às perturbações.

Portanto, o objetivo principal deste trabalho é apresentar uma metodologia para auxiliar as investigações em transformadores por meio de estudos acoplados magneto-mecânico e utilizando-se de modelos tridimensionais para análises estática e no domínio do tempo. Destaca-se que o modelo será o mais próximo ao real, utilizando as características de laminação do núcleo e a disposição em discos dos enrolamentos. Logo, serão apresentados como resultados a indução magnética no núcleo e no enrolamento, as forças magnéticas no enrolamento, deformação total sofrida e o grau de segurança do enrolamento frente às perturbações sofridas durante a sua energização. Para isso, são destacados alguns objetivos específicos:

- Simular o comportamento da corrente de energização (corrente de *inrush* e energização solidária) no banco trifásico dos transformadores disposta em uma subestação;
- Utilizar modelos tridimensionais com característica mais próxima possível da geometria real do transformador, como as características do núcleo (laminação) e as características do enrolamento (formato em discos);
- Realizar um estudo por meio de acoplamento magneto-mecânico em análise estática e transitória para as diferentes condições de operação (condição nominal, energização solidária e corrente de *inrush*);
- Utilizar uma geometria tridimensional com poucas simplificações, mantendo as específicas do equipamento (sendo representados a laminação do núcleo e os enrolamentos em formatos de discos);
- Avaliar a integridade dos enrolamentos do transformador frente às perturbações sofridas

durante a sua energização, sendo apresentadas análises estáticas e no domínio do tempo.

#### 1.4 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A partir do levantamento bibliográfico de diversos trabalhos apresentados neste documento que estão relacionados ao tema proposto nesta tese, pode-se observar a importância em realizar estudos e análises computacionais em transformadores de potência para a realização de investigações das forças magnéticas, deformação, tensão mecânica e grau de segurança do equipamento, sendo estes fatores intrinsecamente relacionados a integridade do equipamento. Destaca-se que este é um método não invasivo que pode ser utilizado para realizar diagnósticos, que tem se tornado cada vez mais frequente devido a dificuldade em realizar medições utilizando sensores, tanto devido ao seu custo quanto a dificuldade em adicioná-los em locais de interesse.

Portanto, nesta tese é apresentada uma metodologia para auxiliar diagnóstico de comportamento dinâmico nos enrolamentos de transformadores de potência. Logo, são apresentados os seguintes aspectos:

- Obter o comportamento da corrente durante a energização do banco de transformadores (energização solidária e corrente de *inrush*), levando em consideração as características não lineares do equipamento, assim como a impedância do próprio sistema elétrico em que o mesmo está conectado.
- Realização de simulações estáticas, sendo utilizado o pico de maior intensidade para a realização das análises magnética e mecânica. Também, para as análises no domínio do tempo, sendo utilizada toda a curva da corrente durante a energização do equipamento para a realização das análises magneto-dinâmica e mecânica transitória e que para ambas as simulações são utilizadas o MEF para as análises;
- Representação por meio de um modelo tridimensional, sendo representadas as características construtivas o mais próximo possível do real, como o núcleo (representado a laminação e as características não lineares do material) e o enrolamento (sendo representados os espaçadores como suportes fixos e os discos do enrolamento);
- Solução do problema por meio de acoplamentos magneto-mecânico, sendo avaliado o comportamento dinâmico no enrolamento externo do transformador frente às perturbações sofrida por meio de modelos em 3D;

- Apresentação de uma metodologia consistente para a realização de investigações nos enrolamentos de transformadores por meio de análises transitórias para o acoplamento magneto-mecânico, quando os mesmos são submetidos à energização.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Sendo estabelecido como concluído o capítulo introdutório deste trabalho, onde foram apresentadas as principais contextualizações do conteúdo proposto e uma breve revisão bibliográfica com os principais trabalhos e pesquisas relacionados ao tema. Por isso, a seguir será apresentada a síntese da organização deste trabalho, na qual serão apresentados os outros quatro capítulos que compõem este documento.

No capítulo II é apresentada a importância da realização de estudos e análises do comportamento dos transformadores. Para isso, são apresentados trabalhos a respeito dos efeitos das correntes de energização sobre a integridade da parte ativa dos transformadores. Logo, apresentam-se os tipos de falhas e suas origens, as quais esses equipamentos são comumente submetidos quando se encontram em operação. Ainda, apresentam-se os dados estatísticos relacionados a essas falhas sendo correlacionado com as suas principais causas e os custos envolvidos com a manutenção e/ou substituição desses equipamentos.

No capítulo III é apresentada de forma breve a fundamentação sobre a corrente de energização em transformadores, sendo estabelecidos os conceitos tanto para a corrente de *inrush* quanto para a energização solidária. Também, são apresentados os principais fatores que afetam o comportamento da corrente durante a energização, assim como a forma para a sua mitigação.

No capítulo IV é apresentada a modelagem magneto-mecânica computacional, onde é ilustrado a formulação do circuito para obter o comportamento da corrente de *inrush*, assim como a modelagem para as simulações, tanto pelo método trapezoidal (*software* ATPDraw) quanto pelo método de elementos finitos (*softwares* ANSYS MAXWELL e ANSYS STRUCTURAL). Também, são apresentadas as formulações analíticas para o cálculo das forças de Lorentz em componente axial e radial, assim como definindo as principais falhas causadas por essas forças.

No capítulo V é apresentada a metodologia utilizada para obtenção dos resultados desta tese. Logo, de forma detalhada são apresentados os principais passos para a estruturação do problema. Destaca-se que a metodologia foi dividida em três etapas: solução do circuito (para obter o comportamento da corrente durante a energização do equipamento); solução do problema

magnético (onde serão obtidos como resultados o comportamento da indução magnética e das forças magnéticas no enrolamento externo do transformador) e a solução do problema mecânico (para obter o comportamento estrutural do enrolamento externo, como deformação sofrida, tensão mecânica e o fator de segurança).

No capítulo VI são apresentados os resultados finais previamente estabelecidos durante a etapa de metodologia. Sendo apresentadas como solução, o comportamento da corrente durante a energização dos transformadores (corrente de *inrush* e energização solidária), a indução magnética no enrolamento e no núcleo, as forças magnéticas, a deformação, tensão mecânica e o grau de segurança frente às perturbações. Destaca-se que as análises são apresentadas para operação na condição estática e no domínio do tempo.

No capítulo VII são apresentadas as considerações finais da tese, assim como as características do equipamento utilizado para a realização das análises, as dificuldades encontradas e as propostas futuras para a continuidade dos estudos.

# CAPÍTULO II

## 2 FALHAS EM TRANSFORMADORES

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO CAPÍTULO

O acompanhamento e monitoramento de transformadores de potência, em relação ao sistema de isolamento, às condições operativas e de funcionamento de seus acessórios e de seus componentes, são essenciais para reduzir os custos associados a sua manutenção e reparo no seu ciclo de vida, bem como garantir a confiabilidade e durabilidade desses equipamentos.

As falhas em transformadores podem ser devidas a diversas causas sem serem necessariamente de origem elétrica. Para que se tenha uma visão holística dessas causas, deve-se verificar todos os parâmetros envolvidos no problema que incluem desde as condições ambientes até os componentes do transformador (BARTLEY, 2003). No entanto, as falhas nos componentes desses equipamentos podem ser de diferentes naturezas, tais como o envelhecimento do isolamento, falhas de projeto, realização de logística inadequada ou falhas diversas (CHMURA et al, 2011).

Ainda, essas falhas podem causar a diminuição nos índices de qualidade da energia em empresas do setor elétrico, bem como danos, multas e perda de receita devido ao não fornecimento do produto (energia). Com isso, Araújo et al (2016) afirmam sobre a importância em monitorar os transformadores para executar a manutenção preditiva e evitar as paradas não programadas. Com isso, as técnicas de fabricação têm sido aprimoradas no sentido de aumentar a confiabilidade do equipamento. Portanto, neste capítulo será apresentada tanto a classificação das falhas quanto as principais características dos transformadores de potência, além de dados estatísticos sobre as principais causas de falhas nesses equipamentos.

## 2.2 TIPOS DE TRANSFORMADORES

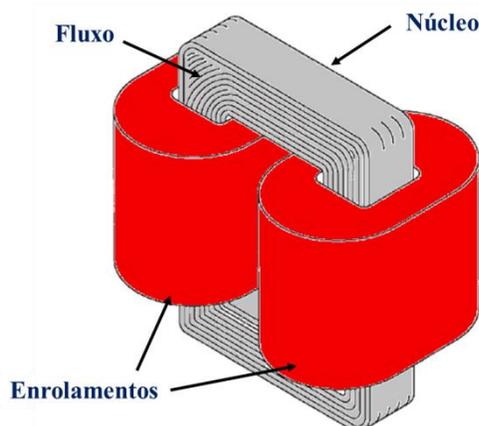
A classificação dos transformadores é realizada a partir da potência e da tensão. Logo, os transformadores podem ser referidos como de distribuição (potência em até 2,5 MVA e tensão nominal em até 36 kV), de potência (todos com potência tensão superior a 2,5 MVA) (AMOIRALES et al, 2009).

Basicamente, existem três principais tipos de transformadores de potência, ou seja: transformadores imersos em óleo, a gás isolado e a seco (METWALLY, 2011). Os transformadores imersos em óleo são economicamente viáveis para uma ampla gama de tensão de alimentação. Estes transformadores usam enrolamentos envolvidos em papel que estão imersos em óleo mineral, que por sua vez serve tanto como isolamento, quanto como um meio de arrefecimento.

Os transformadores com isolamento a gás utilizam filme de polietileno tereftalato (PET) para o isolamento dos enrolamentos, os quais são colocados em um tanque selado preenchido por gás SF<sub>6</sub> (hexafluoreto de enxofre), que arrefece os enrolamentos e os protege da contaminação. Os transformadores do tipo seco podem ter os seus enrolamentos isolados de diferentes maneiras. Uma das formas é mergulhar os enrolamentos pré-aquecidos em verniz à elevada temperatura (METWALLY, 2011).

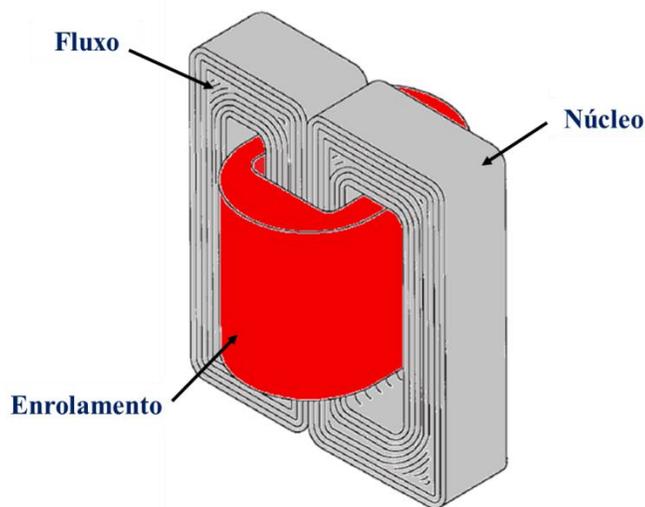
Ainda, os transformadores apresentam diversas formas para a construção de suas estruturas, podendo ser destacadas as duas que são mais empregadas em transformadores de potência: núcleo envolvido (*core-type*) e núcleo envolvente (*shell-type*) (MARTIN, 1969).

Nos transformadores do tipo núcleo envolvido os enrolamentos são construídos em forma cilíndrica e montados concentricamente em torno do núcleo, sendo que geralmente o enrolamento de baixa tensão (BT) é o cilindro interno e enrolamento de alta tensão (AT) é o cilindro externo. Nesta configuração os campos magnéticos estão em volta da parte externa da bobina, conforme apresentado na Figura (1).

Figura 1 – Tipo de transformador núcleo envolvido (*core-type*).

Fonte: HARLOW, 2006, p. 57.

Na Figura (2) é apresentada a outra forma de construção, conhecida como núcleo envolvente em que os enrolamentos são dispostos em forma de discos podendo ter os enrolamentos de baixa tensão (BT) e alta tensão (AT), ambos alternados em camadas. Os transformadores com essa configuração apresentam-se com maior robustez mecânica quando comparados ao do tipo núcleo envolvido. Assim, pode-se observar que para esta configuração a bobina fica em volta do núcleo.

Figura 2 – Tipo de transformador núcleo envolvente (*shell-type*).

Fonte: HARLOW, 2006, p. 57.

Destaca-se que o transformador a ser utilizado nos estudos desta tese é do tipo núcleo envolvente imerso em óleo mineral isolante.

## 2.3 FALHAS EM TRANSFORMADORES

De acordo com Metwally (2011) os transformadores de potência são os componentes de maior custo e estratégicos nos sistemas elétricos de energia. Esses equipamentos desempenham um papel importante no sistema elétrico, pois permite a conexão em todos os níveis de tensão (sistema de transmissão e distribuição de energia) (WARDANI et al, 2011).

Praticamente o transformador de potência é um dos equipamentos de alto risco do sistema e energia elétrica, devido às severas condições de operação que os mesmos são submetidos, como altas temperaturas, sobrecarga, carregamento de emergência, operação contínua e as condições externas da natureza. Estas condições podem propiciar uma falha não planejada nesses equipamentos. A partir disso, todo o sistema elétrico pode ser afetado (ABDELFATAH et al, 2011). Portanto, a seguir são apresentados os tópicos referente a análise das principais falhas em transformadores e o custo que pode representar as empresas do setor elétrico.

### 2.3.1 ANÁLISES DE FALHAS

Os transformadores de potência como um dos dispositivos mais importantes do sistema elétrico, tendo o seu desempenho confiável e contínuo é principal equipamento que permite a viabilidade econômica para a transmissão de energia elétrica. Portanto, uma boa estratégia de manutenção torna-se crucial no sistema elétrico, tendo como objetivo evitar falhas inesperadas (CHRISTINA et al, 2018). Ainda, de acordo com Metwally (2011) a demanda de energia no mundo tem aumentado a uma taxa de crescimento anual de 2,4%, juntamente a isso, aumenta a quantidade de dispositivos e equipamentos na rede elétrica. Na Tabela (1) são apresentadas as informações sobre a concentração do mercado global de transformadores nos países.

Tabela 1 – Concentração do mercado global de transformadores.

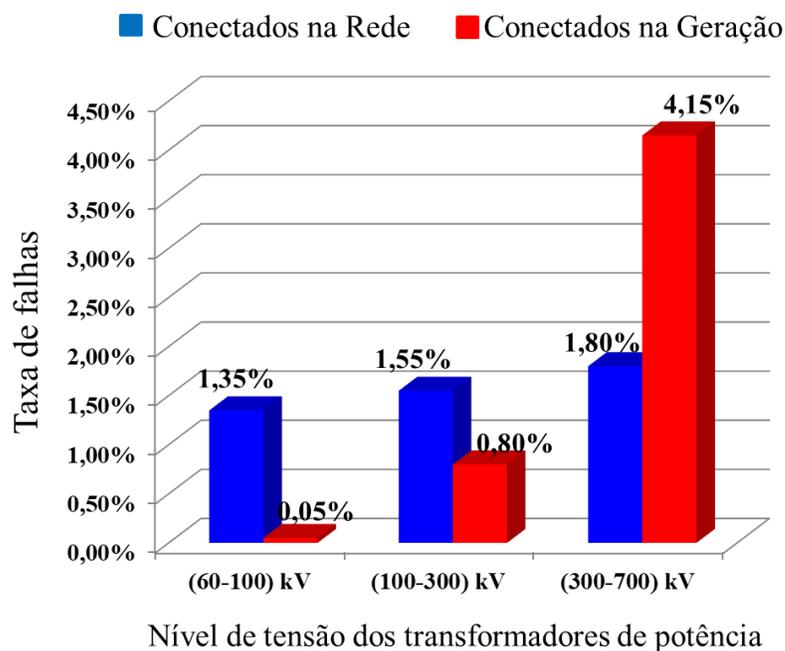
PAÍSES	ANO		
	2002 (%)	2007 (%)	2012 (%)
China	21,82	26,22	26,20
Estados Unidos	32,02	18,47	16,51
Índia	6,29	7,65	8,69
Japão	5,45	5,41	4,95
Rússia	2,43	4,99	5,41
Canadá	1,71	2,04	1,80

PAÍSES	ANO		
	2002 (%)	2007 (%)	2012 (%)
Alemanha	2,28	1,91	2,14
Coreia do Sul	1,18	1,66	2,04
Brasil	1,40	1,49	1,29
Reino Unido	1,74	1,46	1,28
Restante do Mundo	28,70	29,69	23,68
TOTAL	100,00	100,00	100,00

Fonte: METWALLY, 2011, p. 38.

Os transformadores estão sujeitos constantemente a condições de falhas. Em Kumar et al (2010) é demonstrado os esforços realizados para analisar e compreender as possíveis causas que contribuem para as falhas em transformadores. Para isso, os modos de falhas em transformadores foram classificados em três partes: elétrica, mecânica e térmica. Em Metwally (2011) é apresentado que as maiores taxas de falhas em transformadores ocorrem em equipamentos conectados a elevados níveis de tensão, conforme apresentado na Figura (3).

Figura 3 - Taxa de falhas para transformadores em diferentes níveis de tensão.



Fonte: METWALLY, 2011, modificada.

Na legenda da Figura (3) utiliza-se dos termos para os transformadores de potência: aos equipamentos que estão conectados na rede e aos equipamentos conectados na geração. Os

transformadores de potência conectados na rede em sua grande maioria estão dispostos em subestações, conectado ao sistema de transmissão. Os transformadores de potência conectados na geração são os equipamentos próximos às usinas ou unidades geradoras de energia, responsáveis pela elevação dos níveis de tensão da geração para os níveis de transmissão.

Outra característica que diferem esses equipamentos é devido a sua natureza de carga ser diferente. Os transformadores conectados na geração normalmente são carregados de acordo com a sua potência nominal, diferentemente dos transformadores conectados a rede, onde geralmente apresentam carregamentos superiores a sua potência nominal, principalmente em situações de emergência.

Ainda, na Figura (3) é demonstrado que os transformadores conectados na rede apresentam maiores taxa de falhas se comparado aos transformadores conectados na geração para os níveis de tensão (60-100 kV e 100-300kV). Essas informações corroboram a importância em realizar estudos e análises sobre a ocorrência de falhas em transformadores de potência conectados ao sistema elétrico. Segundo Wang et al (2002), um dos fatores determinantes para a ocorrência de falhas nesse equipamento se refere a deterioração das próprias características mecânicas e elétricas dos materiais utilizados em sua fabricação, ao longo de sua vida útil. As falhas em transformadores podem ocorrer como resultados de diferentes causas e condições tanto na instalação quanto as condições operativas.

De um modo geral, estas falhas podem ser classificadas como sendo de origem elétrica, mecânica ou térmica. Na Tabela (2) são apresentadas as causas típicas de falhas em transformadores, utilizando como forma de classificação sua natureza, seja devido a causas internas ou causas externas ao equipamento (WNAG et al, 2002).

Tabela 2 - Principais causas de falhas em transformadores.

<b>Falhas em transformadores</b>	
<b>Causas das falhas</b>	<b>Descrição das falhas</b>
Causas Internas	- Deterioração da isolação
	- Perda de fixação no enrolamento
	- Superaquecimento
	- Umidade
	- Contaminação do óleo mineral isolante
	- Ressonância no enrolamento

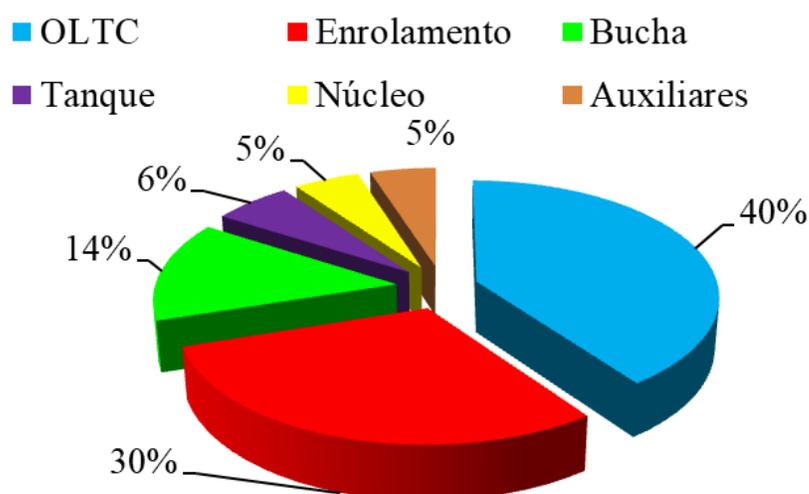
Falhas em transformadores	
Causas das falhas	Descrição das falhas
	- Projeto e fabricação com defeitos
Causas Externas	- Descargas atmosféricas
	- Operações com chaveamento do sistema
	- Sistema sobrecarregado
	- Falhas no sistema (curto-circuito)

FONTE: WNAG et al, 2002, p. 13.

Conforme apresentado em Wang et al (2002), a partir da realização de diversas pesquisas e levantamentos para analisar as principais causas que contribuem efetivamente para as falhas em transformadores pode-se classificar em três partes os modos de falhas em transformadores de potência, sendo: elétrica, mecânica e térmica.

A partir dos resultados de análises de falhas é revelado que predominantemente as falhas ocorrem em vários componentes dos transformadores de potência. Portanto, as falhas relacionadas aos componentes do transformador podem ser exploradas para identificar as possíveis razões para suas causas. A Figura (4) demonstra a estatística de falhas dos principais componentes defeituosos em transformadores. Pode-se observar que além da parte ativa do transformador (enrolamento e núcleo) as buchas e o OLTC (*On Load Tap Changer*) devem ser monitorados, devido a elevada estatística de falhas (METWALLY, 2011).

Figura 4 – Principais componentes defeituosos em transformadores.



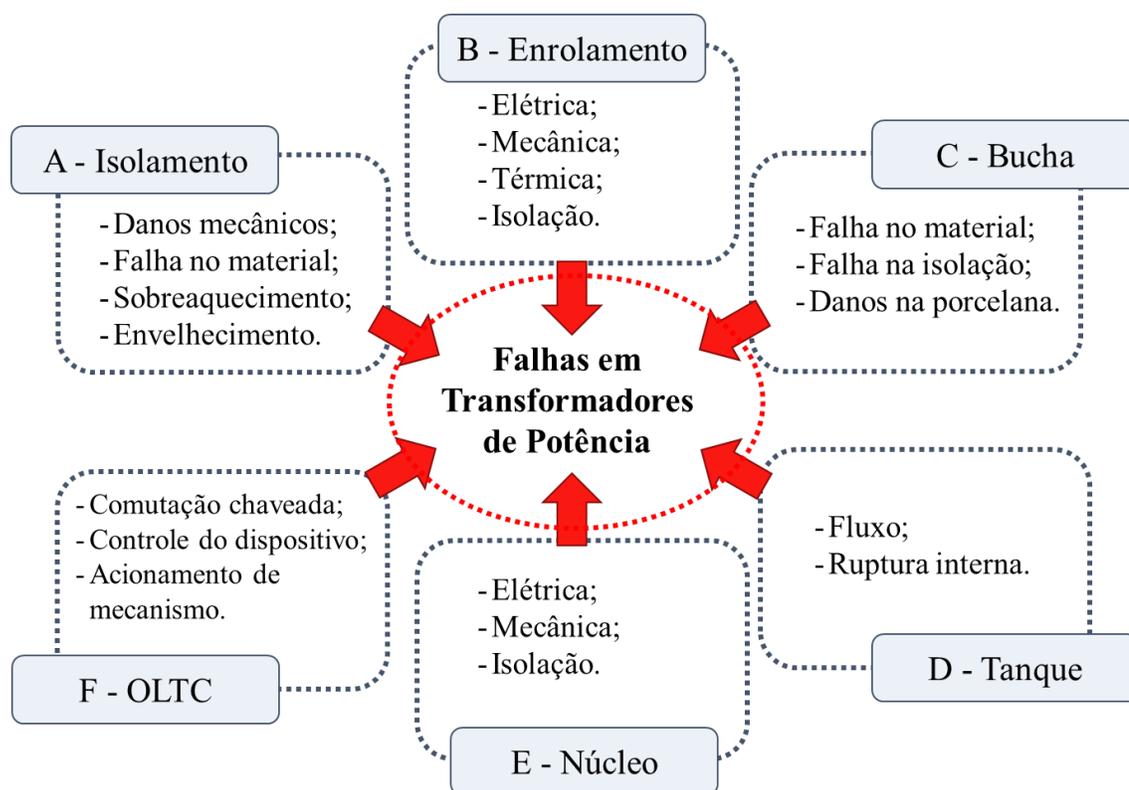
Fonte: METWALLY, 2011, modificada.

Dessa mesma forma, diversos outros trabalhos têm apresentado estatísticas de falhas em transformadores para diferentes concessionárias e empresas no mundo. Como apresentado em Minhas et al (1999) uma análise de falhas nos transformadores de potência em uma rede elétrica na África do Sul (período de 1985-1995), sendo identificados modos de falhas, incluindo as descargas atmosféricas, núcleo, falhas no comutador, envelhecimento e curto-circuito.

De forma similar, nos estudos realizados por Janger et al (2007) afirma-se que cerca de 80% das causas de interrupção é devido a falhas nas buchas, comutadores e enrolamentos dos transformadores. Ainda, o núcleo representa pouca contribuição de falha, no entanto, o comutador e as buchas são as causas predominantes de falhas em transformadores que operam a tensão nominal de 110-150 kV (JONGEN et al, 2007).

Em Murugan e Ramasamy (2015) foi realizada uma análise de falhas em transformadores de potência sobre as possíveis causas e sistematicamente investigadas nas concessionárias de energia elétrica na Índia. Para isso, tomou-se como base 196 casos de falhas entre os anos de 2009-2013. Para a realização dessas análises de falhas, os resultados são apresentados em duas fases. Na primeira análise, foram apresentadas as falhas baseada ao nível de tensão de funcionamento dos equipamentos. Na segunda análise, foram apresentados os dados estatísticos de acordo com os fatores mais significativos que causam falhas nos transformadores de energia, sendo caracterizados e identificados por meio de uma análise das razões de suas causas. Na Figura (5) é apresentado um diagrama com as causas e efeitos das principais falhas em transformadores.

Figura 5 - Diagrama com as causas e efeitos de falhas em transformadores de potência.



Fonte: MURUGAN, 2015, pag. 187, modificada.

As causas das falhas podem ser identificadas, ao acompanhar o funcionamento dos componentes de um transformador de potência. Portanto, torna-se importante as concessionárias e empresas do setor elétrico em realizar um acompanhamento desses equipamentos para uma manutenção eficaz. Segundo Rigatos e Siano (2016), quando os transformadores operam além de sua capacidade, apresentam algumas características (sintomas) que podem auxiliar os momentos ideais para a realização de paradas para a manutenção. Portanto, podem ser citados alguns dos possíveis sintomas nesses equipamentos: aumento na temperatura do enrolamento, isolamento e óleo mineral isolante; aumento na densidade de fluxo magnético fora do núcleo (causando principalmente aquecimento adicional devido as correntes parasitas nas partes metálicas); com o aumento da temperatura, ocorre o aumento da umidade e da quantidade de partícula de gás; exposição a altas tensões nas buchas, comutadores de derivação (OLTC) e cabos; deterioração do isolamento dos enrolamentos (principalmente devido ao elevado estresse térmico).

Contudo, a partir das principais razões de falhas apresentadas anteriormente, em transformadores de potência, destacam-se algumas que ocorrem com maior frequência sendo apresentados os principais efeitos.

- (a) **Isolamento:** podendo ser isolamento sólido, como danos mecânicos, sobrecarga causando aquecimento do isolamento e falha no material isolante, ou mesmo isolamento líquido, como a oxidação do óleo, decomposição térmica do óleo e contaminação por meio da umidade.
- (b) **Enrolamento:** os modos de falhas nesse componente podem ter como causa as características elétricas (surto por meio de descargas atmosféricas, surtos devidos a chaveamentos, mau contato em conexões e sobretensão), ou mesmo mecânica (como dano de transporte, vibrações, forças eletromecânicas que podem deformar os enrolamentos, inclinação do condutor, aproximação em espira, falha no sistema de fixação e deslocamentos nos cabos e conexão). Ainda pode ser térmico (sobrecarga do transformador, falha do sistema de arrefecimento, baixa qualidade do óleo, operação do transformador em condições excessivas ou superexcitado) ou falha de isolamento (sobreaquecimento do material isolante do enrolamento, falha no sistema de refrigeração e falhas na contenção de isolamento). Ainda, com o passar do tempo e a medida que os transformadores vão envelhecendo, as características intrínsecas de isolação ficam fracas ao ponto de não sustentar as solicitações mecânicas (estresse mecânico) devido a uma falha ou um fenômeno. As falhas nos enrolamentos de transformadores causam por sua vez a degradação do sistema de isolamento total, incluindo o óleo do transformador. O envelhecimento do óleo do transformador é caracterizado pela descarga parcial (a evolução do gás começa a partir do óleo) e a degradação térmica (o aumento da temperatura do transformador e as solicitações térmicas associadas aceleram a decomposição do óleo) (RIGATOS et al, 2016).
- (c) **Bucha:** as falhas nesse componente podem ser devido a danos na porcelana ou mesmo falhas no isolamento. Logo, um dos componentes mais vulneráveis dos transformadores de potência são as buchas, sendo importantes equipamentos elétricos, já que a sua falha acarreta na parada do transformador de potência. Afirma Rigatos et al (2016), que uma bucha elétrica é uma estrutura isolante com um condutor interno que fornece a passagem de corrente pelo centro, tendo como principal objetivo transmitir potência de dentro para fora do transformador. Portanto, com a exposição prolongada a condições extremas, como a severidade elétrica, térmica e estresse mecânico, tudo isso pode contribuir para a deterioração da isolação

e conseqüentemente pode levar a formação de produtos e bolhas de gás, que por sua vez pode resultar em descargas parciais.

- (d) **Tanque:** vazamento e ruptura devida elevada pressão interna.
- (e) **Núcleo:** características elétricas (sobretensão), mecânica (deslocamento do aço do núcleo durante a construção) e falhas no isolamento (isolamento ineficiente pontos críticos, como parafuso próximo do núcleo, duto de refrigeração do óleo obstruído causando aquecimento excessivo do núcleo).
- (f) **Comutador (OLTC - *on load tap changer*):** Segundo Rigatos e Siano (2016) os comutadores de derivação variável em carga (OLTC) são usados para alterar a conexão de derivação dos transformadores de potência quando os mesmos estão energizados. Esses equipamentos sofrem com o envelhecimento. Pois, o óleo mineral isolante no interior do comutador (com o passar dos anos) fica sujo devido ao surgimento de arcos elétricos durante as comutações, permitindo o enfraquecimento das propriedades de isolamento. Com esse efeito a um longo prazo (envelhecimento do seletor), inicia a formação de uma fina camada de óleo. Com isso, terá o aumento da resistência de contato devido à essa camada de óleo, podendo causar a criação de um material de carbono duro e poroso em locais onde a corrente de carga flui.

### 2.3.2 CUSTOS DAS FALHAS

Conforme Mijailovic (2013) as falhas podem causar diversos transtornos para operação do sistema elétrico, como as paradas não programadas e problemas quanto ao fornecimento de energia. Os procedimentos para a substituição ou reparo são igualmente onerosos, o que pode afetar diretamente na receita da empresa. Para isso, são destacados os custos relacionados tanto para a manutenção ou substituição do equipamento quanto para o não fornecimento do produto (energia). Nesta última condição as concessionárias deixam de vender seu produto, estando sujeita a penalidades, caso haja descumprimento das regras estabelecidas por órgãos regulamentadores do setor elétrico brasileiro.

Com intuito de apresentar os custos relacionados com os reparos ou substituição dos transformadores de potência com avaria no sistema elétrico foi realizado um levantamento (entre os anos de 1997 e 2001) para obter informações sobre desativações de transformadores, associando-as a causas e custos.

Para isso, diversas concessionárias de vários países participaram dessa pesquisa enviando informações requeridas. Assim, de todas as empresas colaboradoras, 94 continham informações conclusivas que propiciaram a criação de um banco de dados e os registros de desativações foram convertidos em gastos anuais. Os resultados desta pesquisa foram sintetizados por Bartley (2003), conforme a Tabela (3), onde foram apresentadas estatísticas de falhas em transformadores nos últimos cinco anos, sendo apresentada uma perspectiva global da indústria de transformadores.

Tabela 3 – Número de casos de perdas por ano.

ANO	Número de casos	Valor do Custo (U\$)		
		Danos à propriedade	Interrupção	Total
1997	19	25.036.673	15.742.834	40.779.507
1998	25	24.897.114	35.121	24.932.235
1999	15	36.994.202	397.389	37.391.591
2000	20	56.858.084	93.323.695	150.181.779
2001	15	19.453.016	13.890.684	33.343.700
<b>Total</b>	<b>94</b>	<b>163.239.089</b>	<b>123.389.722</b>	<b>286.628.811</b>

Fonte: BARTLEY, 2003, pag. 02.

Ainda, para esta mesma pesquisa apresentado por Bartley (2003), é apresentado o custo por falha. Logo, na Tabela (4) é associado o custo total de cada causa de falha ao número de ocorrências da mesma. Assim, podem ser evidenciadas as maiores causas de falhas em transformadores, além de relacionar essas falhas a demanda de recursos financeiros.

Tabela 4 – Representação dos custos por falhas.

Causas das Falhas	Número de Falhas	Valor pago por Falha (U\$)
Falhas na Isolação	24	149.967.277
Projeto / material	22	64.696.051
Desconhecido	15	29.776.245
Sobrecarga	5	8.568.768
Manutenção/Operação	5	3.518.783
Contaminação do óleo	4	11.836.367
Sobretensão	4	4.959.691
Fogo / explosão	3	8.045.771
Descargas atmosféricas	3	657.935
Perdas em conexões	3	2.186.725

<b>Causas das Falhas</b>	<b>Número de Falhas</b>	<b>Valor pago por Falha (US\$)</b>
Inundação	2	2.240.198
Umidade	1	175.000
<b>Total</b>	<b>94</b>	<b>286.628.811</b>

Fonte: AZEVEDO, 2007, pag.19.

De acordo com CIGRÉ WG 12.19 (2002) sobre grandes transformadores de potência, é apresentada uma taxa de falhas de 1-2% por ano. No entanto, mesmo sendo valores pequenos, uma única falha em um transformador de grande porte, normalmente resulta em enormes despesas para a concessionária de energia elétrica. Na Tabela (5) são apresentados resultados obtidos com intuito de estabelecer estatísticas de falhas em transformadores de potência, sendo relacionadas com os componentes eletromecânicos atingidos.

Tabela 5 – Percentual de falhas em transformadores de potência.

<b>Componentes do Transformador</b>	<b>Distribuição de falhas nos componentes envolvidos do transformador em (%)</b>				
	<b>CIGRÉ*</b>	<b>CEA*</b>	<b>Doble Engineering</b>	<b>ZTZ Service Clients*</b>	<b>África do Sul</b>
Buchas/acessórios	29	29	35	45	14
OLTC	15	39	16	9	24
Isolação Principal	12	16	9	17	30
Enrolamento (envelhecimento)	31		16	12	17
Enrolamento (deformação)			12	10	
Núcleo Ferromagnético	2	10	7	7	15
Outros componentes	11	6	5	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

\*CIGRE: *International Council on Large Electric Systems*;

\*CEA: *Canadian Electricity Association*;

\*ZTZ – *Service: Scientific and Engineering Centre* (Ucrânia).

Fonte: EJERKAN, 2005, pag. 11.

Na Tabela (5) demonstra-se que além dos componentes, que a princípio apresentam maiores possibilidades de falhas, como buchas, enrolamentos, OLTC, entre outros. Ainda, o núcleo magnético pode apresentar um índice significativo de defeitos. Quanto às falhas dielétricas, considera-se que algumas delas iniciam-se devido os movimentos mecânicos dos enrolamentos, podendo ser evitados por meio do monitoramento das condições de mecânicas destes e do núcleo.

Dessa forma, os transformadores de potência por serem equipamentos de maiores dimensões,

complexidade com várias partes ativas conectadas diretamente à rede elétrica, e entre os mais caros em um sistema de potência, requerem cuidados apropriados para seu transporte, instalação, operação, manutenção, O que de certa forma justifica ainda investimentos em sistemas de monitoramento, além de esforços no desenvolvimento e implementação de modelos computacionais cada vez mais sofisticados, para a representação dos fenômenos físicos relacionados a simulações com acoplamento magnético, mecânico, térmico e estrutural por exemplo.

## **2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO**

Os transformadores de potência são normalmente classificados como um dos componentes de mais alto risco e impacto crítico nos sistemas elétricos de potência. A falha nesses equipamentos se agrava devido aos fatos relacionados ao custo com substituição e ainda com os longos prazos para a fabricação e entrega. Com os avanços tecnológicos das últimas décadas, atualmente existem soluções disponíveis para evitar e tentar prevenir de possíveis falhas. Essas prevenções podem ser realizadas por meio de monitoramento e/ou utilização de modelos computacionais para representar com precisão os fenômenos acoplados ao equipamento.

Esses equipamentos são essenciais para a continuidade do fornecimento de energia do sistema elétrico. Os procedimentos para substituição ou reparo podem comprometer a receita da empresa, vistos que além dos gastos com a manutenção e/ou substituição, as empresas deixam de vender seu produto com a parada do fornecimento de energia elétrica, podendo sofrer penalidades, caso haja o descumprimento das regras estabelecidas por órgãos regulamentadores do setor elétrico.

Neste capítulo foram apresentados dados estatísticos relacionados às falhas e as suas principais causas em transformadores de distribuição e de potência. Nas informações apresentadas neste capítulo, obtidas por pesquisas realizadas no setor elétrico em vários países, foram abordados dados quantitativos e financeiros.

# CAPÍTULO III

## 3 ENERGIZAÇÃO EM TRANSFORMADORES

### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO CAPÍTULO

O transformador de potência é um dos dispositivos mais importantes e caros nos sistemas elétricos (METWALLY, 2011). Sua importância é atribuída diretamente à continuidade no fornecimento de energia, uma vez que a sua perda por falha ou defeito significa o não fornecimento de energia. Destaca-se ainda o elevado custo para a substituição destes equipamentos, envolvendo um processo longo e caro. A partir da utilização de estudos e pesquisas relacionadas ao uso de novas tecnologias e técnicas computacionais para a realização de manutenção preditiva, tudo isso tem contribuído consideravelmente para a redução de perdas no fornecimento de energia elétrica além de garantir aumento da confiabilidade no fornecimento de energia elétrica.

De acordo com Tekehara (1989) *apud* Fonseca et al (2018) o fenômeno da corrente de *inrush* em transformadores é afetado por vários fatores, como por exemplo, o ângulo de chaveamento da fonte senoidal, a densidade de fluxo residual, resistência em série, presença de cargas e a estrutura do equipamento. A corrente de *inrush* apresenta um vasto espectro harmônico e produz efeitos indesejáveis ao transformador. Por isso, destacam-se alguns desses efeitos, como: elevadas correntes durante a energização (elevadas forças mecânicas), vibração (movimento geométrico dos enrolamentos), fadiga mecânica nos enrolamentos, afundamentos temporários da tensão, diminuição da vida útil do equipamento, energização solidária aos equipamentos conectados ao mesmo ponto de acoplamento, entre outros.

Destaca-se que a corrente de *inrush* alcança elevados picos em transformadores quando os mesmos não estão conectados as cargas, ou seja, energização a vazio. Ainda, os picos de corrente são limitados principalmente pelas próprias características do equipamento. Logo, a forma de onda, duração e o valor dos picos da corrente de *inrush* dependem de alguns fatores, como: o

tamanho do transformador, impedância do sistema, propriedades magnéticas do material do núcleo, fluxo residual do núcleo e valor instantâneo da tensão durante a energização. No entanto, sempre assumirá valores superiores ao da corrente nominal do equipamento, o que pode causar efeitos danosos ao equipamento (MARDEGAN, 2010).

Portanto, neste capítulo será apresentado o comportamento da corrente de *inrush* para os transformadores de potência, sendo ressaltado que esse fenômeno em transformadores pode causar falhas nos enrolamentos devido a presença dos diversos efeitos. Ainda, apresenta-se o comportamento da energização solidária (*sympathetic inrush*) para os transformadores que estão conectados no mesmo ponto de acoplamento. Também, são descritos os fatores que afetam a energização e as principais características para a mitigação desse fenômeno.

### 3.2 CORRENTE DE *INRUSH*

Quando um transformador é energizado, ocorre um fenômeno conhecido como excitação da corrente de energização (corrente de *inrush*). Não há evidências diretas que devido à ocorrência de uma energização de um transformador pode ocasionar em uma falha imediata, mesmo com elevados picos de correntes. No entanto, ressalta-se que as falhas no isolamento dos transformadores tornam-se mais frequentes em quando as energizações ocorrem no equipamento sem a presença de cargas (STEURER & FROHLICH, 2002).

De acordo com Mardegan (2010) diversos fatores podem interferir nas características da corrente de *inrush* em transformadores, podendo ser destacado o dimensionamento do equipamento e a impedância do sistema. Ainda, o valor da corrente de *inrush* é maior quando o equipamento é menor, em contrapartida, a energização se mantém por um maior tempo quando os transformadores são maiores. Com isso, com a energização de um transformador, a indução magnética no enrolamento pode atingir valores de até três vezes quando em condição nominal (CHIESA, 2010).

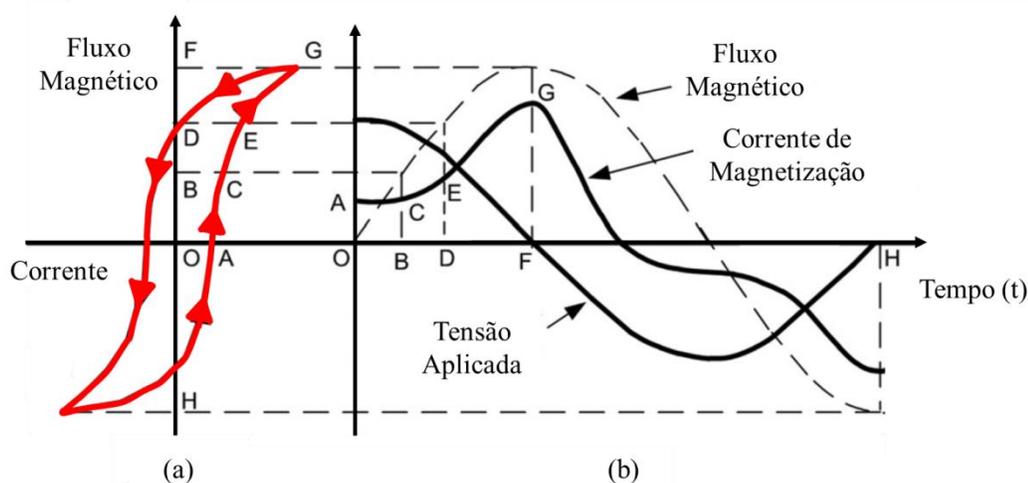
No entanto, mesmo ainda as correntes de energização não sendo tão prejudiciais quanto as correntes de falta, devido ao tempo de duração da corrente de *inrush* (sendo na ordem de segundos) quando comparada a corrente de falta (dezenas de milissegundos), sendo este um fator que contribui para o aquecimento excessivo e conseqüentemente problemas na isolação desses equipamentos. Ainda, a ocorrência da corrente de energização é maior que a corrente de curto-circuito, o que se torna importante o desenvolvimento de estudos e análises para esta condição de

funcionamento (WINDERS, 2002).

Portanto, a corrente de *inrush* basicamente é causada devido ao chaveamento de uma fonte de tensão senoidal que fornece uma carga indutiva com o núcleo ferromagnético como o transformador (NAGHIZADEH et al, 2012; RUDEZ et al, 2016). Por isso, durante a energização de um transformador, ocorre o fenômeno em que a corrente inicial (os primeiros picos) é maior que a corrente nominal do transformador, sendo chamada de corrente transitória de magnetização. Isso é possível com a saturação do núcleo do transformador, tendo como consequência o aumento na proporção da corrente de magnetização (BANDEIRA, 2018).

Essas correntes podem alcançar elevadas amplitudes, principalmente quando os transformadores estiverem operando em saturação. Ainda, apresentam efeitos indesejáveis, tais como a redução da vida útil do equipamento, atuação do relé de proteção e consequentemente abertura do circuito (estabelecendo o não fornecimento de energia elétrica) (PIRES et al, 2018). O transformador cria fluxo magnético entre os enrolamentos e o núcleo durante o seu funcionamento, este fluxo é mantido e estabelecido por meio de uma corrente de magnetização que flui quando o transformador é energizado. A Figura (6) mostra uma típica corrente de magnetização de um transformador em regime permanente.

Figura 6 – Forma de onda da corrente de magnetização em regime permanente produzido pela curva não linear do fluxo magnético do núcleo.

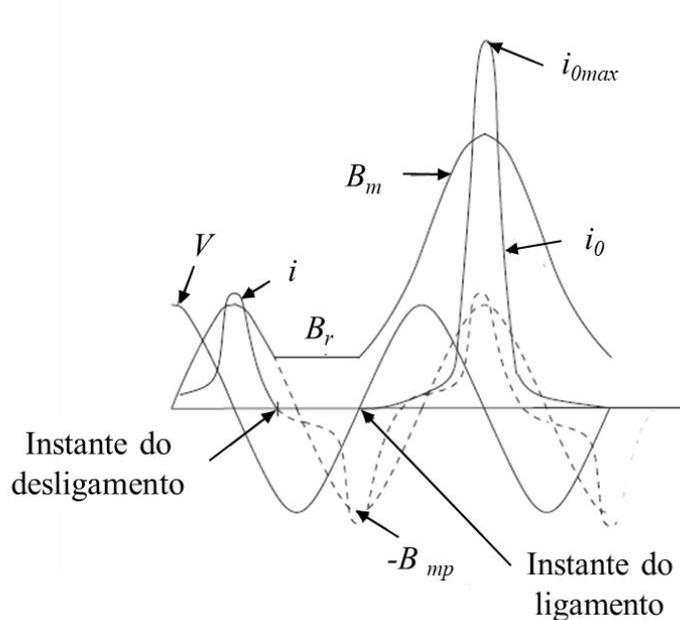


Fonte: PIRES, 2018, modificada.

Quando um transformador é desligado, a corrente de excitação segue a curva de histerese até o valor igual a zero, enquanto o valor da densidade de fluxo magnético ( $B_r$ ), conforme apresentado na Figura (6-a) sendo representado pelo ponto D.

Para uma densidade de fluxo residual de  $+B_r$ , a máxima corrente de *inrush* é extraída quando um transformador é ligado no instante em que a tensão aplicada é igual a zero, conforme apresentado na Figura (7). Caso o transformador não estivesse desligado, a corrente de excitação e a densidade de fluxo teriam seguido o caminho normal (representado pelas curvas pontilhadas).

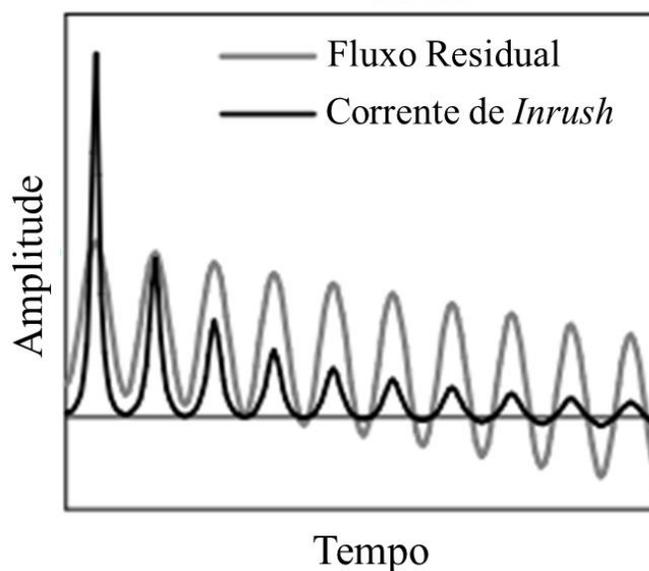
Figura 7 – Demonstração para o caso da máxima corrente de *inrush*.



Fonte: KULKARNI & KHAPARDE, 2012, pag. 61, modificada.

O fluxo magnético em um circuito indutivo não pode mudar rapidamente; conforme apresentado na Figura (7), o fluxo logo após o fechamento da chave (no instante de  $t = 0^+$ ) deve permanecer igual ao fluxo imediatamente antes de realizar o fechamento da chave (no instante de  $t = 0^-$ ). Desta forma, a densidade de fluxo, em vez de partir do valor máximo negativo ( $-B_{mp}$ ) terá a partida do valor máximo positivo da densidade de fluxo ( $+B_r$ ) e irá atingir o valor máximo positivo de  $(B_r + 2B_{mp})$ . Assim, o núcleo do transformador entrará em saturação (KULKARNI & KHAPARDE, 2012).

Na Figura (8) é ilustrada a forma de onda típica para os primeiros picos da corrente de *inrush*. Ainda, observa-se que mesmo para uma tensão senoidal aplicada, a corrente de *inrush* assume uma forma distorcida, principalmente devido ao efeito de saturação.

Figura 8 – Representação da corrente de *inrush* e o efeito do fluxo residual.

Fonte: CHIESA, 2010, pag. 24.

Durante a energização do transformador, uma magnetização permanente do núcleo permanece devido às características não lineares do material magnético. A magnitude instantânea do fluxo do núcleo durante a energização é o fluxo residual (BRUNKE & FROHLICH, 2001).

O fenômeno da corrente de energização em transformadores é afetado por vários fatores, por exemplo: o ângulo de chaveamento da tensão, magnetismo residual, estrutura do transformador, entre outras. No entanto, esses fenômenos transitórios apresentam alguns efeitos, tais como: elevadas correntes de partida (consequentemente elevadas forças nos enrolamentos), distorções na tensão (devido a presença de harmônicos), energização solidária (*sympathetic inrush*), aquecimento e vibração (movimento geométrico dos enrolamentos do transformador), diminuição da vida útil do equipamento, entre outros efeitos (TAKEHARA et al., 1989; FONSECA et al., 2018).

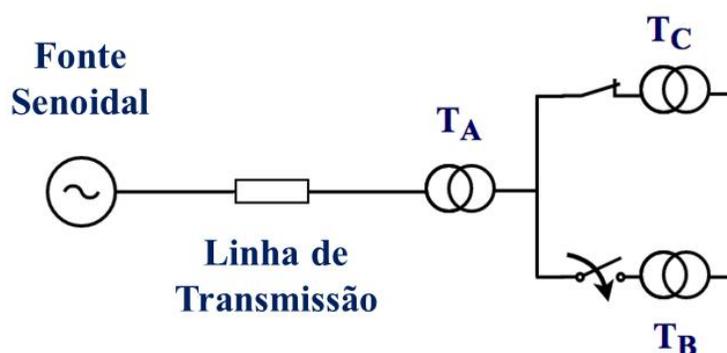
Assim, ressalta-se que durante o desenvolvimento de projetos de transformadores, deve ser levando em consideração as piores situações possíveis que esses equipamentos podem ser submetidos na tentativa de evitar possíveis falhas. No entanto, muitos desses defeitos são produzidos por estresse mecânico devido às condições solicitadas durante o seu funcionamento, como a presença da corrente de *inrush* ou a energização solidária. A seguir, apresentam-se conceitos relacionados a energização solidária em transformadores.

### 3.3 ENERGIZAÇÃO SOLIDÁRIA (*SYMPATHETIC INRUSH*)

Sabe-se que durante a energização de um transformador, a corrente de *inrush* pode alcançar até oito vezes a corrente nominal do equipamento. No entanto, geralmente não são levados em consideração os demais transformadores que estão conectados próximo ao transformador que está sendo energizado. Esse é um fenômeno conhecido como energização solidária (*sympathetic inrush*). Durante a energização solidária, os transformadores também podem apresentar uma corrente de magnetização transitória com amplitude elevada (KULKARNI & KHAPARDE, 2012).

De acordo com Patel (2013) a energização solidária ocorre quando um ou mais transformadores estão conectados e outro equipamento é energizado. A corrente de energização solidária é substancialmente menor que a corrente de *inrush*. No entanto, apresenta um tempo de duração prolongado e dependendo da magnitude de decaimento da componente CC esse fenômeno proporciona um aumento das componentes harmônicas nos transformadores que estão conectados. Ainda, proporciona o mau funcionamento dos equipamentos de proteção (KULKARNI & KHAPARDE, 2012). Para compreender o comportamento da corrente durante a energização de um transformador, sendo afetadas as condições de operações dos demais transformadores que estão conectados, são apresentados alguns exemplos. Inicialmente, considera-se uma rede elétrica conforme apresentado na Figura (9).

Figura 9 – Energização solidária (*sympathetic inrush*).

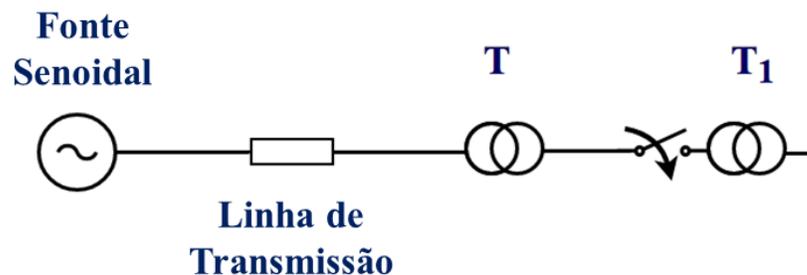


Fonte: KULKARNI & KHAPARDE, 2012, p. 67. Modificada.

Na Figura (9) a energização solidária dos transformadores  $T_A$  e  $T_C$  ocorrem quando o transformador  $T_B$  é conectado à rede elétrica. Destaca-se que durante a energização do transformador  $T_B$  os demais equipamentos devem estar conectados ao sistema elétrico. Com isso, a corrente de energização não flui somente por meio de  $T_B$ , mas também pelos demais

equipamentos ( $T_A$  e  $T_C$ ) e esta configuração é conhecida como energização solidária em paralelo. Outra configuração é em série, conforme apresentado na Figura (10), onde ao considerar o circuito em série de dois transformadores ( $T$  e  $T_1$ ), sendo que  $T$  está alimentando  $T_1$ . Quando o equipamento  $T_1$  é energizado, também o equipamento  $T$  experimenta da energização (energização solidária). A impedância entre  $T$  e  $T_1$  contribui para o decaimento da corrente energização tanto de  $T$  quando de  $T_1$  (KULKARNI & KHAPARDE, 2012).

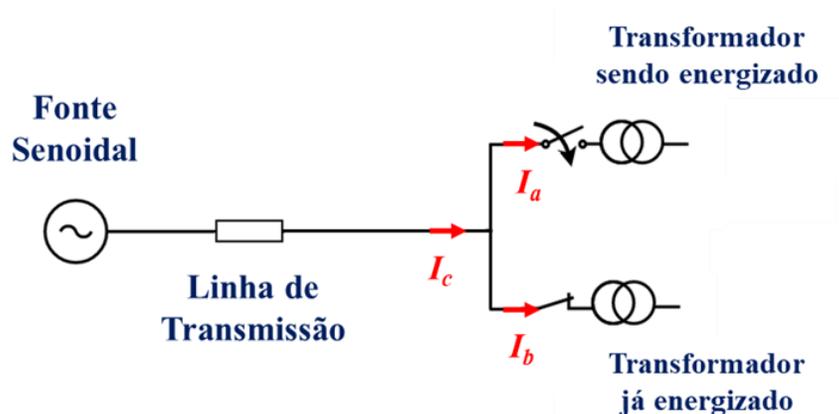
Figura 10 - Energização solidária em uma conexão em série.



Fonte: KULKARNI & KHAPARDE, 2012, pag. 70. Modificada.

Para demonstrar o comportamento da corrente durante a energização solidária, na Figura (11) é apresentado um exemplo com dois transformadores conectados em paralelo. Com isso, a componente CC da corrente de *inrush* do transformador energizado flui pela linha de transmissão (entre a fonte e o transformador o que produz uma queda de tensão CC no mesmo). Essa queda de tensão força a saturação do núcleo do transformador energizado no sentido oposto ao do transformador que está sendo conectado. Isso resulta em um acúmulo de corrente de magnetização (esta taxa de acúmulo é a mesma taxa da componente CC da corrente de magnetização que está diminuído no transformador quando o mesmo é conectado).

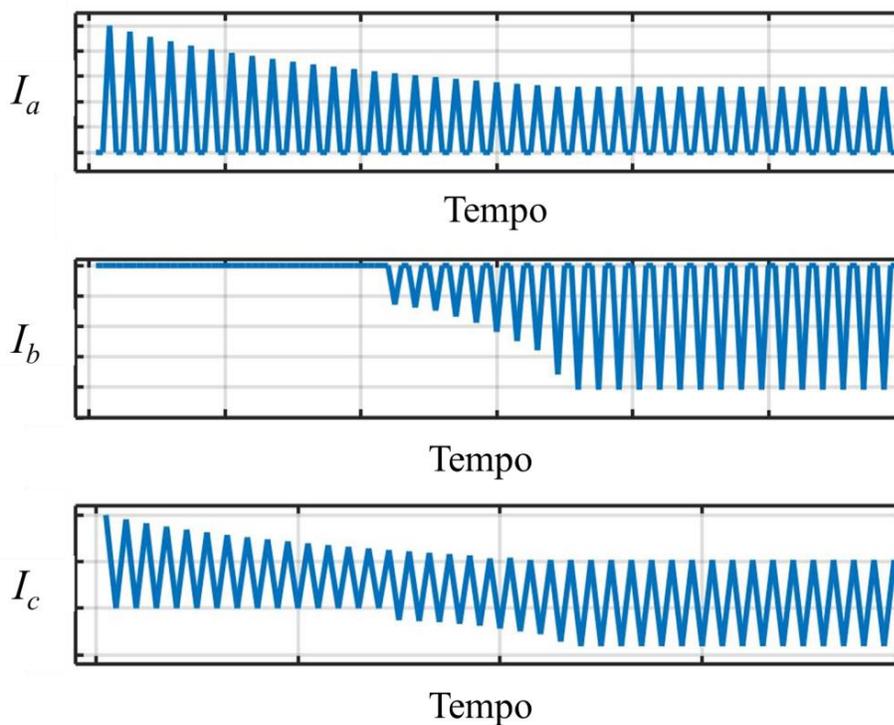
Figura 11 - Energização solidária em uma conexão em paralelo.



Fonte: KULKARNI & KHAPARDE, 2012, pag. 69. Modificada.

Logo, quando dois transformadores semelhantes são conectados em paralelo, as magnitudes das componentes CC da corrente de magnetização de ambos os transformadores se torna iguais. No entanto, há um componente CC que circula no circuito entre os transformadores, mesmo não havendo nenhum componente CC alimentando os transformadores. As formas de ondas das correntes são mostradas na Figura (12).

Figura 12 - Corrente de *inrush* em transformadores paralelo.



Fonte: KULKARNI & KHAPARDE, 2012 pag. 69, adaptada.

A energização solidária apresenta maior severidade principalmente quando os

transformadores são alimentados por um sistema que apresenta um único alimentador em comum (por isso pode-se dizer que os transformadores são alimentados por um sistema fraco) (KULKARNI & KHAPARDE, 2012). Ainda, ressalta-se que a corrente de *inrush* decai em alguns ciclos, no entanto a energização solidária persiste no circuito por uma longa duração.

### 3.4 FATORES QUE AFETAM A ENERGIZAÇÃO E MITIGAÇÃO

De acordo com Kulkarni & Khaparde (2012) vários fatores podem afetar o comportamento da corrente durante a energização de transformadores. Dentre os fatores, destaca-se: ângulo de chaveamento da fonte senoidal, a densidade de fluxo residual, resistência em série e energização com a presença de carga. Em condições normais de operação, o fluxo magnético do núcleo está defasado  $90^\circ$  em relação a tensão, desta forma, o fluxo atingirá seu valor máximo quando a função senoidal da tensão passar por zero. Assim, o valor da corrente de *inrush* diminui quando o ângulo de chaveamento aumenta. Logo, a corrente alcança valores máximos quando o ângulo é mínimo ( $\alpha = 0^\circ$ ) e correntes mínimas quando o ângulo aumenta ( $\alpha = 90^\circ$ ).

Ainda, a corrente de *inrush* é significativamente agravada pela densidade de fluxo residual, sendo esta uma característica devido ao material do núcleo e da potência de carga quando o transformador for desconectado. O tipo de material do núcleo define o valor da densidade de fluxo residual, podendo alcançar de 80% a 60% do valor da saturação para os materiais laminados (KULKARNI & KHAPARDE, 2012).

Destaca-se que a resistência em série entre a fonte e o transformador tem um efeito predominante durante a energização. Esse efeito é de amortecimento, reduzindo a corrente inicial e acelerando a taxa de decaimento, diminuindo o tempo de duração do fenômeno. Desta forma, destaca-se que os transformadores que estão conectados próximos aos geradores apresentam transitórios que duram por um longo período devido ao baixo valor de resistência. Logo, transformadores de potência geralmente apresentam energização com baixa taxa de decaimento, devido a elevada indutância dos enrolamentos quando comparada a resistência em série do sistema (BRONZEADO et al. 1995).

Caso um transformador seja ligado com carga conectada, os picos de corrente durante a energização são afetadas devido ao fator de potência da carga. Sob em condições de carga pesada com fator de potência próximo a unidade, o pico da corrente de *inrush* é menor ainda, e conforme o fator de potência diminui o valor da corrente durante o pico aumenta (LIN et al. 1993).

Destaca-se que uma das formas mais comum de reduzir a corrente de *inrush* é conectar aos transformadores a uma resistência. Com isso, a tensão nominal aplicada reduzirá a um valor abaixo da nominal, e, conseqüentemente, reduzirá a corrente de energização. Uma das principais razões para as elevadas correntes de *inrush* se dá devido ao fluxo residual, por isso, a tentativa de reduzi-lo também é uma iniciativa de mitigar o fenômeno. Outra estratégia, ao desconectar um transformador, caso um capacitor de capacidade adequada seja conectado, ocorrerá uma oscilação amortecida, fazendo com que uma corrente alternada flua no enrolamento do transformador. A amplitude da corrente diminui com o tempo, reduzindo gradualmente conforme sua curva de histerese, reduzindo tanto a corrente quanto o fluxo residual para zero (KULKARNI & KHAPARDE, 2012).

Conforme apresentado por Brunke e Frohlich (2001), a corrente de *inrush* pode ser eliminada usando algumas estratégias de energização controlada. No entanto, alguns fatores podem impedir essa eliminação da corrente durante a energização. Com isso, pode-se destacar alguns desses fatores, como: a mudança de tempo no chaveamento do disjuntor responsável pela conexão do transformador, erros na medição do fluxo residual e além das configurações do núcleo ou do enrolamento do transformador.

### **3.5 EFEITOS PROVOCADOS PELA ENERGIZAÇÃO**

Com a ocorrência da energização em transformadores, alguns efeitos podem contribuir diretamente para a redução da vida útil desses equipamentos. Com isso, podem ser destacados alguns efeitos, como a fadiga mecânica nos enrolamentos de transformadores, devido à presença das elevadas forças magnéticas e a ocorrência do aumento do estresse mecânico procedente das elevadas corrente de energização. As elevadas correntes de energização em transformadores ocasionam forças magnéticas que apresentam efeitos prejudiciais à estrutura dos enrolamentos (FONSECA et al, 2018).

Outro efeito indesejado durante a energização de transformadores é a deterioração da isolação, que em condições severas de funcionamento, a vida útil estimada é reduzida rapidamente. Com isso, com a redução gradativa da útil do equipamento, vários processos podem ser desencadeados, o que leva a uma possível falha do isolamento (MADRUGA, 2018). De acordo com Zirbes et al (2005) alguns fatores proporcionam à degradação do material de isolamento são de natureza térmica (aquecimento), hidrolítica (umidade) e oxidativa (oxigênio).

Também, destaca-se o afundamento temporário de tensão como um dos principais distúrbios relacionados à energização de transformadores. Esse efeito acarreta em prejuízos financeiros e transtorno na operação dos sistemas elétricos, principalmente com a parada do fornecimento de energia (ROCHA, 2016).

Ainda, pode-se destacar outro efeito indesejável é a atuação de forma inadequada do sistema de proteção, pois como a corrente de energização apresenta elevada amplitude de corrente, muitas vezes semelhantes aos valores de amplitudes alcançados pelas correntes de falta interna em transformadores. Com isso, é exigida da proteção a habilidade em distinguir esses dois fenômenos. Na maioria dos casos, a corrente de energização apresenta uma grande quantidade de harmônicos, principalmente de 2ª e 5ª ordem, enquanto as faltas internas geralmente são limitadas a componente fundamental. A partir disso, em muitas literaturas é apresentada a metodologia em utilizar o método de restrição por harmônicos na proteção (MEDEIROS, 2014).

### 3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

As elevadas correntes de durante a energização de transformadores podem ocasionar diversos efeitos em transformadores. Com isso, neste capítulo foram apresentadas a formulação e as principais características relacionadas a corrente de *inrush* e energização solidária, sendo apresentados os principais efeitos, além dos fatores que contribui para o aumento da corrente durante a energização desses equipamentos e a forma de mitigação.

Assim, podem-se destacar alguns fatores que influenciam no comportamento da corrente durante a energização dos transformadores: tempo de chaveamento (ângulo no momento do chaveamento), resistência em série do circuito, carga conectada no momento da energização, fluxo residual remanescente, entre outros.

Com isso, torna-se importante ressaltar que diversos esforços têm sido apresentados com intuito de analisar os principais distúrbios ocasionados pela corrente durante a energização de transformadores. Portanto, neste capítulo foram apresentados os fatores que afetam a energização, assim como a forma de mitigar esse fenômeno, além dos efeitos indesejáveis que são ocasionados durante a energização.

# CAPÍTULO IV

## 4 MODELAGEM MAGNETO-MECÂNICA COMPUTACIONAL

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO CAPÍTULO

De acordo com Vaddeboina et al (2012) os transformadores são energizados com o fechamento não uniforme dos polos dos disjuntores. No instante da energização o transformador extrai uma corrente transitória de alta magnitude, que aumenta rapidamente após a energização, tendo o seu valor máximo e decaem até que o transformador atinja sua condição nominal. Essa corrente apresenta efeitos indesejáveis, como possíveis danos na estrutura do transformador, mau funcionamento, problemas relacionados à qualidade da energia e diminuição do tempo de vida do equipamento.

Durante a energização de transformadores, a corrente pode alcançar elevadas amplitudes, sendo que as mesmas ocorrem de diferentes formas e ainda, podem ser divididas em categorias. Assim, são destacadas para as análises apresentadas neste documento a corrente de *inrush* que é causada pela reconexão da fonte de tensão ao transformador que estava previamente desenergizado e a energização solidária, tendo como causa a reconexão da fonte de tensão no transformador que opera junto a dois ou mais transformadores (RUDEZ et al, 2015).

Com isso, neste capítulo é apresentada a formulação matemática a partir do circuito elétrico para obter os valores máximos da corrente de *inrush* (picos) durante a energização do transformador. Também, foi possível obter esses valores de correntes por meio do *software* ATP que usa o método trapezoidal para a solução do problema. Esses valores de correntes para as diferentes condições de operação obtidas por meio do ATP (corrente de *inrush* e energização solidária) serão necessárias para a realização da análise magnética e, por conseguinte, para a

análise estrutural.

Posteriormente ao comportamento da corrente durante a energização dos transformadores, foram realizadas as análises magnética e estrutural, sendo utilizados os *softwares* ANSYS MAXWELL e ANSYS STRUCTURAL, em que ambos utilizam o MEF para obter a solução.

Para isso, neste capítulo inicialmente é realizado uma breve apresentação dos *softwares* para obter o comportamento da corrente durante a energização, da análise magnética e estrutural, assim como os métodos matemáticos utilizados pelos respectivos programas. Logo, é demonstrado o método trapezoidal e a sua formulação básica para os componentes que formam o sistema elétrico de potência, assim como o *software* ATP e as suas principais características.

Posteriormente, apresenta-se a formulação matemática para o MEF, assim como para o elemento finito volumétrico utilizado nas simulações dos problemas em 3D. O tetraédrico é o elemento finito utilizado tanto para a solução magnética quanto para a solução estrutural. Em seguida, é apresentada a formulação matemática para obter o comportamento das forças magnéticas nos enrolamentos assim como a indução magnética, sendo estes apresentados em suas componentes axiais e radiais. De forma semelhante, são apresentados os principais defeitos obtidos por meio da atuação dessas forças nos enrolamentos do transformador. Para isso, são apresentados resultados de deformação total, estresse mecânico obtido e o grau de segurança do equipamento frente a aplicação dessas forças.

## 4.2 CORRENTE DE *INRUSH* EM TRANSFORMADORES

O fenômeno da corrente de *inrush* ocorre em transformadores durante a sua energização. De acordo com Kulkarni & Khaparde (2012), alguns estudos têm demonstrado que um dos principais fatores relevantes para o máximo estresse mecânico verificado nas estruturas em transformadores ocorre durante o primeiro pico de corrente. Diferentemente do que ocorre durante a corrente de curto-circuito (a mesma apresenta uma exposição de dezena de milissegundos), a atuação da corrente de *inrush* muitas vezes podem durar dezenas de segundos (STEURER & KLAUS, 2002).

De acordo com Steurer & Klaus (2002), em estado estacionário, a corrente de curto-circuito pode alcançar valores de 10 a 15 vezes a corrente nominal do equipamento. Durante a energização de um transformador, a corrente de *inrush* pode alcançar amplitudes da mesma grandeza que uma corrente de falta (GEORGILAKIS, 2009).

O valor do primeiro pico da corrente de *inrush* em um transformador pode ser calculado matematicamente, conforme o desenvolvimento a seguir. Para isso, inicialmente deve ser considerada a tensão senoidal aplicada ao equipamento, que é em função da densidade de fluxo senoidal e da corrente de magnetização, tendo os vários picos em sua forma de onda, os cálculos são baseados na Equação (4.1) (KULKARNI & KHAPARDE, 2012):

$$V_1 = V_p \text{sen}(\omega t + \theta) = i_0 R_1 + N_1 \frac{d\phi_m(t)}{dt} \quad (4.1)$$

onde:  $V_1$  é a tensão no enrolamento primário;  $V_p$  é a tensão de pico aplicado;  $\theta$  é o ângulo no instante do chaveamento;  $i_0$  valor instantâneo da corrente de magnetização;  $\phi_m$  é o valor instantâneo do fluxo no instante de tempo  $t$ ;  $R_1$  é a resistência do enrolamento primário;  $N_1$  é o número de voltas do enrolamento. Desde que a solução é obtida usando as condições iniciais ( $t = 0$ ;  $\phi_m = \phi_r$ ) a Equação (4.2) pode ser obtida:

$$\phi_m = \phi_{mp} \cos(\theta \pm \phi_r) e^{\frac{-R_1 t}{L_1}} - \phi_{mp} \cos(\omega t + \theta) \quad (4.2)$$

onde:  $\phi_{mp}$  é o fluxo magnético máximo;  $\phi_r$  é o fluxo residual;  $R_1$  e  $L_1$  são as resistências e indutâncias do enrolamento primário, respectivamente. Portanto, para determinar matematicamente o comportamento da corrente de *inrush* em função do tempo, pode ser usada a Equação (4.3) (FAIZ et al, 2008):

$$i_1 = \frac{N_1}{L_1} \left[ -\phi_{mp} \cos(\omega t + \theta) + \phi_{mp} \cos(\theta) e^{\left(\frac{-R_1}{L_1} t\right)} \right] \pm \frac{N_1}{L_1} \left[ \phi_r e^{\left(\frac{-R_1}{L_1} t\right)} \right] \quad (4.3)$$

Desta forma, pode-se obter os picos da atenuação da corrente de *inrush* com o núcleo do ferromagnético do transformador tende a saturar a densidade de fluxo magnético ( $\vec{B}$ ) assume valor de aproximadamente 2,03 Teslas, o fluxo magnético de dispersão ( $\phi_a$ ) pode ser descrito de acordo com a Equação (4.4) (STEURER & KLAUS, 2002):

$$\begin{aligned} \phi_a &= \mu_0 H A_w \\ \phi_a &= 2 \phi_{mp} + \phi_r - \phi_{sat} = 2 \phi_{mp} + \phi_r - 2,03 A_c \end{aligned} \quad (4.4)$$

Onde:  $\mu_0$  é a permeabilidade do espaço livre;  $H$  é o módulo da intensidade do campo magnético;  $A_w$  é a área média de uma espira do enrolamento;  $\phi_a$  é o fluxo magnético de

dispersão do ar e  $A_c$  é a área da secção transversal do núcleo. Ainda, tem-se que  $B_r$  é a densidade de fluxo residual e  $B_{mp}$  é a indução magnética nominal de pico no núcleo do transformador. A partir do valor do primeiro ciclo da corrente de *inrush*, pode-se calcular a nova densidade de fluxo residual, conforme a Equação (4.5):

$$B_{r(new)} = B_{r(old)} - B_{mp} \frac{K_1 R_s}{X_s} 2 (\text{sen}\theta - \theta \cos\theta) \quad (4.5)$$

onde:  $K_1$  é o fator de correção para o decaimento da corrente de *inrush*;  $R_s$  é a resistência equivalente do enrolamento e do sistema;  $X_s$  é a reatância do ar. Assim, pode-se obter o novo valor da indução magnética, conforme a Equação (4.6):

$$B_{mp} = \frac{V}{4,44 N A_c} 2\pi \quad (4.6)$$

A partir disso, o ângulo ( $\theta$ ) pode ser calculado de acordo com a Equação (4.7), correspondendo ao instante que o núcleo satura.

$$\theta = K_2 \cos^{-1} \left( \frac{B_s - B_{mp} - B_r}{B_{mp}} \right) \quad (4.7)$$

sendo:  $K_2$  o fator de correção para o ângulo sendo igual a 0,9;  $B_s$  é a densidade de fluxo de saturação e  $K_3$  é o fator de correção dos valores dos picos, sendo igual a 1,15. Portanto, é possível estimar o primeiro pico da corrente de *inrush* no enrolamento de um transformador, com  $N$  voltas e um enrolamento com uma determinada altura ( $h_w$ ). Matematicamente, esta situação operacional pode ser determinada baseada na lei dos circuitos de Ampere, apresentada na Equação (4.8) (KULKARNI & KHAPARDE, 2012):

$$\begin{aligned} i_{0\max}(first\ peak) &= \frac{h_w H}{N} = \frac{(2\phi_{mp} + \phi_r - 2,03 A_c) h_w}{\mu_0 A_w N} \\ i_{0\max}(first\ peak) &= \frac{(2B_{mp} + B_r - 2,03) A_c h_w}{\mu_0 A_w N} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Após obter todos esses parâmetros, pode ser calculada a amplitude da corrente de *inrush* usando a Equação (4.9).

$$i_{0\max}(todos\_picos) = \frac{K_3 V \sqrt{2}}{X_s} (1 - \cos\theta) \quad (4.9)$$

Torna-se importante ressaltar que para bancos de transformadores constituídos por três

unidades monofásicas a máxima corrente *inrush* é, aproximadamente, o equivalente a 2/3 da corrente ( $i_{0 \max}$ ) correspondente para um transformador monofásico (KULKARNI & KHAPARDE, 2012).

### 4.3 MÉTODO TRAPEZOIDAL

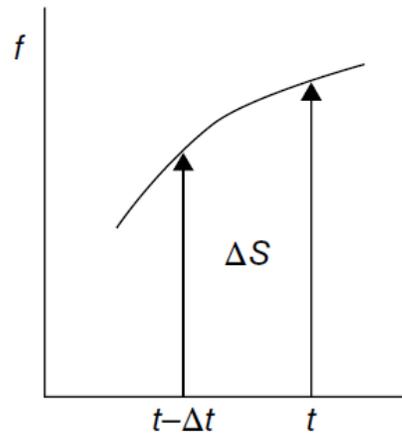
Para a solução no domínio do tempo das equações diferenciais dos componentes do sistema elétrico, o *software* ATP utiliza o método de integração trapezoidal. Durante a solução, são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatoração triangular otimizada de matrizes (TAMASHIRO et al, 2016). Portanto, simultâneas equações diferenciais são convertidas em simultâneas equações com coeficiente de um número real pela regra trapezoidal. O circuito é representado por uma equação de admitância nodal. O intervalo de tempo para a simulação é fixo na faixa de  $t = 0$  à  $t = \max$  (medida em segundos).

#### 4.3.1 FORMULAÇÃO DO CIRCUITO

A seguir será apresentada a formulação principal do circuito para a resolução estabelecida pelo *software* ATP, quando se trata de simulações no domínio do tempo. A regra trapezoidal é aplicada a uma função ( $f$ ) no domínio do tempo para obter uma área ( $\Delta S$ ), conforme apresentado na Equação (4.10) (HAGINOMORI et al, 2016):

$$\Delta S = \frac{\Delta t}{2} (f(t) + f(t - \Delta t)) \quad (4.10)$$

A regra trapezoidal é um simples método de integração implícito, o mesmo utiliza interpolação para a sua solução. Conforme apresentado na Figura (13), a área calculada pela integral apresentada na Equação (4.10) é aproximadamente um trapézio.

Figura 13 – Função  $f(t)$  e a área  $\Delta S$ .

Fonte: HAGINOMORI et al, 2016, pag. 9.

De forma geral, a equação nodal do circuito aplicando a regra trapezoidal pode ser demonstrada conforme a Equação (4.11) (SLUIS, 2001):

$$[Y] \cdot [e(t)] = [i(t)] - [I] \quad (4.11)$$

Onde:  $[Y]$  é a matriz admitância nodal;  $[e(t)]$  é o vetor com as tensões desconhecidas;  $[i(t)]$  é o vetor com as correntes injetadas e  $[I]$  é o vetor com as correntes da fonte, que são determinadas pelos valores de correntes no passo anterior.

#### 4.3.2 SOFTWARE ATP

Neste *software* é possível realizar simulações de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, mesmo com configurações arbitrárias, por meio de método que utiliza a matriz admitância de barras, representando o sistema elétrico modelado. De acordo com Silva (2012) no início de sua implementação somente circuitos monofásicos eram representados, com a ocorrência de diversas melhorias, os circuitos polifásicos também são representados, além de possuir ferramentas suficientes para a modelagem de dispositivos da eletrônica de potência. A sua formulação matemática é baseada no método das características (Método de Bergeron) para os elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados, sendo este utilizado para o desenvolvimento de simulações computacionais de fenômenos transitórios e eletromagnéticos (DOMMEL, 1986).

Portanto, no *software* ATP a representação do sistema elétrico é realizada por meio de componentes da rede elétrica com modelos pré-estabelecidos, como: resistência, indutância,

capacitância, chaveamento, modelos de transformadores, linhas e cabos, fonte de tensão, geradores, motores, entre outros. Para a análise deste trabalho, o comportamento da corrente durante a energização de transformadores foi obtida para um banco trifásico de transformadores monofásicos de 50 MVA.

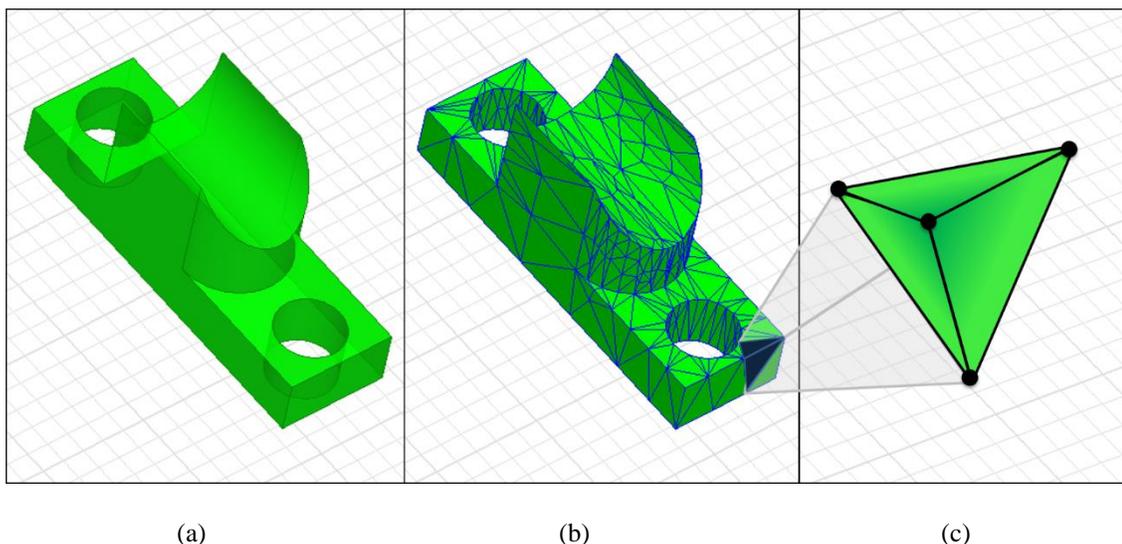
#### 4.4 ANÁLISES NO MEF

O MEF (Método de Elementos Finitos) teve o surgimento da década de 50, no entanto, somente em 1970 que o mesmo passou a ser empregado no eletromagnetismo de forma ampla, onde foi proposta a utilização deste método no uso em problemas de eletromagnetismo, principalmente envolvendo problemas com características de materiais não-lineares (BASTOS, 1996).

O MEF é utilizado para resolver os problemas envolvendo campos magnéticos por meio das Equações de Maxwell em uma região finita do espaço com condições de contorno adequadas. Quando necessário, com condições iniciais previamente especificadas pelo usuário, a fim de obter uma solução numérica (BARZEGARAN et al, 2010). Com a utilização do MEF é possível obter uma formulação matemática, que permita o desenvolvimento de análises de sistemas complexos e/ou geometricamente irregulares, por meio da discretização geométrica e implementação deste modelo em análises computacionais.

Portanto, de acordo com Bastos e Sadowski (2003) a resolução do problema consiste em discretizar (decompor) o domínio do estudo em pequenos subdomínios (chamados de elementos finitos) que são conectados entre si por meio de pontos discretos (chamados de nós). Esse conjunto de elementos utilizados na discretização da geometria é chamado de malha, conforme apresentado na Figura (14).

Figura 14 – Demonstração da definição do MEF: (a) problema geométrico complexo. (b) discretização do problema com diversos elementos. (c) elemento tetraédrico.



Fonte: SOUSA, 2018, pág. 58.

A partir da obtenção da malha (com os seus respectivos nós) as soluções aproximadas podem ser introduzidas para as variáveis de campos dependentes no interior de cada elemento. Essas variáveis são expressas como funções arbitrárias dos valores que as incógnitas assumem nos nós (chamadas de funções de interpolação). Ainda, são impostas condições para garantir a continuidade da solução nos nós compartilhados pelos elementos. Essas incógnitas (graus de liberdade) passam a ser os valores das variáveis de campo nos pontos nodais, sendo que o número do grau de liberdade (agora finito) é dependente da ordem, do número de elementos e do número de variáveis dependentes (BIANCHI, 2005).

De acordo com Fonseca (2016), o MEF não fornece soluções exatas (em princípio). No entanto, admite-se que à medida que mais elementos são utilizados para o desenvolvimento da análise, toda a solução obtida para o problema discretizado terá uma convergência para uma solução com maior precisão do problema contínuo. A implementação da técnica de elementos finitos, pode ser realizada por meio da utilização do método variacional ou do método de Galerkin (método dos resíduos ponderados), este último é fundamentado no princípio da minimização da energia associada ao campo elétrico presente no domínio do cálculo (BIANCHI, 2005).

O MEF apresenta algumas vantagens em relação a utilização de outras técnicas numéricas, e conforme Kulkarni & Khaparde (2012), podem ser definidas:

a) Elementos de diferentes formas e tamanhos podem ser associados para discretizar domínios de geometria complexa, uma vez que a sua formulação depende somente da classe do problema e é independente de geometria;

b) A divisão do domínio em regiões onde as propriedades físicas variam em função das coordenadas espaciais facilita a modelagem de problemas envolvendo domínios não homogêneos. O MEF também pode levar em conta, facilmente, a descontinuidade do material;

c) O método de elementos finitos pode ser todo formulado matricialmente, facilitando a sua implementação computacional.

#### 4.4.1 SOFTWARE ANSYS MAXWELL

O ANSYS MAXWELL é um dos principais *softwares* comerciais de simulação de campo elétrico e campo magnético para engenheiros encarregados em desenvolver projetos e análises tanto em 2D quanto em 3D do comportamento magnéticos e mecânicos de dispositivos. Com isso, podem-se realizar análises em dispositivos como: motores, atuadores, transformadores, sensores, bobinas, entre outros. Neste programa é utilizado o método de elementos finitos (MEF) para resolver precisamente os campos magnéticos e elétricos estáticos, tanto no domínio da frequência quanto variável no tempo.

Ainda, pode ser destacado como uma das vantagens deste programa a estratégia utilizada para o refinamento da malha. Para isso, o mesmo realiza um processo de solução automatizada, onde se torna necessário especificar as características iniciais da solução, como informações sobre a geometria, condição de contorno, propriedades do material, excitação da máquina, entre outros, assim como os resultados que se deseja obter ao final da solução. A partir disso, o próprio programa produz automaticamente uma malha apropriada e precisa para a solução do problema, chamada de malha auto adaptativa. Essa malha utiliza técnicas de refinamento com objetivo de melhorar os resultados numéricos obtidos pelo *software*.

Assim como os demais *softwares* baseados no método de elementos finitos, o ANSYS MAXWELL apresenta três etapas para a divisão dos problemas. Essas etapas são semelhantes ao *software* ANSYS STRUCTURAL, que serão apresentadas no tópico a seguir.

#### 4.4.2 SOFTWARE ANSYS STRUCTURAL

O ANSYS é um *software* baseado no método de elementos finitos (MEF) que pode ser utilizado nas mais diversas classes de problemas de engenharia. A capacidade desse programa inclui habilidades para resolver diferentes tipos de análises estruturais disponíveis. Destaca-se para este trabalho a utilização da análise estática. Esse tipo de análise pode ser utilizado na determinação de deslocamentos, condição de carga estática, estresse, deformações, entre outros. Para isso, as simulações podem ser realizadas para dois tipos de análises, linear e não-linear. Para as análises não-lineares são incluídas informações relacionados a plasticidade, tensão mecânica, rigidez, e suportabilidade em deformações, superfície de contato, entre outras informações (MARINHO, 2002).

A plataforma ANSYS Workbench é a estrutura sobre a qual o conjunto mais amplo e profundo da indústria de tecnologia avançada em engenharia de simulação é construído. Esta plataforma tem como finalidade interligar os diversos subprogramas da *ANSYS Corporation* que atua em todas as áreas da engenharia, respaldado pela aplicação do método numérico de solução.

Portanto, o programa ANSYS Workbench consiste em um conjunto de sistemas computacionais, em que cada sistema é destinado a uma determinada análise. Os diversos tipos de análises que podem ser realizados, de modo a simular o comportamento de um conjunto real mediante a utilização do ANSYS STRUCTURAL, são dependentes da geometria, das condições de contorno e hipóteses simplificadoras adotadas durante a modelagem (FONSECA, 2016).

Logo, assim como os demais sistemas computacionais baseados no método de elementos finitos, tanto o *software* ANSYS MAXWELL quanto o ANSYS STRUCTURAL utilizam na resolução de problemas a divisão em três etapas: (a) Pré-processamento; (b) Processamento e (c) Pós-processamento.

- (a) Pré-Processamento: consiste na modelagem da estrutura, sendo realizada a definição da estrutura e descrevendo todas as características da geometria e do problema, as propriedades físicas dos materiais, a densidade das malhas e as condições de contorno. Também, pode-se definir a malha dos elementos finitos (criar e visualizar).
- (b) Processamento: consiste na interpretação das informações definidas durante a etapa anterior (pré-processamento) e aplicação das equações de Maxwell (para a solução no

*software* ANSYS MAXWELL) e aplicação das equações mecânicas do comportamento estático e dinâmico (para a solução no *software* ANSYS STRUCTURAL).

- (c) Pós-processamento: nesta etapa são disponibilizados os resultados sob a forma de contorno e a densidade. Assim, o usuário poderá inspecionar pontualmente a solução, realizar o cálculo de integrais a partir dos resultados, plotar resultados de variáveis de interesse como os campos elétricos, magnéticos, potenciais, corrente, torques, forças entre outros. Ainda, os resultados são disponibilizados na forma de gráficos, tabelas ou mesmo resultados numéricos.

#### 4.5 PROBLEMA MAGNETOSTÁTICO

A magnetostática consiste no estudo dos fenômenos magnéticos em regime estacionário. O campo magnético é, então, invariante no tempo e só é devido as correntes estacionárias impostas ou a ímãs permanentes. O modelo magnetostático aplicado ao domínio  $\Omega$ , de fronteira  $\Gamma$ , é caracterizado pelas seguintes equações diferenciais, lei de comportamento para meios isotrópicos e condições de contorno, expressas por (LUZ, 2003):

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_s, \text{ em } \Omega, \quad (4.12)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0, \text{ em } \Omega, \quad (4.13)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (4.14)$$

$$\vec{n} \times \vec{H} \Big|_{\Gamma_h} = 0, \quad (4.15)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{B} \Big|_{\Gamma_b} = 0, \quad (4.16)$$

onde  $\Gamma = \Gamma_h \cup \Gamma_b$ ;  $\vec{H}$  é o campo magnético em (A/m);  $\vec{J}_s$  é a densidade superficial de corrente fonte;  $\vec{B}$  é a indução magnética em (T);  $\mu$  é a permeabilidade magnética em (H/m); e  $\vec{n}$  é o vetor normal à superfície da fronteira  $\Gamma$  do domínio de cálculo  $\Omega$ .

As condições de contorno apresentadas nas Equações (4.15) e (4.16) podem se apresentar sobre os planos de simetria. A primeira condição pode também se apresentar se o domínio exterior à  $\Omega$  em contato com  $\Gamma_h$  tem uma permeabilidade magnética infinita.

#### 4.5.1 FORMULAÇÃO EM POTENCIAL VETOR MAGNÉTICO: FORMA FORTE

Neste trabalho, para resolver o sistema de equações apresentados anteriormente (4.12 - 4.16), utiliza-se o conceito de potencial vetor magnético  $\vec{A}$ . A partir da Equação (4.13), pode-se definir:

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}. \quad (4.17)$$

Substituindo-se a Equação (4.17) em (4.14) e em (4.12), tem-se a equação diferencial parcial resultante para esta formulação da magnetostática, conforme apresentado na Equação (4.18):

$$\text{rot}(\mu^{-1} \text{rot } \vec{A}) = \vec{J}_s. \quad (4.18)$$

Essa é uma equação conhecida como a formulação de  $\vec{A}$  na forma forte para a magnetostática. A resolução da Equação (4.18) nem sempre pode ser obtida analiticamente e a utilização de métodos numéricos torna-se necessária para que se possa obter uma solução aproximada do problema. A formulação em potencial vetor magnético necessita de impor condições suplementares para assegurar a unicidade da solução. De fato, conforme a Equação (4.19):

$$\vec{A}_g = \vec{A} + \text{grad } \eta, \quad (4.19)$$

onde  $\eta$  é uma função escalar qualquer. Com isso, tem-se  $\text{rot } \vec{A}_g = \text{rot } \vec{A}$ . Desta forma, falta uma equação que permite fixar a função escalar e garantir a unicidade da solução. Essa equação é chamada de equação de calibre (LUZ, 2003). Pode-se utilizar o calibre de Coulomb  $\text{div } \vec{A} = 0$  que implica a continuidade da componente normal do potencial vetor  $\vec{A}$ .

Outra possibilidade consiste em escolher a condição  $\vec{A} \cdot \vec{W} = 0$  onde  $\vec{W}$  é um campo de vetores cujas linhas de campo não são fechadas e são tais que podem ligar todos os pares de pontos quaisquer do domínio de estudo (LUZ, 2003; DULAR, 1996).

#### 4.5.2 FORMULAÇÃO EM POTENCIAL VETOR MAGNÉTICO: FORMA FRACA

Para discretizar a formulação magnetostática, conduzem-se as equações escritas de uma forma diferencial para uma forma integral, a qual se adapta melhor a discretização pelo método de elementos finitos. Assim, a forma fraca da Equação (4.18) é obtida aplicando-se o método dos resíduos ponderados. A equação integral resultante é dada por (LUZ, 2003):

$$\int_{\Omega} \mu^{-1} \operatorname{rot} \vec{A} \cdot \operatorname{rot} \vec{A}' d \Omega = \int_{\Omega_s} \vec{J}_s \cdot \vec{A}' d \Omega, \quad \vec{A}' \in \vec{F}_b^1, \quad (4.20)$$

onde  $\vec{A}'$  é uma função teste vetorial,  $\Omega_s$  é o domínio com bobinas com fonte de corrente;  $\Omega$  é todo o domínio de cálculo; e  $\vec{F}_b^1$  um espaço vetorial representado conforme a Equação (4.21) (LUZ, 2003):

$$\vec{F}_b^1 = \left\{ \vec{A}' \in \vec{L}^2(\Omega); \operatorname{rot} \vec{A}' \in \vec{L}^2(\Omega), \vec{n} \times \vec{A}' \Big|_{\Gamma_b} = 0 \right\}, \quad (4.21)$$

sendo  $\vec{L}^2(\Omega)$  o conjunto de funções vetoriais com as segundas derivadas contínuas.

#### 4.6 PROBLEMA MAGNETODINÂMICO

A magnetodinâmica consiste no estudo dos fenômenos magnéticos em regime transitório no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Para o estudo realizado neste trabalho, utilizou-se a formulação magnetodinâmica no domínio do tempo. O modelo magnetodinâmico no domínio do tempo aplicado ao domínio  $\Omega$ , de fronteira  $\Gamma$ , é caracterizado pelas seguintes equações diferenciais, lei de comportamento para meios isotrópicos e condições de contorno, expressas por:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}_{total}, \text{ em } \Omega \quad (4.22)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \text{ em } \Omega \quad (4.23)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \text{ em } \Omega \quad (4.24)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (4.25)$$

$$\vec{J}_{total} = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind}, \quad (4.26)$$

$$\vec{J}_{ind} = \sigma \vec{E}, \quad (4.27)$$

$$\vec{n} \times \vec{H} \Big|_{\Gamma_h} = 0, \quad (4.28)$$

$$\vec{n} \times \vec{E} \Big|_{\Gamma_e} = 0, \quad (4.29)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{B} \Big|_{\Gamma_b} = 0, \quad (4.30)$$

onde  $\Gamma = \Gamma_h \cup \Gamma_b$  ou  $\Gamma = \Gamma_e \cup \Gamma_b$ ,  $\vec{H}$  é o campo magnético em (A/m);  $\vec{J}_{total}$ ,  $\vec{J}_s$ , e  $\vec{J}_{ind}$  são respectivamente, a densidade superficial de corrente total, densidade superficial de corrente fonte e densidade superficial de corrente induzida em materiais condutores, ambos em (A/m<sup>2</sup>);  $\vec{E}$  é o campo elétrico induzido pela variação temporal do campo magnético em (V/m);  $\vec{B}$  é a indução magnética em (T);  $\mu$  é a permeabilidade magnética em (H/m);  $\sigma$  é a condutividade elétrica em (S/m); e  $\vec{n}$  é o vetor normal à superfície da fronteira  $\Gamma$  do domínio de cálculo  $\Omega$ .

Logo, para esse estudo, assume-se que os vetores de campo são finitos em seu domínio e que, em todos os pontos ordinários, esses vetores sejam funções contínuas com derivadas contínuas. Com isso, entende-se como ponto ordinário, um ponto em cuja vizinhança as propriedades constitutivas do meio (permeabilidade, permissividade e condutividade) sejam contínuas (LUZ, 2003). Descontinuidades nos vetores de campo ou em suas derivadas podem ocorrer, entretanto, em superfícies onde exista uma mudança abrupta das propriedades constitutivas do meio.

#### 4.6.1 FORMULAÇÃO EM POTENCIAL VETOR MAGNÉTICO E EM POTENCIAL ESCALAR: FORMA FORTE

Neste trabalho, para resolver o sistema de Equações (4.22) a (4.30), utilizam-se dois potenciais: o potencial vetor magnético  $\vec{A}$  e o potencial escalar elétrico  $V$ . A partir da equação (4.24), pode-se definir:

$$\vec{B} = rot \vec{A}. \quad (4.31)$$

Substituindo a Equação (4.31) em (4.23), pode-se definir:

$$\vec{E} = -grad V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}. \quad (4.32)$$

Ainda, substituindo a Equações (4.31) e (4.32) em (4.25) e em (4.26), respectivamente, e posteriormente em (4.22), tem-se a equação diferencial parcial resultante para esta formulação, conforme a Equação (4.33):

$$rot(\mu^{-1} rot \vec{A}) + \sigma grad V + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s. \quad (4.33)$$

Essa equação é conhecida como a formulação  $\vec{A}-V$  na forma forte para a formulação magnetodinâmica no domínio do tempo. A resolução da Equação (4.33) nem sempre podem ser obtida analiticamente. Com isso, torna-se necessária a utilização de métodos numéricos para obter uma solução aproximada do problema. Como no problema magnetostático, a formulação em potencial vetor magnético necessita de impor condições suplementares para assegurar a unicidade da solução.

#### 4.6.2 FORMULAÇÃO EM POTENCIAL VETOR MAGNÉTICO E EM POTENCIAL ESCALAR: FORMA FRACA

Para discretizar a formulação magnetodinâmica, como realizado no problema magnetostático, conduzem-se as equações escritas de uma forma diferencial para uma forma integral, a qual se adapta melhor a discretização pelo método de elementos finitos.

A forma fraca da Equação (4.33), domínio do tempo, é obtida aplicando-se o método dos resíduos ponderados. A equação integral resultante é dada por (LUZ, 2003):

$$\int_{\Omega} \mu^{-1} \text{rot } \vec{A} \cdot \text{rot } \vec{A}' d\Omega + \int_{\Omega_c} \sigma \text{grad } V \cdot \vec{A}' d\Omega + \int_{\Omega_c} \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cdot \vec{A}' d\Omega = \int_{\Omega_s} \vec{J}_s \cdot \vec{A}' d\Omega, \quad \vec{A}' \in \vec{F}_b^1. \quad (4.34)$$

sendo  $\vec{A}'$  uma função teste vetorial e  $\vec{F}_b^1$  um espaço vetorial representado pela Equação (4.21). Referente aos domínios de cálculo tem-se que  $\Omega_c$  é o domínio com materiais condutores,  $\Omega_s$  é o domínio com bobinas com fonte de corrente, e  $\Omega$  é todo o domínio de cálculo.

A Equação (4.34) é utilizada para aplicar o método de elementos finitos, em que consiste em realizar uma malha na estrutura em análise e interpolar as incógnitas sob os elementos da malha. Com isso, ao aplicar o MEF na Equação (4.34), encontra-se uma matriz cujas incógnitas são os vetores potenciais magnéticos. Aplicando as condições de contorno na matriz e resolvendo o sistema matricial, determinam-se os valores dos potenciais vetores magnéticos no domínio de cálculo. Para o potencial vetor, são usados elementos de arestas e para o potencial escalar são utilizados os elementos nodais (LUZ, 2003).

## 4.7 CÁLCULO DA FORÇA DE LAPLACE

O acoplamento entre as formulações magnetostática e magnetodinâmica com a formulação mecânica se dá em função das forças de Laplace. A densidade volumétrica de força para cada condutor percorrido por uma densidade de corrente  $\vec{J}_s$  é obtida pela Equação (4.35):

$$d\vec{F} = (\vec{J}_s \times \vec{B}) dv, \quad (4.35)$$

onde  $d\vec{F}$  é o diferencial de força em (N),  $\vec{B}$  é a indução magnética em (T),  $dv$  o diferencial de volume ( $m^3$ ) e o produto vetorial sendo representado por ( $\times$ ). Para a formulação em potencial vetor magnético, pode-se reescrever a equação da força de Laplace como sendo representado pela Equação (4.36):

$$d\vec{F} = (\vec{J}_s \times \text{rot } \vec{A}) dv. \quad (4.36)$$

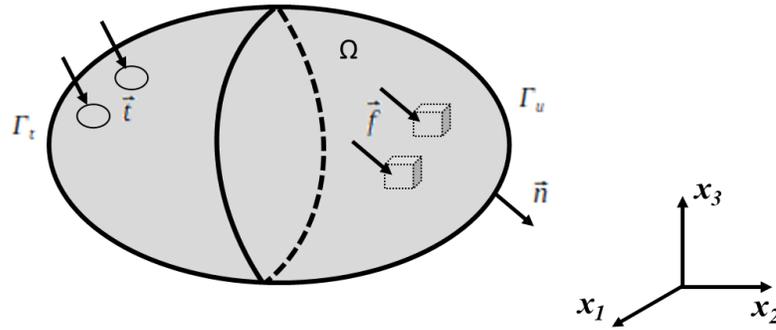
## 4.8 ACOPLAMENTO MECÂNICO

Neste tópico é apresentada a formulação de elementos finitos, oriunda do equacionamento mecânico, utilizada para calcular o deslocamento sofrido nos enrolamentos em função da força de Laplace da Equação (4.36) originada pela presença da indução magnética.

### 4.8.1 ELASTICIDADE LINEAR

Considere um corpo elástico, isotrópico e homogêneo ocupando um domínio  $\Omega \in \mathbb{R}^3$  cuja fronteira  $\Gamma$  é constituída de duas partes complementares  $\Gamma_u$  e  $\Gamma_t$  (veja Figura 15). Uma força volumétrica  $\vec{f} = (f_1, f_2, f_3)$  pode se exercer sobre  $\Omega$  e uma força superficial  $\vec{t} = (t_1, t_2, t_3)$  sobre a fronteira  $\Gamma_t$ , as componentes  $f_i$  e  $t_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , sendo consideradas segundo a direção  $x_i$ . Considera-se que um deslocamento  $\vec{u} = \bar{\vec{u}}$  é estabelecido sobre a fronteira  $\Gamma_u$ .

Figura 15 – Problema de elasticidade linear definido por um corpo elástico, isotrópico e homogêneo ocupando um domínio  $\Omega \in \mathbb{R}^3$ .



Fonte: LUZ, 2003, modificada.

O objetivo é determinar os campos de deslocamentos  $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)$  no domínio  $\Omega$  e o tensor simétrico das restrições  $\sigma = (\sigma_{ij})$ ,  $i, j = 1, 2, 3$  que aparecem em  $\Omega$  sujeito a aplicação das forças  $\vec{f}$  e  $\vec{t}$ . As restrições  $\sigma_{ii}$  são ditas restrições normais, e  $\sigma_{ij}$ ,  $i \neq j$ , restrições de cisalhamento. No contexto das hipóteses de pequenos deslocamentos, o estado de deformação é representando pelo tensor das deformações linearizadas  $\varepsilon = (\varepsilon_{ij})$  definido pela Equação (4.37):

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (4.37)$$

Em um meio elástico linear e isotrópico, a lei de comportamento, ou lei de Hooke, associa as restrições às deformações por meio da relação:

$$\sigma_{ij} = \kappa \operatorname{div} \vec{u} \delta_{ij} + \lambda \varepsilon_{ij}, \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (4.38)$$

Sendo  $\delta_{ij} = 1$  se  $i = j$  e  $\delta_{ij} = 0$  se  $i \neq j$ ,  $\kappa$  e  $\lambda$  são as constantes de Lamé. No caso de um material elástico, essas constantes podem ser escritas em função do módulo de Young e do coeficiente de Poisson tais que:

$$\kappa = \frac{E}{1 + \nu}, \quad (4.39)$$

$$\lambda = \frac{E \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad (4.40)$$

O equilíbrio em regime estático se traduz pela seguinte equação:

$$-\sum_{i=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = f_i, \text{ em } \Omega, i = 1, 2, 3, \quad (4.41)$$

Com as condições de contorno associadas, tem-se:

$$\bar{u} \Big|_{\Gamma_u} = \bar{\bar{u}}, \quad (4.42)$$

$$-\sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} n_j \Big|_{\Gamma_t} = t_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (4.43)$$

sendo  $\bar{n} = (n_1, n_2, n_3)$  o vetor unitário normal à  $\Gamma$ . Substituindo a Equação (4.37) em (4.38) e combinando com a Equação (4.41), obtém-se a equação de equilíbrio em termos da variável  $\bar{u} = (u_1, u_2, u_3)$  (PELESKO e BERNSTEIN, 2003).

$$-\kappa \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \delta_{ij} + \frac{1}{2} \lambda \sum_{j=1}^3 \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = f_i \quad i = 1, 2, 3. \quad (4.44)$$

#### 4.8.2 FORMULAÇÃO EM DESLOCAMENTO (CINEMATICAMENTE ADMISSÍVEL)

Este item apresenta a formulação variacional do problema de elasticidade linear descrito pela Equação (4.44) e pelas condições de contorno apresentadas nas Equações (4.42) e (4.43). Torna-se importante destacar que este problema pode ser reduzido a um problema com uma condição de contorno de Dirichlet homogênea nula. Com uma mudança de variável  $\bar{u}^* = \bar{u} - \bar{\bar{u}}$ , a equação (4.44) é então verificada para  $\bar{u}^*$  com  $\bar{u}^* \Big|_{\Gamma_u} = 0$ . Esta condição é considerada a seguir.

Adotando a convenção da notação inicial (a soma sobre os índices  $i$  e  $j$  indo de 1 a 3) e aplicando o teorema da divergência, pode-se demonstrar que (JONHSON, 1987):

$$\int_{\Omega} \varepsilon_{ij}(\bar{u}') \sigma_{ij} d\Omega = - \int_{\Omega} u'_i \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} d\Omega + \int_{\Gamma} u'_i \sigma_{ij} n_j d\Gamma, \quad \forall \bar{u}' \in F_u^0(\Omega) \quad (4.45)$$

sendo  $\bar{F}_u^0(\Omega)$  o espaço das funções teste  $\bar{u}'$  que se anula sobre a fronteira  $\Gamma_u$ , isto é,  $F_u^0(\Omega) = \{ \bar{u}' = (u'_1, u'_2, u'_3) \in L^2(\Omega); \text{grad } u' \in \bar{L}^2(\Omega), \bar{u}' \Big|_{\Gamma_u} = 0 \}$ .

Multiplicando os membros de (4.41) pelas componentes  $u'_i$  da função teste  $\bar{u}'$  e combinando com a equação (4.45), obtém-se a Equação (4.46):

$$\int_{\Omega} u'_i f_i d\Omega = - \int_{\Omega} u'_i \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Omega} \varepsilon_{ij}(\bar{u}') \sigma_{ij} d\Omega - \int_{\Gamma} u'_i \sigma_{ij} n_j d\Gamma, \quad \forall \bar{u}' \in F_u^0(\Omega) \quad (4.46)$$

A integral de superfície em apresentado na Equação (4.46) pode ser limitada a fronteira  $\Gamma_t$ , a função teste  $\bar{u}'$  se anulando sobre  $\Gamma_u$ . Substituindo-se a Equação (4.43) em (4.46), obtém-se a Equação (4.47):

$$\int_{\Omega} \varepsilon_{ij}(\bar{u}') \sigma_{ij} d\Omega = \int_{\Omega} u'_i f_i d\Omega + \int_{\Gamma_t} u'_i t_i d\Gamma, \quad \forall \bar{u}' \in F_u^0(\Omega) \quad (4.47)$$

As Equações (4.38) e (4.39) são substituídas em (4.47) e, visto que,  $div \bar{u} \delta_{ij} \varepsilon_{ij}(\bar{u}') = div \bar{u} div \bar{u}'$ , obtém-se a formulação variacional do problema de elasticidade (4.44), conforme a Equação (4.48):

$$\int_{\Omega} [\lambda div \bar{u} div \bar{u}' + \kappa \varepsilon_{ij}(\bar{u}) \varepsilon_{ij}(\bar{u}')] d\Omega = \int_{\Omega} u'_i f_i d\Omega - \int_{\Gamma_t} u'_i t_i d\Gamma, \quad \forall \bar{u}' \in F_u^0(\Omega) \quad (4.48)$$

## 4.9 FUNÇÕES DE BASE NODAIS E DE ARESTA

Neste trabalho para as formulações magnetostática e magnetodinâmica foram aplicados elementos de aresta nos potenciais vetores magnéticos. Para o caso da formulação mecânica elástica, utilizou-se de elementos nodais para os deslocamentos. Este item apresenta uma breve revisão dos conceitos básicos das funções de base nodais e de aresta.

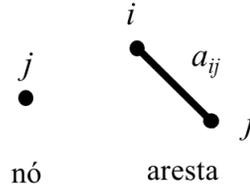
### 4.9.1 FUNÇÕES DE BASE OU DE APROXIMAÇÃO NODAIS

Sobre cada elemento, a variável escalar  $u$  é dada por uma combinação dos valores  $u_j$  dos nós, tal que (LUZ, 2003; DULAR,1996):

$$u = \sum_{j \in N} u_j s_j, \quad (4.49)$$

onde  $N$  é o conjunto dos nós de  $\Omega$ ,  $u_j$  é o valor da variável escalar no nó  $j \in N$  e  $s_j$  é a função de base associada ao nó  $j \in N$ , conforme apresentado na Figura (16).

Figura 16 – Entidades geométricas: nó e aresta ( $i, j \in N$ ).



Fonte: LUZ, 2003, pág. 27.

A função de base  $s_j$  tem como propriedade ser igual a 1 para o nó  $j$  e vale 0 para os outros nós. As funções de base nodais asseguram a continuidade, através das faces, das variáveis utilizadas (LUZ, 2003).

#### 4.9.2 FUNÇÕES DE BASE OU DE APROXIMAÇÃO DE ARESTA

Quando a incógnita é vetorial, pode-se considerar uma aproximação sobre as arestas do elemento (LUZ, 2003; DULAR, 1996). A variável vetorial  $\vec{A}$  pode ser expressa conforme a Equação (4.50):

$$\vec{A} = \sum_{j \in A} A_j \vec{s}_j, \quad (4.50)$$

onde  $A$  é o conjunto das arestas em  $\Omega$ ,  $A_j$  é a circulação de  $\vec{A}$  ao longo da aresta  $j \in A$  e definida na Equação (4.51), e  $\vec{s}_j$  é a função de base associada à aresta  $j \in A$ .

$$A_j = \int_j \vec{A} \cdot d\vec{l}, \quad j \in A. \quad (4.51)$$

A função de base  $\vec{s}_j$  tem a seguinte propriedade: a circulação de  $\vec{s}_j$  é igual a 1 ao longo da aresta  $j$  e vale 0 ao longo das outras arestas (LUZ, 2003; DULAR, 1996).

Para uma aresta  $a_{ij} = \{i, j\}$ , associa-se os campos de vetores (DULAR, 1996):

$$\vec{s}_{a_{ij}} = p_j \text{grad} \sum_{r \in N_{F, j\bar{i}}} p_r - p_i \text{grad} \sum_{r \in N_{F, i\bar{j}}} p_r, \quad (4.52)$$

onde  $N_{F,m\bar{n}}$ ,  $m, n \in N$  ( $\{m, n\} = \{i, j\}$  ou  $\{j, i\}$ ), é um conjunto de nós definidos como segue. Para um ponto de avaliação  $\bar{x}$  que pertence a um elemento geométrico adjacente a aresta  $a_{mm}$ ,  $N_{F,m\bar{n}}$  é o conjunto dos nós da face que pertence a esse elemento e que compreende o nó  $m$  mas não o nó  $n$ . Uma tal face é definida de forma única pelos elementos que tem três arestas na saída de cada nó (LUZ, 2003; DULAR, 1996).

As funções de base de aresta asseguram a continuidade da componente tangencial da variável vetorial  $\vec{A}$  e deixa livre sua componente normal (LUZ, 2003; DULAR, 1996). Esta propriedade é muito importante para discretizar os campos físicos e os potenciais vetores. Além disso, pode-se verificar a continuidade da componente normal do rotacional de  $\vec{A}$ .

#### 4.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Portanto, neste capítulo foi apresentada a formulação matemática para a determinação da corrente de *inrush* para um transformador de potência. Ainda, apresentaram-se os métodos utilizados nesta tese (método trapezoidal e método de elementos finitos) assim como os *softwares* utilizados para obtenção da solução.

Ainda, foram apresentadas as bases conceituais referentes aos esforços eletromecânicos em transformadores que podem ocorrer quando estes ficam submetidos às correntes de *inrush* e o comportamento dinâmico de enrolamentos concêntricos de transformadores. Além dos conceitos, foram abordados os cálculos relacionados com as correntes de *inrush*, forças magnéticas e esforços mecânicos atuantes nos enrolamentos dos transformadores. Também foi descrita a abordagem analítica das forças, identificando as componentes da densidade de fluxo magnético de dispersão radial e densidade de fluxo magnético de dispersão axial, responsáveis pelas componentes das forças axiais e radiais, respectivamente.

A apresentação desta metodologia para a realização dos cálculos analíticos destas grandezas serviu como base para o cálculo das forças magnéticas. Abordando também os modelos analíticos do comportamento dinâmico axial e radial de transformadores de potência com enrolamentos concêntricos. A importância do projeto na vida útil de um transformador foi explanada neste capítulo, uma vez que este deverá apresentar suportabilidade para os maiores esforços a que possa ser submetido ao longo de sua vida operativa.

# CAPÍTULO V

## 5 ANÁLISE DO TRANSFORMADOR

### 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para obtenção dos resultados, tanto para análise magnética quanto para análise mecânica do transformador quando submetido a diferentes condições de operação. Logo, são apresentados de forma detalhada os principais passos para a estruturação da solução de cada problema. Para isso, dividiu-se em três problemas para posteriormente apresentar a solução de cada problema. Basicamente, utilizou-se de dois métodos computacionais: o método trapezoidal com o *software* ATPDraw (solução da corrente de energização do banco de transformadores) e o método de elementos finitos por meio dos *softwares* ANSYS MAXWELL (solução do problema magnético) e ANSYS STRUCTURAL (solução do problema mecânico).

Para a solução da corrente de energização no banco de transformadores, inicialmente foi realizado um modelo computacional do sistema elétrico (sendo representado pelo banco composto por três transformadores monofásicos de 50 MVA). Ainda, foram utilizadas as características disponibilizadas no manual do equipamento, como as suas informações intrínsecas de funcionamento, as curvas de testes de curto-circuito e de circuito aberto. Tendo obtido os resultados, o qual seria o comportamento da corrente de *inrush* e da energização solidária nos transformadores, essa solução será necessária para obter a próxima solução (solução do problema magnético).

Desta forma, após os resultados obtidos do comportamento durante a energização dos transformadores, utilizou-se do valor do primeiro pico da corrente no *software* ANSYS MAXWELL, onde foi realizada a solução do problema magnético. Com isso, são disponibilizados por meio das simulações em 3D como resultados o comportamento da densidade

de fluxo magnético de dispersão nos enrolamentos e no núcleo do transformador e as forças magnéticas por meio das formulações das Equações de Maxwell. Esses resultados serão utilizados como dados de entrada para a solução do problema mecânico (realizada no *software* ANSYS).

Com a solução do problema mecânico, são apresentadas as análises do comportamento do enrolamento do transformador a partir da atuação das forças mecânicas. Logo, apresenta-se como resultados a deformação sofrida pelo enrolamento, o estresse mecânico e o fator de segurança para avaliar a integridade do equipamento frente a atuação da corrente de *inrush* e também devido a presença da corrente de energização.

## 5.2 ESTRUTURA E FUNCIONAMENTOS DOS *SOFTWARES*

Este tópico é destinado para apresentar a estrutura e as principais funcionalidades e características dos *softwares* utilizados nas simulações apresentadas nesta tese. Inicialmente são apresentadas as características do *software* ATP Draw, sendo destacado o método utilizado para obtenção das soluções (método trapezoidal). Por conseguinte, são apresentados os *softwares* utilizados para a simulação do problema magnético (*software* ANSYS MAXWELL) e para a simulação do problema mecânico (ANSYS STRUCTURAL), destaca-se ainda que em ambos os *softwares* foi realizado análises em 3D (tridimensionais). Ressalta-se que a geometria é próxima a real, com isso, o núcleo do equipamento foi modelado considerando as características de empilhamento das chapas metálicas e os enrolamentos foram considerados as características do formato em discos.

### 5.2.1 SOFTWARE ATP

O *software* ATP (*Alternative Transient Program*) foi criado por H. Dommel para o desenvolvimento de simulações computacionais de fenômenos transitórios e eletromagnéticos. Inicialmente, somente circuitos monofásicos poderiam ser representados. Atualmente, devido algumas melhorias, os circuitos polifásicos também podem ser representados além de possuir ferramentas necessárias para a modelagem de diversos elementos como dispositivos da eletrônica de potência (SILVA, 2012).

Este *software* consiste de uma versão para microcomputadores adaptada de um dos primeiros programas para simulação computacional de transitórios eletromagnéticos. Destaca-se que o

mesmo não é de domínio público, no entanto, sua licença de utilização é disponibilizada gratuitamente para qualquer usuário por meio dos grupos de estudos. Este programa foi desenvolvido para sistemas em MSDOS, WINDOWS e LINUX, utiliza o método trapezoidal de integração para resolver as equações diferenciais dos componentes do sistema no domínio do tempo.

Portanto, durante a solução são utilizadas técnicas de esparsidade e fatorização triangular otimizada de matrizes. Com isso, possui uma capacidade ampla, permitindo a representação de não linearidade, elementos com parâmetros concentrados e distribuídos, chaves e conectores, transformadores, reatores, entre outros. A partir dessas disponibilidades, vários estudos podem ser realizados, como a estabilidade transitória, sobretensão e subtensão, descargas atmosféricas, estudos de comportamento de máquinas elétricas, partidas de motores, harmônicos, curto-circuito, entre outras (TAMASHIRO et al, 2014).

### 5.2.2 SOFTWARE ANSYS MAXWELL

Este é um simulador de campos magnéticos que permite realizar simulações de problemas em 2D e 3D. O mesmo é um *software* difundido no setor industrial de dispositivos eletromecânicos, como: motores, transformadores, sensores, entre outros. Este programa é baseado no método de elementos finitos (MEF) e pode ser utilizado para o cálculo de campos elétricos, magnéticos, estáticos, transitórios, ainda para valores aproximados pelo regime harmônico.

As etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento são realizadas em um mesmo ambiente. Na primeira etapa (pré-processamento) é definido como o estágio para a definição das condições de contorno conforme mencionadas no início deste trabalho, fontes de campo (excitação), definição da geometria (podendo ser 2D ou 3D) aos materiais associados, configuração da simulação, entre outros. Para a definição dos materiais pode ser utilizada uma biblioteca previamente definida (que também permite a inserção de novos materiais), principalmente para a inserção das características não lineares de materiais ferromagnéticos.

Na segunda etapa (processamento) é uma etapa que não é visualizada diretamente pelo usuário. Para este *software*, como o processo de malha adaptativa é baseado no balanço energético do domínio do cálculo, ou seja, realiza-se uma comparação entre a quantidade de

energia que está no domínio da solução (na forma de corrente elétrica) com a quantidade que está sendo calculada a partir da intensidade de campos magnéticos. Após essa comparação, o erro encontrado entre os mesmos é utilizado como critério de convergência por energia. Ainda, pode-se utilizar outros parâmetros como critério de parada, como valores pontuais de campo, perdas e valores da matriz de impedância.

Para o processo de simulação, os cálculos dos valores de campo, forças, torque, matrizes de impedância, ambos podem ser acompanhados no processo evolução da simulação, tal como a convergência do processo adaptativo de criação de malha, evolução dos resultados e processos utilizados, tempo gasto para cada etapa, entre outros.

Na terceira etapa (pós-processamento) também é realizado no ambiente principal do *software* no qual é possível visualizar a carta de campos, mostrando-se a intensidade de campo magnético, campo elétrico, densidade de corrente, densidade de perdas, forças, torques, entre outros. Existe ainda uma ferramenta interna que pode ser utilizada para definir valores de quantidades não usuais, como: a quantidade de fluxo magnético que atravessa um determinado objeto. A partir disso, todos os resultados e informações serão utilizados para como condições nominais para a simulação mecânica e estrutural.

### 5.2.3 SOFTWARE ANSYS STRUCTURAL

Este é um dos *softwares* comerciais mais utilizados em problemas da engenharia que envolve o Método de Elementos Finitos (MEF). Atualmente, este *software* vem sendo utilizado em diversos ramos da engenharia, como: aeroespacial, eletrônica, automotivo, eletromagnetismo, nuclear, entre outras. Com a plataforma ANSYS Workbench (estrutura sobre a qual um conjunto mais amplo e profundo da indústria e de tecnologia avançada em engenharia pode ser simulado e construído) torna-se possível interligar os diversos subprogramas da ANSYS Corporation que atuam em todas as áreas da engenharia, respaldado pela aplicação do método numérico de solução.

Cada sistema computacional acoplado no programa se destina a um determinado tipo de análise. Os diversos tipos de análises que podem ser realizados, de modo a simular o comportamento de um conjunto real mediante a utilização do programa ANSYS Workbench, são dependentes da geometria do componente, das condições de contorno e hipóteses simplificadoras

empregadas na modelagem. Portanto, dado a importância e versatilidade do uso da plataforma ANSYS Workbench no desenvolvimento de simulações numéricas para a engenharia, este foi o *software* escolhido neste trabalho para consubstanciar as análises dos esforços mecânicos nos enrolamentos de transformadores, ocasionados pelas correntes de *inrush*. Da mesma forma como apresentado para o *software* ANSYS MAXWELL, o ANSYS STRUCTURAL também é dividido de forma geral em três etapas, conforme apresentado a seguir:

Na primeira etapa (pré-processamento), consiste na definição da estrutura que permite descrever a geometria do problema, as propriedades físicas dos materiais, a densidade das malhas e as condições de contorno. A malha de elementos finitos pode ser criada e visualizada nesta fase.

Na segunda etapa (processamento), consiste na interpretação das informações definidas durante a etapa de pré-processamento e neste caso na aplicação das equações de Maxwell para o FEMM e das equações mecânicas do comportamento estático e dinâmico para o ANSYS, pertinentes à resolução do problema, através da montagem de um sistema de equações diferenciais que descrevem o comportamento da estrutura que se encontra sob análise. Nesta fase também é levado em consideração a existência ou não da saturação magnética no sistema.

Na última etapa (pós-processamento), é utilizada para disponibilizar os resultados sob a forma de contornos e densidades. O usuário pode inspecionar a solução pontualmente, realizar o cálculo de integrais, plotar resultados de variáveis de interesse como campos elétricos ou magnéticos, potenciais, correntes, torques, entre outros. Esses resultados podem ser na forma de gráficos, ou tabelas ou em forma numérica.

### 5.3 ANÁLISES DE ACOPLAMENTOS EM TRANSFORMADORES

Conforme apresentado por Kulkarni & Khaparde (2012), o transformador de potência além de ser um equipamento construído a partir da montagem complexa de vários componentes, como o núcleo, enrolamento, isolamento, tanque, entre diversos outros componentes, o mesmo apresenta uma estrutura magnética complexa com sobreposição dos campos magnéticos, térmicos, estruturais, fluidos e acústicos. Além disso, esses equipamentos estão conectados a rede externa de energia (rede de distribuição ou transmissão) necessitando de soluções acopladas das equações do circuito em conjunto de equações, representando os campos físicos, obtidos por meio de procedimentos do MEF.

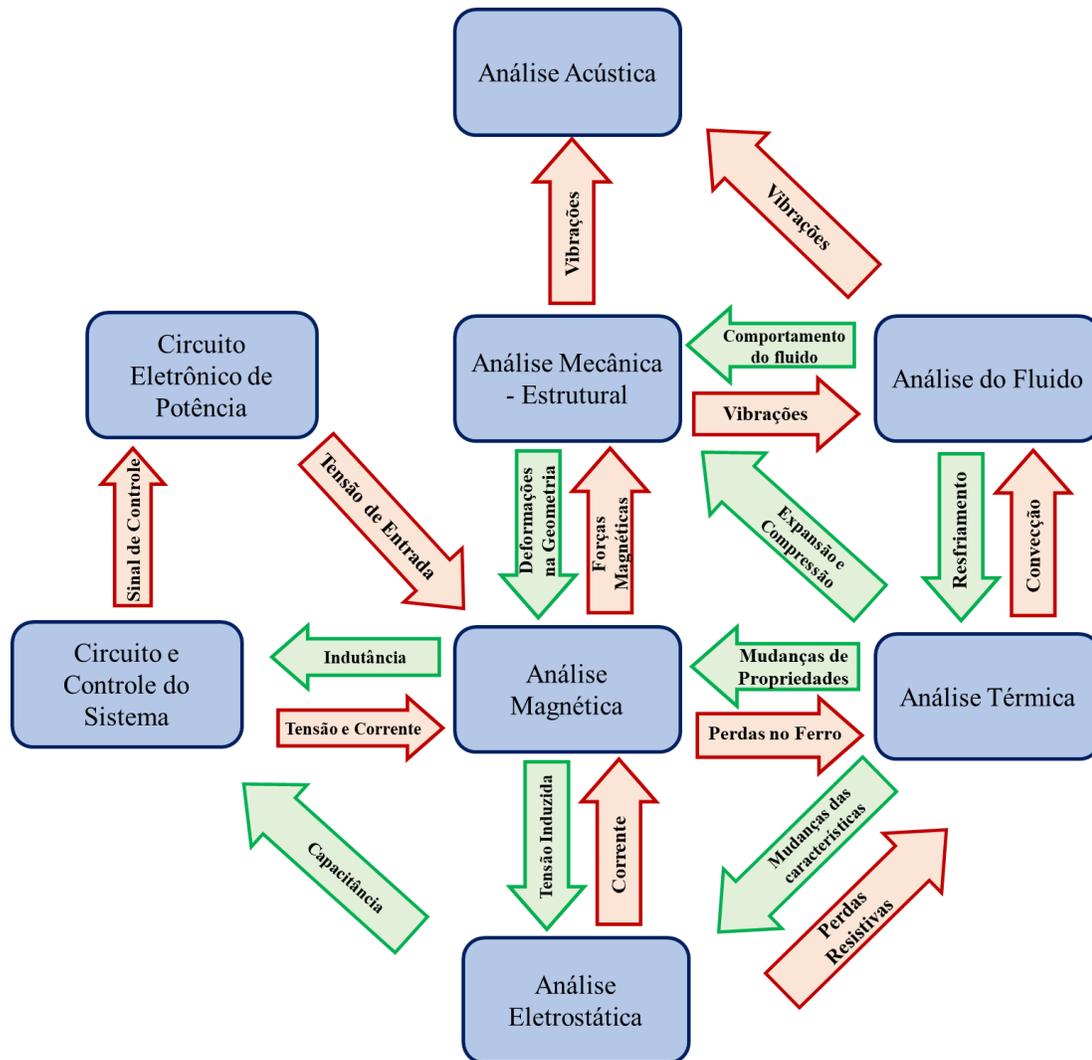
Logo, um transformador é construído com materiais de características não-lineares e propriedades anisotrópicas e a sobreposição dos vários campos (magnético, térmico, estrutural, acústico, fluidos, entre outros) representa um grande desafio ao projetista. Com isso, estudos computacionais envolvendo análises de acoplamento de campo magnético com outros campos são essenciais para obtenção de resultados de forma otimizada.

Com o avanço computacional, o cálculo de campo magnético em dispositivos elétricos tem se tornado cada vez mais viável. Diversas técnicas numéricas podem ser utilizadas para lidar com problemas de acoplamentos magnéticos, podendo ser categorizados em métodos baseados por formulações diferenciais (método de diferenças finitas), método por formulações integrais (método de elementos de fronteira) ou por métodos por formulações variacionais ou resíduos ponderados (método de elementos finitos).

Na Figura (17) são apresentados os vários acoplamentos de campo e os parâmetros utilizados nesses acoplamentos em transformadores. Por exemplo, campos magnéticos alternados produzem perdas devido as correntes parasitas e a histerese, tanto no núcleo quanto na parte estrutural. Um consequente aumento na temperatura no transformador pode levar a uma mudança considerável nas propriedades do material (condutividade e permeabilidade) que por sua vez, afetam os cálculos do campo magnético.

As forças existentes nos enrolamentos do transformador, calculadas no domínio magnético, levam a suas deformações que podem ser determinadas no domínio estrutural. Ressalta-se que essas deformações alteram a relutância magnética, tornando-se assim um problema acoplado. Outros acoplamentos entre os campos associados na Figura (17) podem ser explicados de maneira semelhante.

Figura 17 - Interação entre os acoplamentos de campo em transformadores

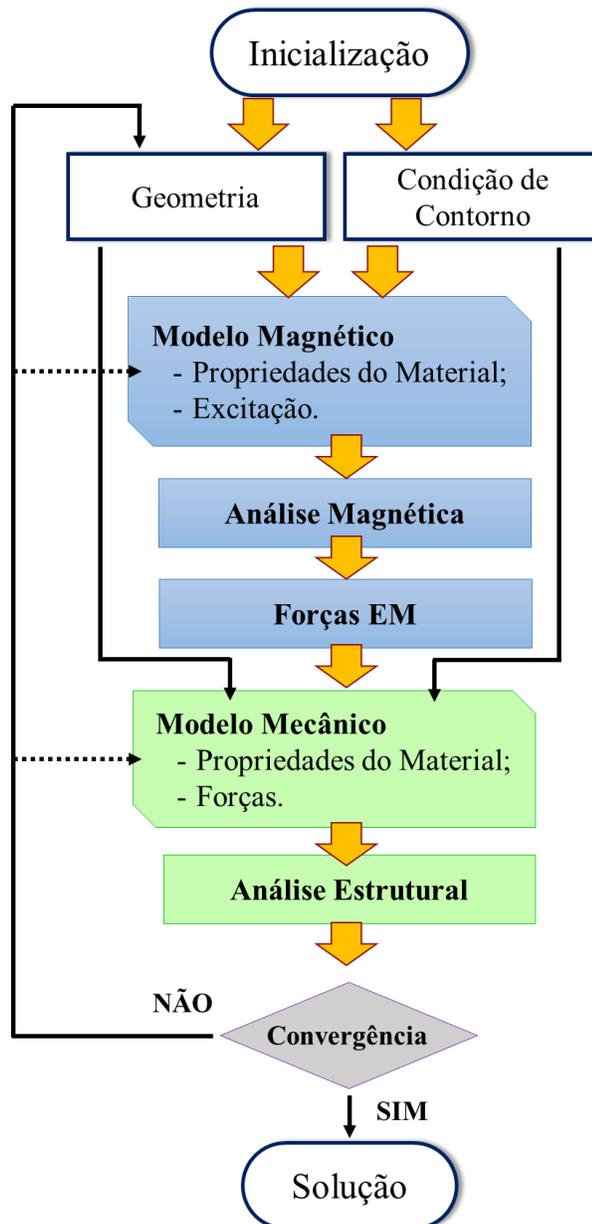


Fonte: KULKARNI & KHAPARDE. 2012. pág. 539, modificada.

Os campos magnéticos de transformadores interagem com as redes elétricas e com outros campos de acoplamento. Tais como a interação do fenômeno da corrente de *inrush* e as forças magnéticas (acoplamento magnético-circuito), saturação do circuito magnético devido a condições de desbalanceamento em conversores (acoplamento magnético-circuito eletrônico), pontos de aquecimento no enrolamento e em parte da estrutura devido as correntes parasitas (acoplamento magnético-térmico), deformações do enrolamento, barras e fio condutores devido a forças magnéticas (acoplamento magnético-estrutural), problemas de previsão de ruídos na magnetostrição (acoplamento magnético-fluido-estrutural-acústico). Este último envolve os quatros campos de acoplamento pode ser considerado como um dos problemas numéricos de maior complexidade (KULKARNI & KHAPARDE, 2012).

Ainda, para as análises de acoplamento, basicamente apresentam duas estratégias diferentes para o desenvolvimento de estudos acoplados: acoplamento forte (*strong coupling*) e acoplamento fraco (*weakly coupling*) (KALTERNBACHER, 2007; MEUNIER, 2008). Os requisitos da técnica de acoplamento forte são considerados como restritiva, pois há sempre a discretização dos elementos finitos idênticos e realiza o mesmo procedimento no domínio do tempo com todos os domínios físicos envolvidos. De acordo com Shimidt (2011), as máquinas elétricas e os transformadores podem ser analisados de forma eficiente por meio dos estudos de acoplamento fraco. Desta forma, nesta análise é utilizado o acoplamento fraco entre a análise de acoplamento magnética e a estrutural. Na Figura (18) é ilustrado o fluxograma da análise magneto-mecânica de acoplamento fraco para transformadores por meio do método de elementos finitos.

Figura 18 – Fluxograma com a representação do acoplamento fraco magnético-mecânico.



Fonte: O Autor.

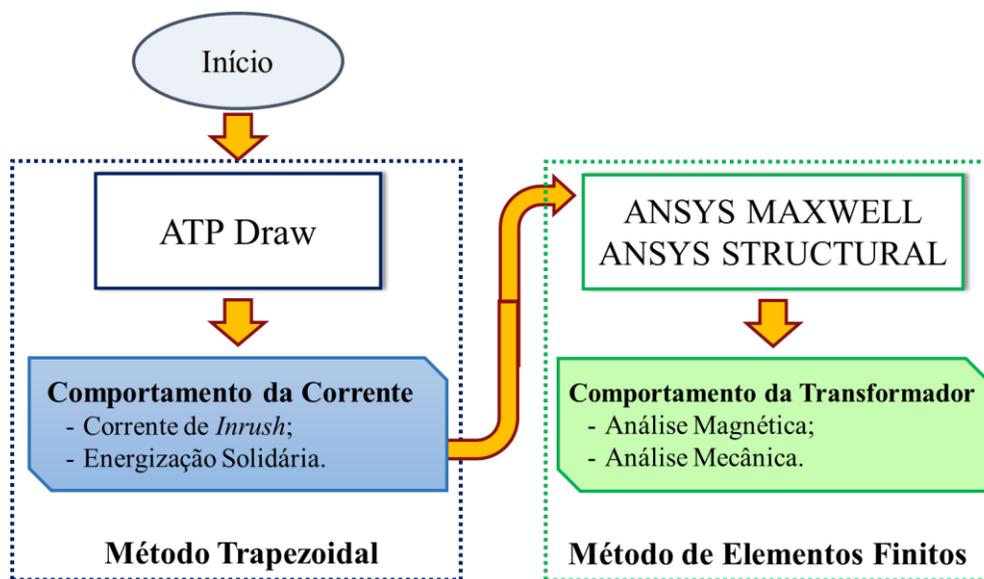
Na solução do problema de acoplamento magneto-mecânico, as deformações totais, tensões mecânicas sofridas e a análise do grau de segurança são possíveis a partir da obtenção das forças magnéticas obtidas para a condição de operação do equipamento elétrico. Destaca-se que os dados intrínsecos dos materiais podem ser afetados devido as deformações ou ainda pela movimentação de peças do transformador.

#### 5.4 METODOLOGIA COMPUTACIONAL

Os transformadores de potência são projetados para suportar diversas situações severas no local de instalação. Entre essas situações, destacam-se as correntes geradas em condições normais de funcionamento (como a corrente de *inrush*), as quais podem causar diferentes efeitos, como: altas correntes de partidas (apresentando elevadas forças ou tensões mecânicas nos enrolamentos), tensões distorcidas (devido a presença de harmônicos), vibrações magneto-mecânicas (movimento geométrico dos enrolamentos), diminuição do tempo de vida (devido ao aquecimento da parte ativa), entre outros efeitos (FONSECA et al, 2018). Portanto, a metodologia utilizada neste trabalho para obtenção dos resultados foi dividida em duas etapas, conforme apresentado na Figura (19), onde a primeira etapa referente a solução do método trapezoidal, foi utilizado o *software* ATP para obtenção do comportamento da corrente dos transformadores durante a sua energização (corrente de *inrush* e energização solidária).

A partir desta solução, foram realizadas as análises utilizando o método de elementos finitos. Inicialmente, a análise do problema magnético realizado no *software* ANSYS MAXWELL, foi apresentada resultados das forças magnéticas no enrolamento do transformador. Por conseguinte, realizou-se a análise mecânica no *software* ANSYS STRUCTURAL para obter o comportamento do enrolamento a partir da solicitação mecânica para cada condição de operação.

Figura 19 – Fluxograma da metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho.

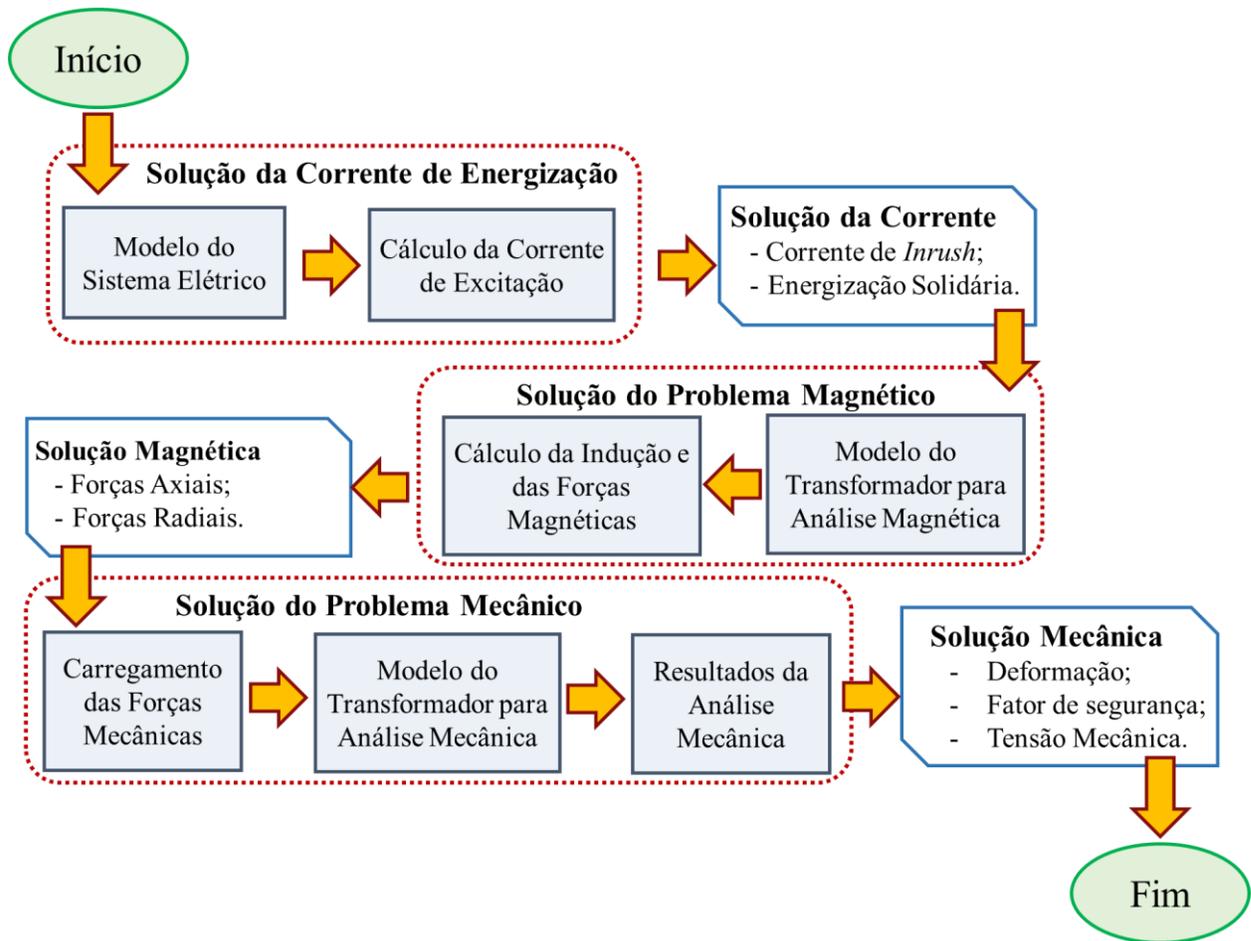


Fonte: O Autor.

Assim, de forma detalhada é apresentado um fluxograma com a descrição pontual das etapas realizadas durante a metodologia para o desenvolvimento do estudo no transformador, conforme a Figura (20).

Assim, destaca-se que para obtenção do comportamento da corrente durante a energização do banco de transformadores de potência no *software* ATP, o cenário foi criado com todo o sistema elétrico modelado, sendo adicionadas as características intrínsecas do equipamento, como os dados do fabricante. Com o comportamento da corrente durante a energização (corrente de *inrush* e energização solidária), foi realizada a análise magnética, obtendo-se resultados referente a indução magnética na parte ativa do transformador (núcleo e enrolamentos) e as forças magnéticas (forças de Laplace) no enrolamento do equipamento. Ressalta-se que estas simulações foram realizadas em 3D tanto na condição estática quanto no domínio do tempo, sendo extraídos dados relevantes para as análises de fenômenos físicos.

Figura 20 – Fluxograma para análise da condição de energização do transformador.



Fonte: O Autor.

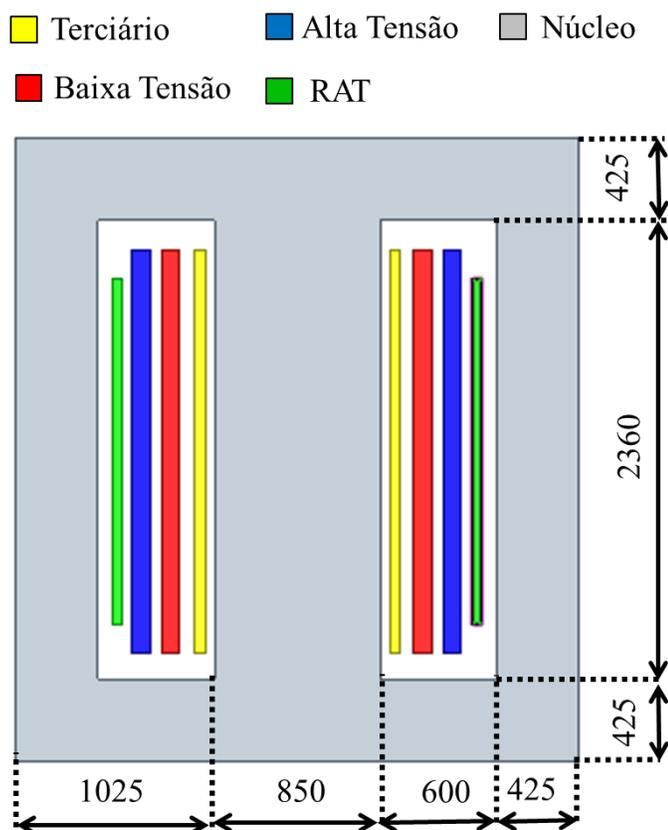
Posteriormente, as forças magnéticas foram importadas para a solução do problema mecânico, onde por meio do *software* ANSYS STRUCTURAL e utilizando o método de elementos finitos, obteve-se com precisão o comportamento dinâmico da estrutura frente as forças aplicadas durante a sua energização. Com isso, são apresentados resultados referente a deformação total sofrido no enrolamento, tensão mecânica a partir dos esforços aplicados e o grau de segurança do equipamento durante a sua operação. Destacam-se as simulações foram realizadas por meio de um modelo em 3D tanto para análise estática quanto para análise no domínio do tempo.

## 5.5 CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR DE 50MVA

O comportamento físico de um transformador de potência monofásico de 50MVA (tendo as relações de tensão de 230/3 kV – 69/3 kV – 13,8 kV) é proveniente do sistema ELETROBRÁS-ELETRONORTE e este equipamento elétrico está instalado na subestação do Guamá permitindo a conexão da cidade de Belém – PA ao sistema elétrico nacional. O equipamento em estudo nesta tese possui os enrolamentos concêntricos, sendo que os enrolamentos de baixa tensão (BT), de alta tensão (AT) e regulador de alta tensão (RAT) são dos tipos discos. O enrolamento terciário (TERC) é do tipo hélice, sendo conectados por meio de um banco trifásico.

Ressalta-se que para implementação computacional por meio do método de elementos finitos é necessário que tenha conhecimento da geometria, assim como as características intrínsecas do equipamento, como as características magnéticas e mecânicas (que são adicionadas no pré-processamento no *software* para cada análise). Na Figura (21) são apresentadas as principais características geométricas, magnéticas e mecânicas do transformador em análise.

Figura 21 - Demonstração das disposições e dimensões do transformador de 50MVA (medidas em milímetros).



Fonte: O Autor.

Essas informações foram obtidas no manual do equipamento, assim como as informações apresentadas na Tabela (6), sendo demonstradas as principais características do equipamento elétrico. Essas informações são necessárias para a construção do modelo em 3D e para inserção das características para a análise durante a simulação mecânica.

Tabela 6 – Características geométricas dos enrolamentos do transformador.

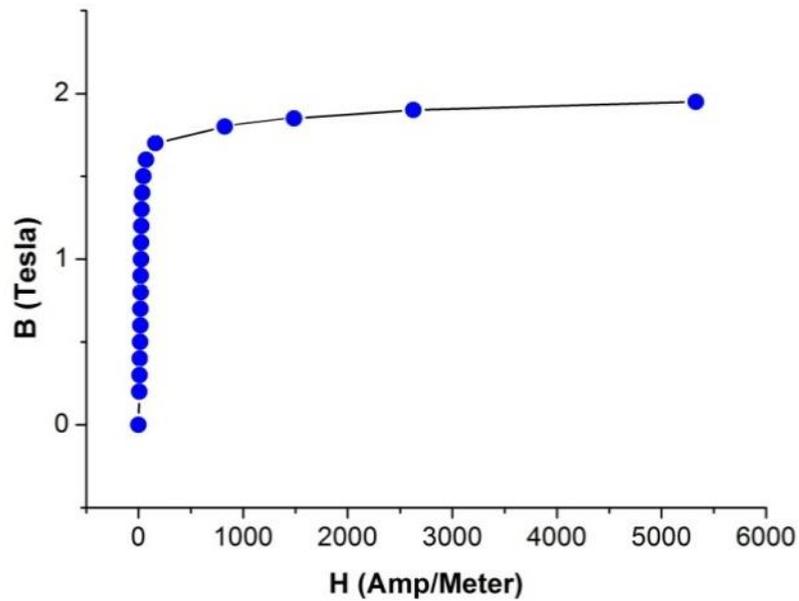
Características	Enrolamentos		
	AT	BT	TERC
Ligação do Banco	Estrela	Estrela	Delta
Potência (MVA)	50	50	2
Tensão (kV)	230	69	13.8
Seção do Cobre (mm <sup>2</sup> )	123,72	397,20	447,72
Frequência (Hz)	60		
Tensão de Escoamento do Cobre (MPa)	130		
Tensão ultima do Cobre (MPa)	280		
Densidade do Cobre (kg/m <sup>3</sup> )	830		
Módulo de Young (MPa)	1,1·10 <sup>5</sup>		

Características	Enrolamentos		
	AT	BT	TERC
Número de espiras	572	191	66
Diâmetro médio (mm)	1502	1179	928
Altura do Enrolamento (mm)	2080	2080	2080

Fonte: O Autor.

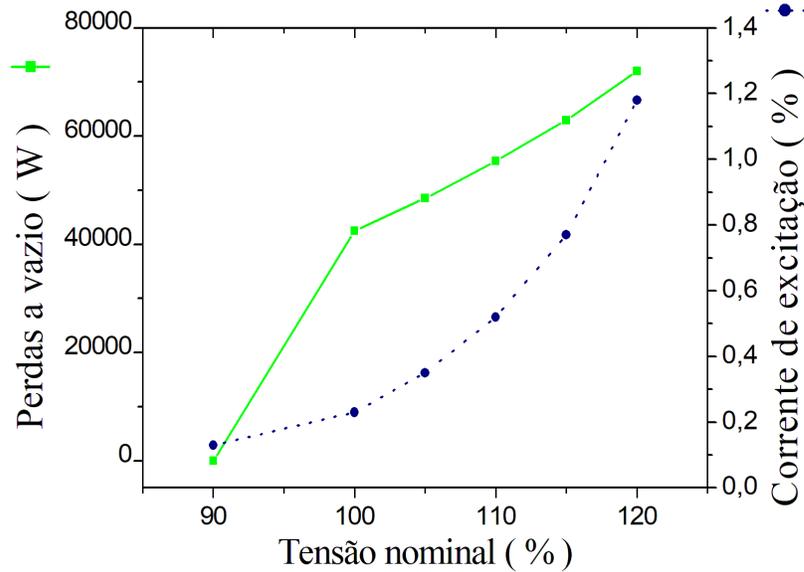
Na Figura (22) é mostrada a curva B-H do núcleo do transformador. Essas informações são adicionadas durante a simulação magnética.

Figura 22 – Curva de saturação do núcleo do transformador.



Na Figura (23) é apresentado informações de testes de medição do equipamento, sendo importantes para o desenvolvimento computacional correto do modelo em análise. Essas são informações que são utilizadas na análise e obtenção do comportamento da corrente durante a energização, sendo informações obtidas em ensaio de curto-circuito e ensaios de perdas a vazio.

Figura 23 - Dados de ensaios do transformador monofásico de 50MVA.



No tópico a seguir será apresentada a metodologia utilizada para obter a solução da corrente durante a energização dos transformadores, assim como a solução do problema magnético e do problema mecânico.

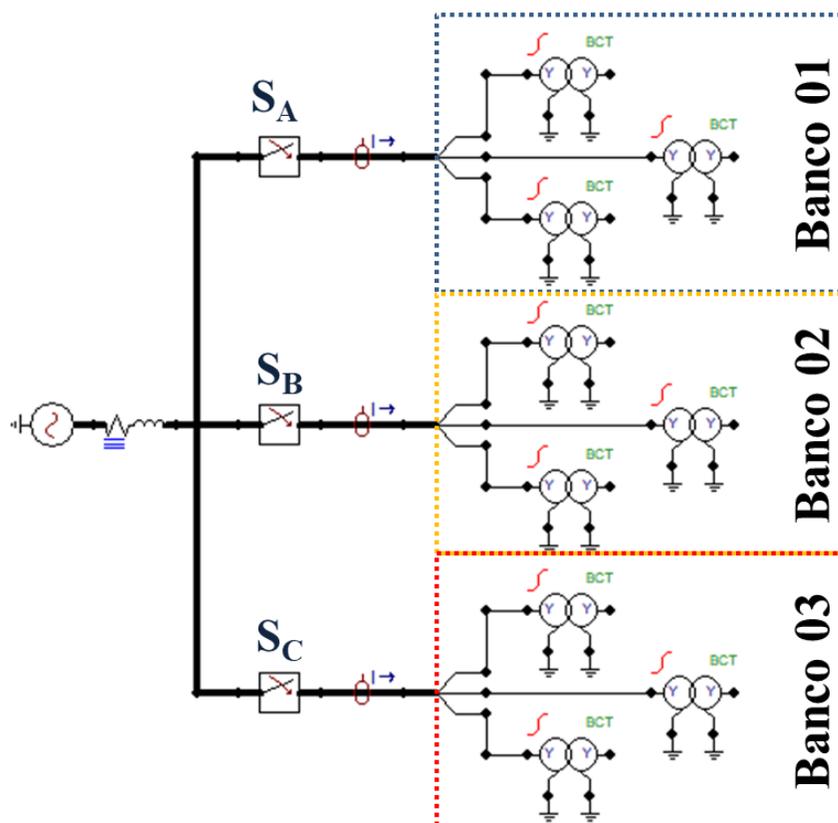
## 5.6 SOLUÇÃO DA CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO

Após adicionar as configurações do transformador, conforme apresentadas nos tópicos anteriores, foi realizada a simulação para obter o comportamento da corrente durante a energização dos transformadores (corrente de *inrush* e energização solidária). A configuração simulada está representada na Figura (24), sendo representada por banco de transformadores monofásicos.

Neste tipo de simulação, os transformadores não estão conectados as cargas (operação a vazio), os disjuntores são representados por meio das chaves ( $S_A$ ,  $S_B$  e  $S_C$ ) para os respectivos bancos de transformadores (banco 01, banco 02 e banco 03). Portanto, os transformadores do banco 02 e 03 estão conectados quando no instante de tempo de 0,1 segundos o banco 01 é energizado. Com isso, pode ser observado o comportamento da corrente de *inrush* para o banco 01 e o comportamento da energização solidária para os demais bancos de transformadores.

Ressalta-se que os transformadores presentes nos bancos apresentam características semelhantes, no entanto, são equipamentos distintos, apresentando acionamento em instantes de tempo diferentes.

Figura 24 – Modelagem dos bancos de transformadores monofásicos da subestação Guamá.

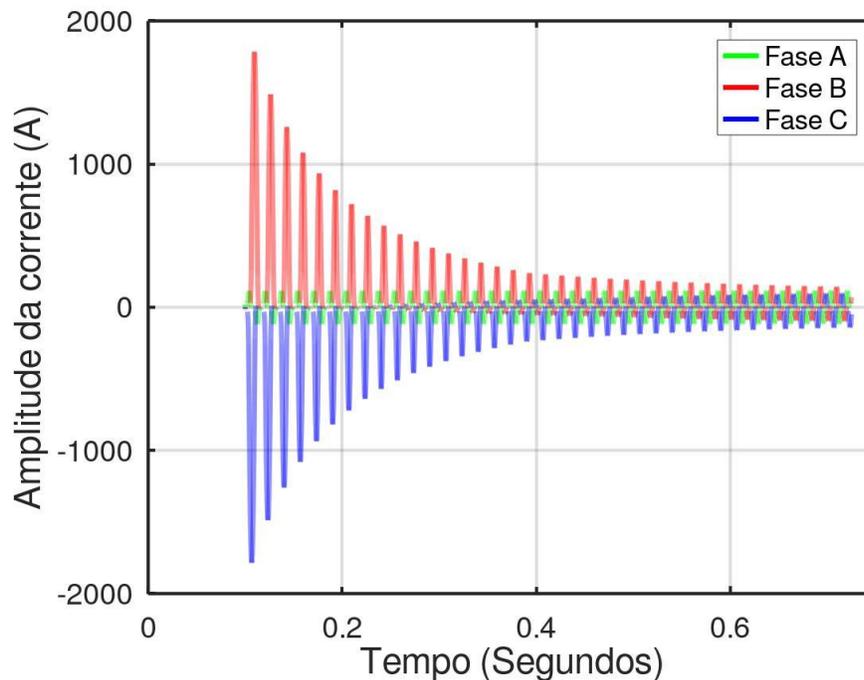


Fonte: O Autor.

Torna-se importante enfatizar que o modelo computacional do transformador utilizado na simulação (representando o banco trifásico de transformadores) para reproduzir com precisão o comportamento da corrente de *inrush* em estudos transitórios de baixa frequência foi possível por meio da rotina BCTRAN, sendo esta uma rotina de suporte que permite a representação linear por meio das matrizes  $[A] - [R]$  ou  $[R] - [\omega L]$ , tanto para transformadores trifásicos quanto monofásicos de múltiplos enrolamentos, estes podendo ser do tipo núcleo envolvido ou núcleo envolvente. Para a reprodução deste modelo utilizou-se de dados de testes de curto-circuito para obtenção da corrente de excitação e de perdas a vazio (VIANA, 2010).

Na Figura (25) é apresentado o comportamento da corrente de *inrush* obtida para um banco 01 de transformadores monofásicos de 50 MVA, quando energizado no instante de tempo de 0,1 segundos. Pode-se observar que a corrente durante a sua energização, a corrente alcança uma amplitude próxima a sete (7) vezes a corrente nominal. Ainda, a partir do instante de tempo de 0,3 segundos, o valor da corrente de energização será menor que a corrente nominal projetada para o equipamento, o que não apresentará problema relacionado às forças magnéticas no enrolamento do transformador.

Figura 25 – Corrente de *inrush* para o banco 01 de transformadores.

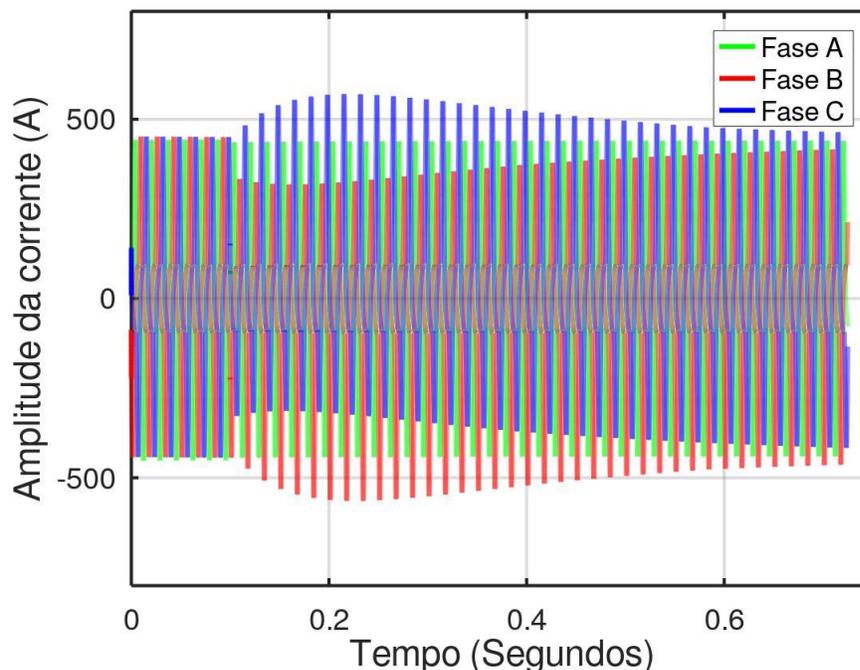


Fonte: O Autor.

Conforme apresentado por Kulkarni e Khaparde (2012) para um banco de transformadores monofásicos, a máxima corrente de *inrush* é aproximadamente igual a  $2/3$  da corrente máxima do primeiro pico ( $i_{0max}$ ) que é a corrente correspondente para cada transformador, conforme apresentado na Equação (3.8).

Na Figura (26) é apresentado o comportamento da corrente do banco 02 de transformadores durante a energização do banco 01. Com isso, pode-se observar que durante a energização solidária, o transformador apresenta uma corrente que pode alcançar 1,5 vezes a corrente nominal.

Figura 26 – Energização solidária para o banco 02 de transformadores.



Fonte: O Autor.

Conforme pode ser observado, o efeito da energização solidária ocorre por um tempo maior quando comparado a corrente de *inrush*. Ainda, isso é reforçado por Kulkarni e Khaparde (2012), sendo que os mesmos afirmam que o decaimento da corrente de *inrush* normalmente ocorre em alguns ciclos, enquanto para a energização solidária, isso persiste no circuito por uma duração relativamente longa.

## 5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a estrutura e funcionalidade dos *softwares* utilizados para obtenção dos resultados que serão apresentados no capítulo a seguir (capítulo 6). Para isso, foram apresentados os passos para a realização das análises computacionais em transformadores baseada no método trapezoidal e no método de elementos finitos (MEF), quando submetido a operação nominal e a fenômenos transitórios.

Portanto, inicialmente foi realizada uma breve apresentação sobre a metodologia para análise da energização em transformadores de potência, por meio do *software* ATP Draw. Em seguida, apresentou-se a metodologia para as análises magnética e mecânica no equipamento em estudo,

sendo utilizados os *softwares* ANSYS MAXWELL e ANSYS STRUCTURAL, para as análises em 3D dos resultados dos modelos magnéticos e mecânicos, respectivamente. Para isso, utilizou-se de malhas discretizadas, com materiais específicos e parâmetros intrínsecos do equipamento.

Para o desenvolvimento de todas as análises, utilizou-se a metodologia de forma dividida, sendo três etapas: solução da corrente de energização, solução do problema eletromecânico e solução do problema mecânico. Na primeira etapa, solução da corrente de energização, foi desenvolvido um modelo do sistema elétrico para obtenção do comportamento da corrente de *inrush* e energização solidária para o banco trifásico de transformadores por meio do *software* ATP Draw (método trapezoidal). A partir das simulações, pode ser observado que o decaimento da corrente de *inrush* ocorre por alguns ciclos (décimos de segundos), no entanto, a energização solidária persiste por um tempo maior (segundos).

Na segunda etapa, destinada a solução do problema magnético em 3D, realizada por meio do método de elementos finitos (no *software* ANSYS MAXWELL), onde as análises são realizadas utilizando o comportamento da corrente durante a energização do transformador. Por conseguinte, realizou-se o cálculo da densidade de fluxo magnético de dispersão (tanto nos enrolamentos quanto no núcleo do equipamento). Com isso, apresenta-se ainda como resultados o comportamento das forças magnéticas em suas componentes (axiais e radiais).

A terceira etapa referente a solução do problema mecânico, utiliza-se dos resultados do comportamento das forças magnéticas no enrolamento do transformador (forças em componentes axiais e radiais). Essas informações são importadas para obtenção da solução do problema mecânico, onde será disponibilizado resultado referente ao comportamento da deformação sofrida no enrolamento, estresse mecânico e ainda informações relacionada ao fator de segurança, com objetivo de avaliar a integridade do dispositivo com as solicitações sofridas durante a energização. Todas essas análises são realizadas em simulações em 3D, também pelo MEF (*software* ANSYS STRUCTURAL).

# CAPÍTULO VI

## 6 RESULTADOS FINAIS

### 6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO CAPÍTULO

Mesmo que os resultados apresentados por cálculos analíticos tenham sua importância na estimativa de valores durante o desenvolvimento de projeto dos transformadores, essa estratégia apresenta resultados satisfatórios somente quando aplicadas aos dispositivos físicos de geometria relativamente simples e homogênea (AZEVEDO, 2007). Uma alternativa é a utilização de estudos computacionais com o uso de métodos numéricos, o que permite a resolução de problemas físicos com geometrias complexas, com diferentes condições de contornos e diferentes materiais. Portanto, neste trabalho todos esses fenômenos são controlados por meio de *softwares* computacionais destinados (ANSYS MAXWELL e ANSYS STRUCTURAL) à resolução dos métodos numéricos.

Com isso, destaca-se que o MEF é uma técnica utilizada por esses *softwares* que é destinada a obtenção de solução de problemas regidos por equações diferenciais. Tendo em vista que a geometria de um transformador é um problema de complexidade elevada para as aproximações dos cálculos analíticos. Logo, este método constitui-se como uma alternativa para o desenvolvimento de tais projetos complexos, pois detalhas e variações construtivas podem ser facilmente incluídas na modelagem desses dispositivos (BIANCHI, 2005).

Por isso, neste capítulo será apresentada a modelagem de transformadores por meio do MEF e também a apresentação das análises dos resultados alcançados por meio das simulações computacionais desenvolvidas. Para facilitar à compreensão, assim como apresentado na metodologia, as simulações são apresentadas por etapas. Inicialmente, será apresentada a solução do problema magnético (ANSYS MAXWELL). Nestas análises é apresentado o comportamento da

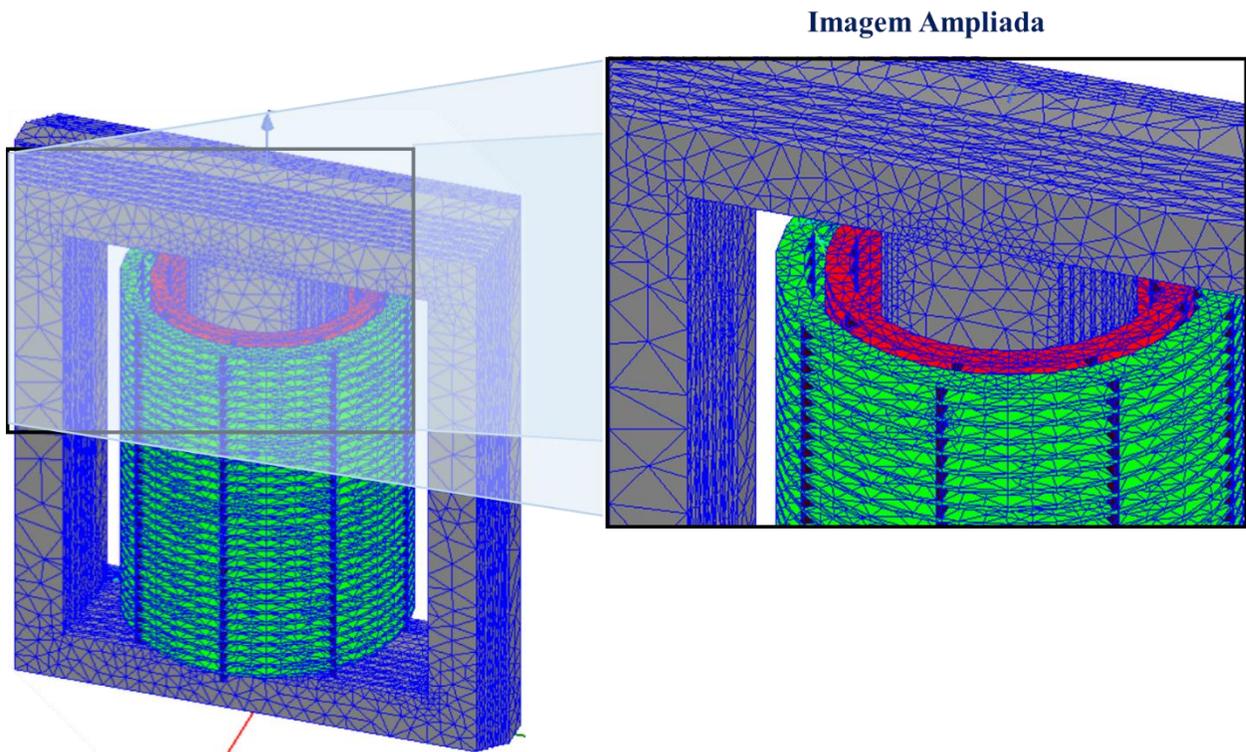
indução magnética (tanto no núcleo quanto nos enrolamentos) e também as forças magnéticas que atuam no enrolamento (sendo as forças resultantes das componentes axial e radial).

Por conseguinte, na análise do problema mecânico (ANSYS STRUCTURAL), as forças magnéticas obtidas na análise do problema magnético são importadas para este ambiente computacional, a fim de analisar o comportamento dinâmico a partir dos esforços realizados por estas forças. Com isso, são fornecidos como resultados: o estresse mecânico, a deformação total sofrida pelo enrolamento e o grau de segurança do mesmo devido às perturbações e aos esforços sofridos. Ressalta-se que são apresentados os resultados na condição estática para as diferentes condições de operação (corrente de *inrush* e energização solidária). No entanto, somente para a corrente de *inrush* são apresentados resultados no domínio do tempo, tanto para análise magnética quanto para análise mecânica.

## 6.2 SOLUÇÃO DO PROBLEMA MAGNÉTICO

O modelo em 3D do transformador monofásico na análise magnética realizado no *software* ANSYS MAXWELL, sendo composto por 459.053 elementos tetraédricos. Na Figura (27) é ilustrado o transformador em estudo para a análise computacional.

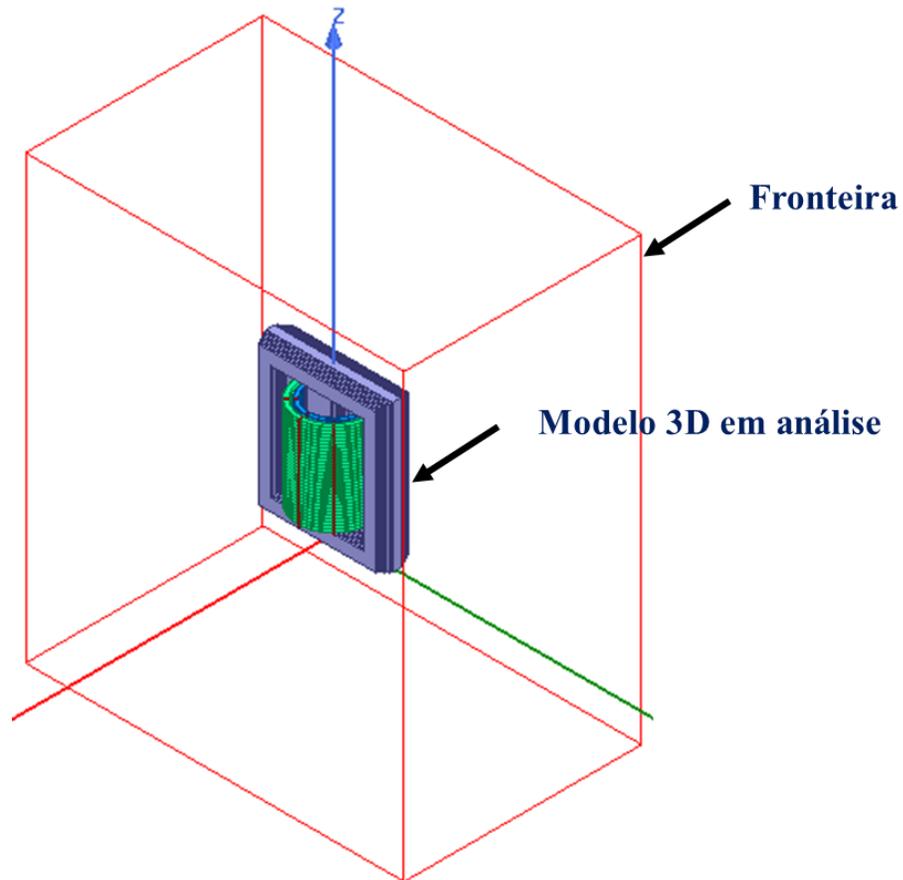
Figura 27 – Geometria em 3D do transformador de 50MVA de elementos tetraédricos.



Fonte: O Autor.

Nesta análise utiliza-se a condição de contorno de Dirichlet, a qual consiste na especificação do valor do potencial vetor na região onde a condição é aplicada. Se o valor do potencial é nulo, significa que o campo magnético é tangente à fronteira e o fluxo magnético não pode ultrapassar o contorno. Na Figura (28) é apresentada a região de contorno, sendo representada pelo perímetro de um cubo com linhas vermelhas. Esta região de contorno foi utilizada na análise magnética. No entanto, nos resultados a mesma é suprimida, tendo como objetivo ilustrar com a maior proximidade possível os resultados.

Figura 28 – Geometria em 3D do transformador de 50MVA de elementos tetraédricos.



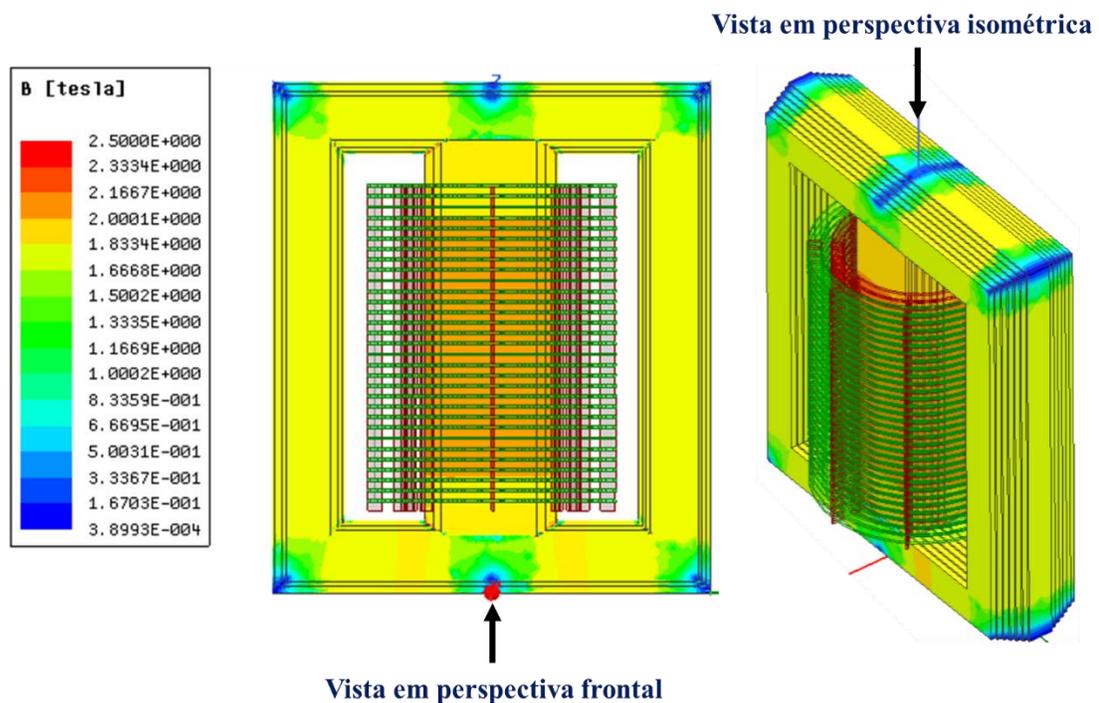
Fonte: O Autor.

Como principal objetivo a realização de simulações que forneçam resultados próximos ao real, na geometria utilizada na simulação foi levada em consideração características específicas do equipamento, como por exemplo, a disposição em discos dos enrolamentos do transformador. Com isso, necessita-se de uma maior disponibilidade computacional para a discretização de todo o modelo. Ainda, os resultados poderão apresentar um comportamento um pouco diferente do convencional, tendo em vista que os demais trabalhos há uma simplificação da geometria, onde a mesma é representada como um único sólido.

### 6.2.1 CONDIÇÃO NOMINAL

Na Figura (29) é apresentado o comportamento da indução magnética no núcleo do transformador quando o equipamento opera em condição nominal. Com isso, pode-se observar que a distribuição no interior do transformador não sofre alterações do seu caminho preferencial (núcleo magnético), nas extremidades do núcleo do transformador o fluxo da indução magnética diminui. A partir desta simulação, pode ser obtidas informações e dados para a análise do problema mecânico.

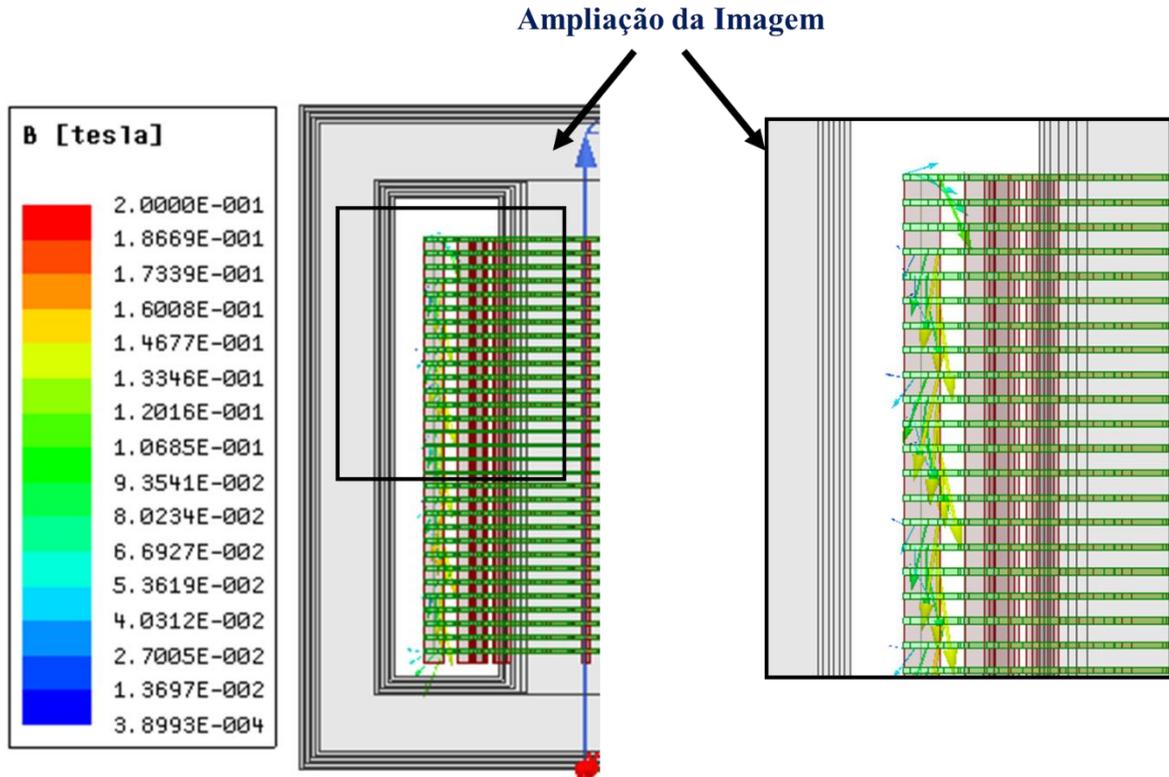
Figura 29 – Indução magnética no núcleo do transformador para a condição nominal.



Fonte: O Autor.

Com isso, na Figura (30) ilustra os vetores de indução magnética no enrolamento externo (AT) do transformador para a condição nominal de operação.

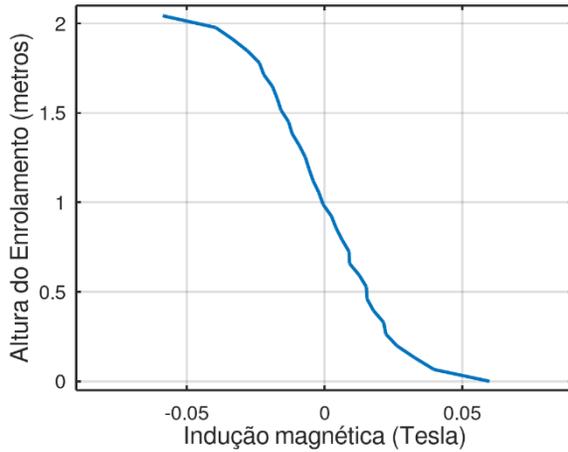
Figura 30 – Vetor de indução magnética no enrolamento externo (AT) do transformador para a condição nominal.



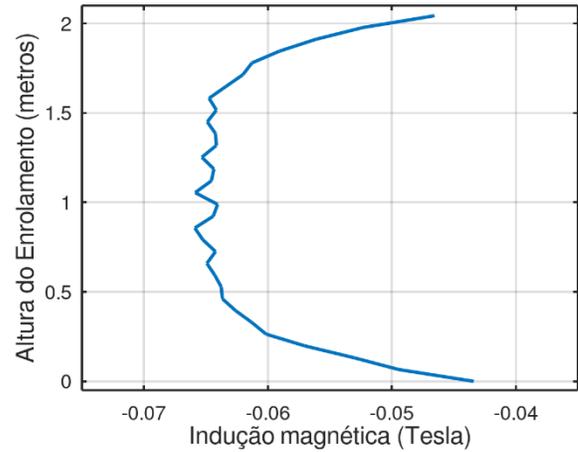
Fonte: O Autor.

O vetor de indução magnética pode ser representado em suas componentes vetoriais (radiais e axiais), representados respectivamente pelas Figuras (31-a) e (31-b). Os valores máximos obtidos para a componente radial são encontrados nas extremidades do enrolamento, sendo na parte superior e inferior ( $B_a = 0,062T$ ). Da mesma forma, em módulo, os valores máximos obtidos para a componente axial são encontrados na metade da altura do enrolamento ( $B_r = 0,067 T$ ).

Figura 31 – Indução magnética nas componentes radial e axial sobre para a condição nominal.



(a) Componente radial da indução sobre uma linha no enrolamento externo do transformador.

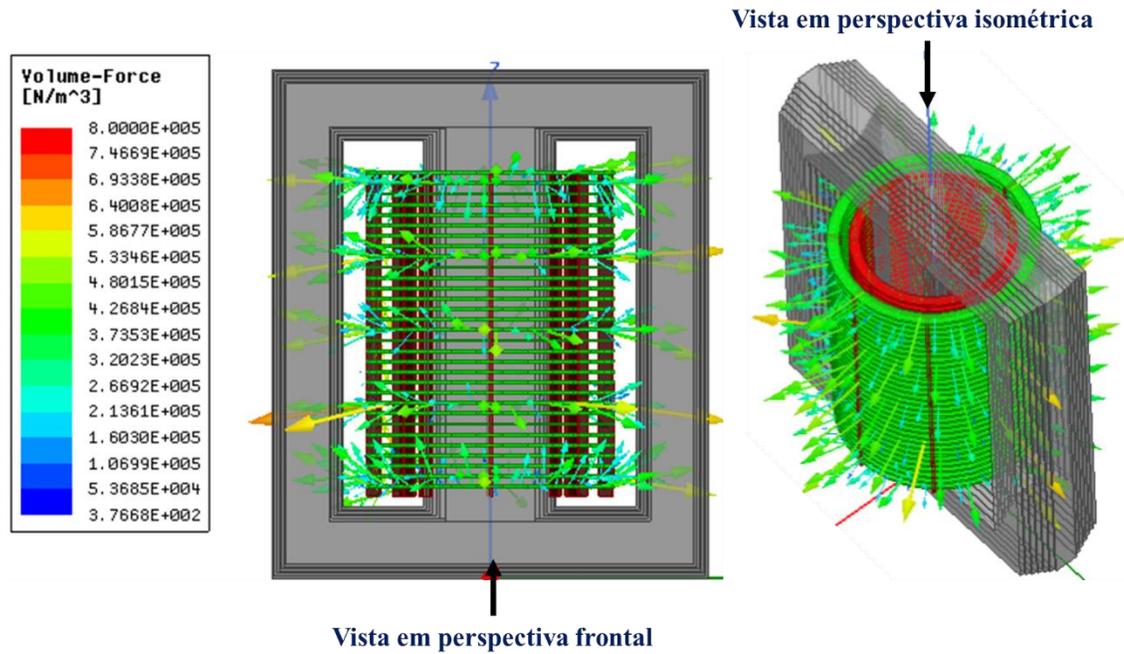


(b) Componente axial da indução sobre uma linha no enrolamento externo do transformador.

Fonte: O Autor.

Por conseguinte, a força volumétrica resultante (tendo como unidade  $\text{N/m}^3$ ) para o enrolamento externo (AT) em condição nominal de operação é demonstrada na Figura (32). Desta forma, destaca-se que a força resultante apresenta um comportamento de compressão nas extremidades do enrolamento e no centro atua de forma a expandir, com vetores que apontam para fora do enrolamento.

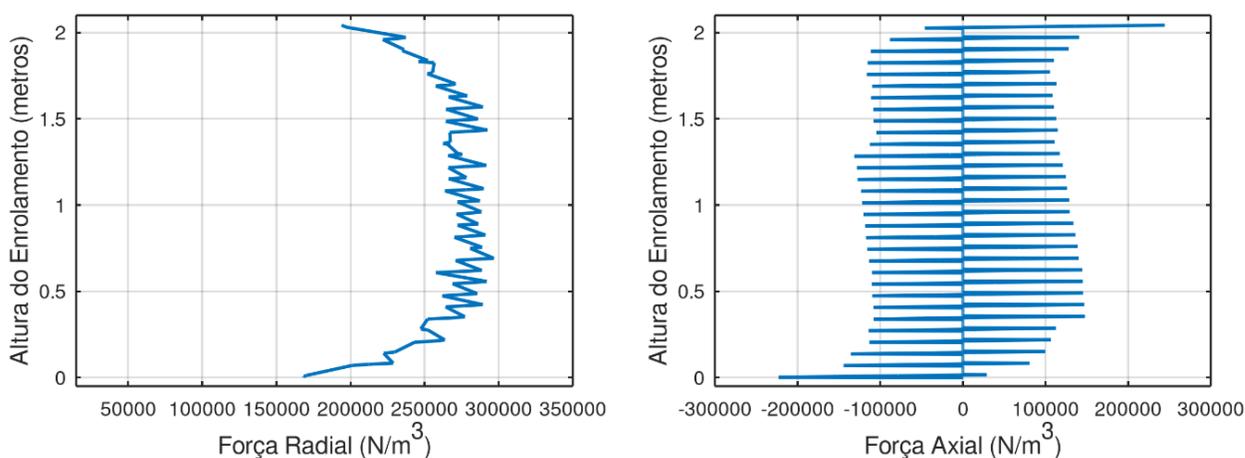
Figura 32 – Vetores das forças magnéticas no enrolamento do transformador em condição nominal.



Fonte: O Autor.

A força volumétrica resultante apresentada na Figura (32) pode ser decomposta em suas componentes. Logo, na Figura (33-a) e (33-b) apresenta-se as forças volumétricas nas componentes radiais e axiais, respectivamente. Logo, a força radial alcança valores máximos no centro do enrolamento ( $Fr = 2,96 \cdot 10^5 \text{ N/m}^3$ ) e a força axial alcança valores máximos nas extremidades (verificar o valor  $Fa = 2,44 \cdot 10^5 \text{ N/m}^3$ ).

Figura 33 – Força magnética em componente radial e axial no enrolamento do transformador para a condição nominal.



(a) Componente radial da força sobre uma linha no enrolamento externo do transformador.

(b) Componente axial sobre uma linha no enrolamento externo do transformador.

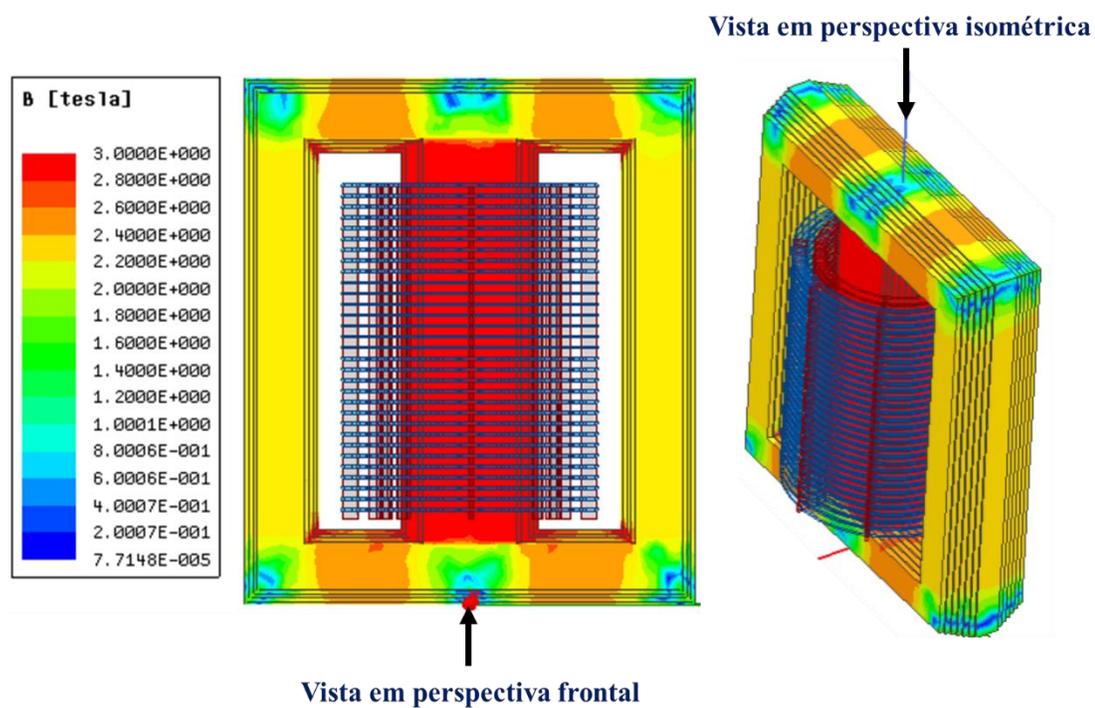
Fonte: O Autor.

Torna-se importante ressaltar, para obter os resultados próximos ao real, os enrolamentos do transformador de potência foram modelados em discos para a análise computacional (seguindo fielmente o projeto construtivo do transformador). Portanto, alguns resultados são apresentados de uma forma diferente do convencional, o que geralmente é encontrado nas literaturas. Ainda, pode-se observar que a intensidade da força radial é superior quando comparada com a força axial.

## 6.2.2 ENERGIZAÇÃO SOLIDÁRIA

Neste tópico serão apresentados resultados da análise magnética para o transformador durante a energização solidária (*sympathetic inrush*). Para este estudo somente os enrolamentos externos serão analisados. Na Figura (34) ilustra a indução magnética no núcleo do transformador durante a energização solidária do equipamento, sendo possível observar que determinadas partes do núcleo do transformador apresenta saturação.

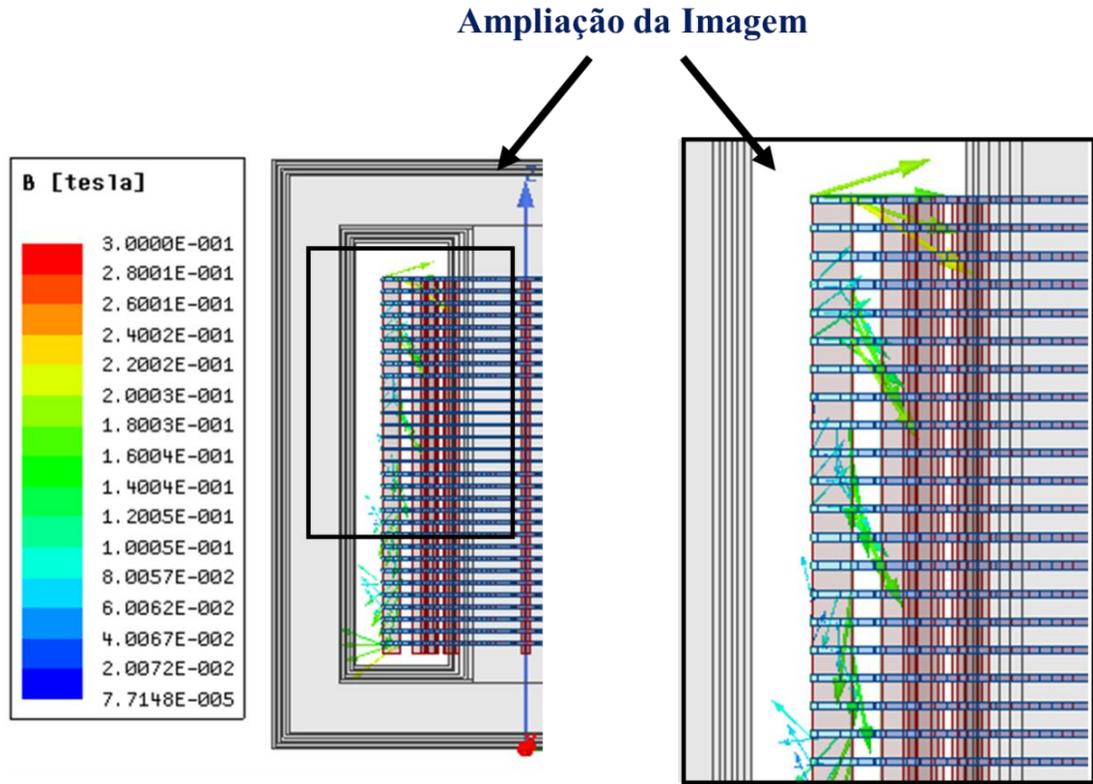
Figura 34 – Indução magnética no núcleo do transformador durante a energização solidária.



Fonte: O Autor.

A Figura (35) ilustra os vetores de indução magnética para o enrolamento externo (AT) durante a energização solidária.

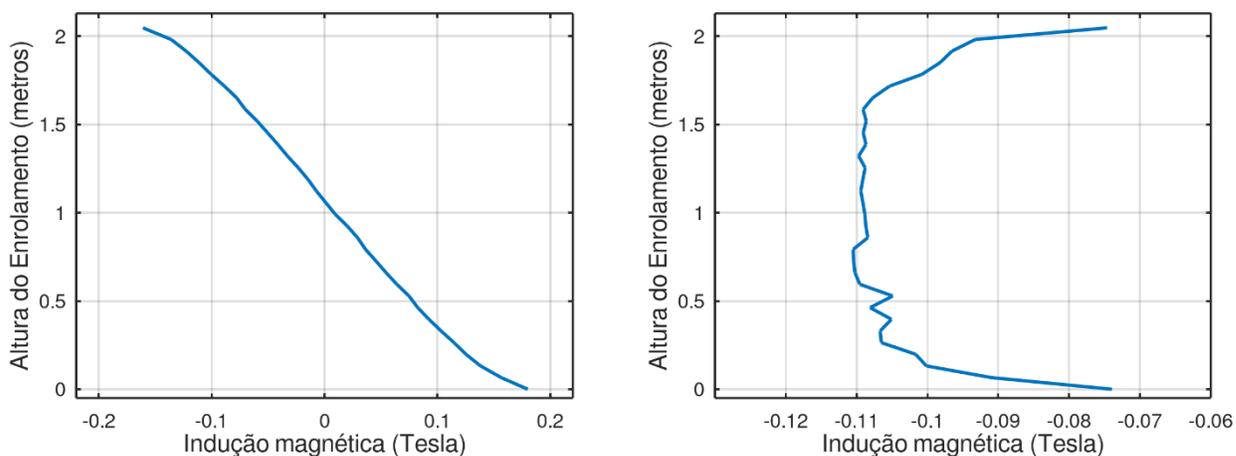
Figura 35 – Vetor de indução magnética no enrolamento externo (AT) do transformador durante a energização solidária.



Fonte: O Autor.

O vetor de indução magnética pode ser representado em suas componentes, radial e axial. Nas Figuras (36-a) e (36-b), são apresentadas a indução magnética radial e indução magnética axial, obtidas por meio de uma linha localizada no enrolamento do transformador. Assim, destaca-se que a componente radial apresenta o valor máximo nas extremidades do enrolamento, tanto na parte superior quanto na parte inferior ( $B_r = 0,18 T$ ). O valor máximo para a componente axial é encontrado na parte central da altura do enrolamento ( $B_a = 0,11 T$ ).

Figura 36 – Indução magnética nas componentes radial e axial no enrolamento do transformador durante a energização solidária.



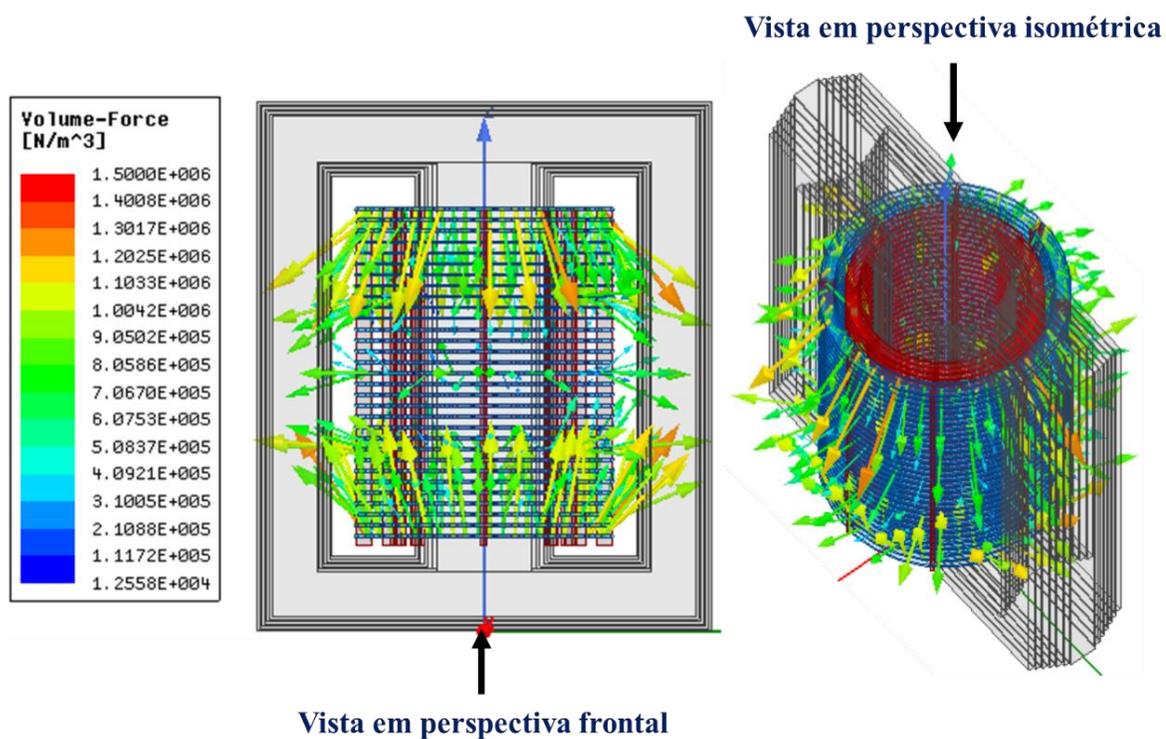
(a) Componente radial da indução sobre uma linha no enrolamento externo do transformador.

(b) Componente axial da indução sobre uma linha no enrolamento externo do transformador.

Fonte: O Autor.

Na Figura (37) é apresentada a força volumétrica resultante para o enrolamento externo quando o equipamento sofre a energização solidária. A força resultante apresenta um comportamento de compressão nas extremidades do enrolamento (parte superior e inferior) e de expansão no centro do enrolamento (forças que atuam para fora do enrolamento).

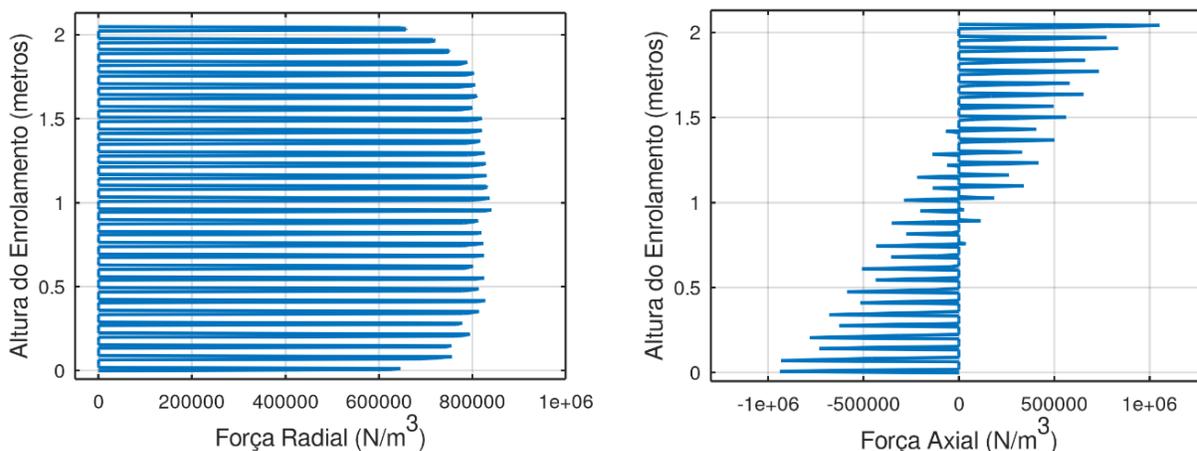
Figura 37 – Vetores das forças magnéticas no enrolamento do transformador durante a energização solidária.



Fonte: O Autor.

Nas Figuras (38-a) e (38-b) são apresentadas as componentes axiais e radiais para as forças magnéticas resultantes no enrolamento do transformador externo (AT) durante a energização solidária. Essas forças são demonstradas sobre uma linha que foi traçada no enrolamento externo.

Figura 38 – Força magnética em componente radial e axial no enrolamento do transformador durante a energização solidária.



(a) Componente radial da força sobre uma linha no enrolamento externo do transformador.

(b) Componente axial da força sobre uma linha no enrolamento externo do transformador.

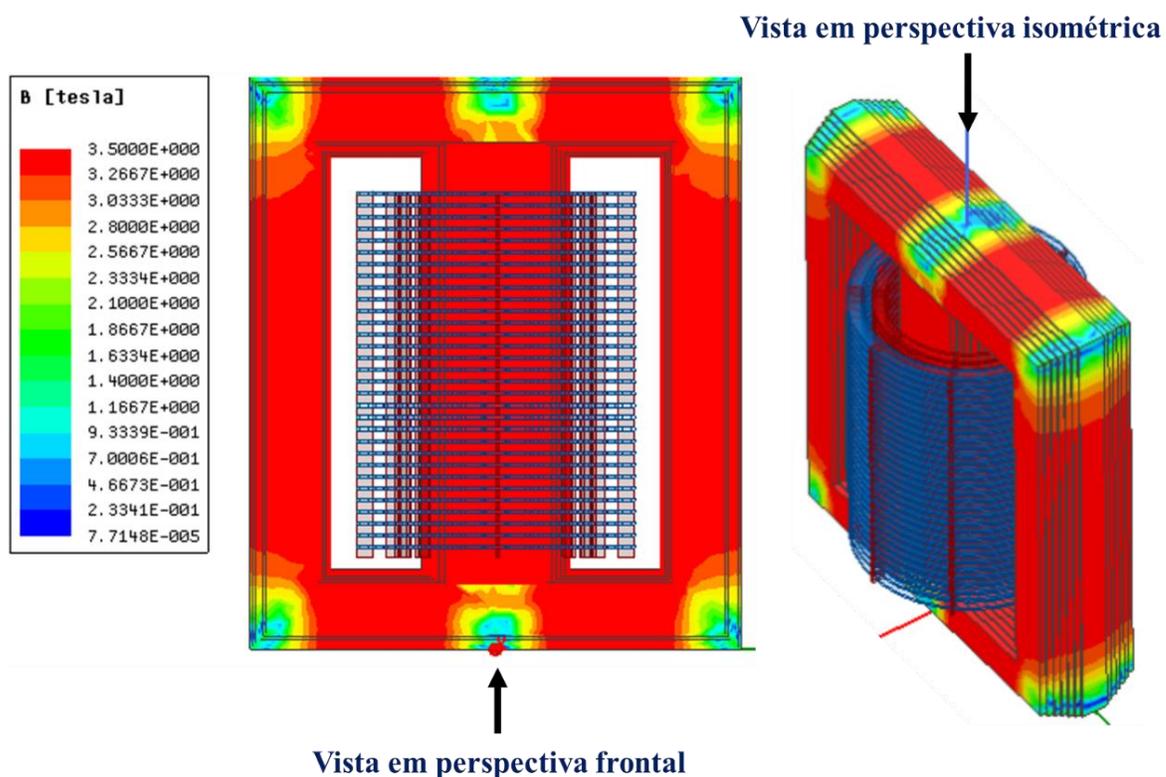
Fonte: O Autor.

Com isso, pode ser observado que a força radial alcança valores máximos no centro do enrolamento ( $Fr = 0,84 \cdot 10^6 \text{ N/m}^3$ ) e a força axial alcança valores máximos nas extremidades ( $Fa = 1,04 \cdot 10^6 \text{ N/m}^3$ ). De acordo com Najafi e Iskender (2016), a intensidade da força magnética é proporcional ao quadrado da corrente que circula no enrolamento do transformador. Com isso, as forças magnéticas apresentam maiores intensidades durante a energização dos transformadores quando comparado a condição nominal.

### 6.2.3 CORRENTE DE INRUSH

Neste tópico serão apresentados resultados da análise magnética para a condição de *inrush*. Ressalta-se que as análises e investigações são realizadas somente nos enrolamentos externos dos transformadores, tendo em vista que as forças produzidas durante a energização de transformadores utilizam apenas as componentes de campo produzidas pelas correntes nos condutores do enrolamento primário (enrolamento de alta tensão – AT) (ADDLY, 2001). Com isso, a Figura (39) ilustra o comportamento da indução magnética no núcleo do transformador durante a sua energização (corrente de *inrush*). Logo, pode ser observado que a intensidade da indução magnética é superior quando comparado as condições anteriores (condição nominal e energização solidária).

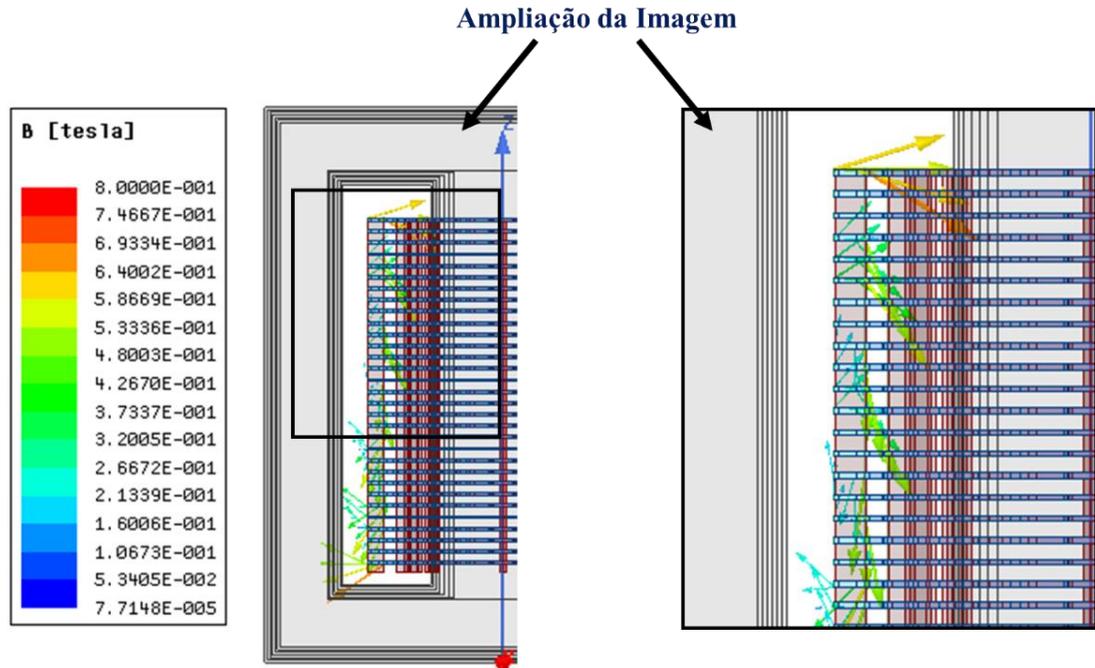
Figura 39 – Indução magnética no núcleo do transformador durante a corrente de *inrush*.



Fonte: O Autor.

A Figura (40) ilustra os vetores de indução magnética no enrolamento externo (AT) do transformador durante a energização (presença da corrente de *inrush*).

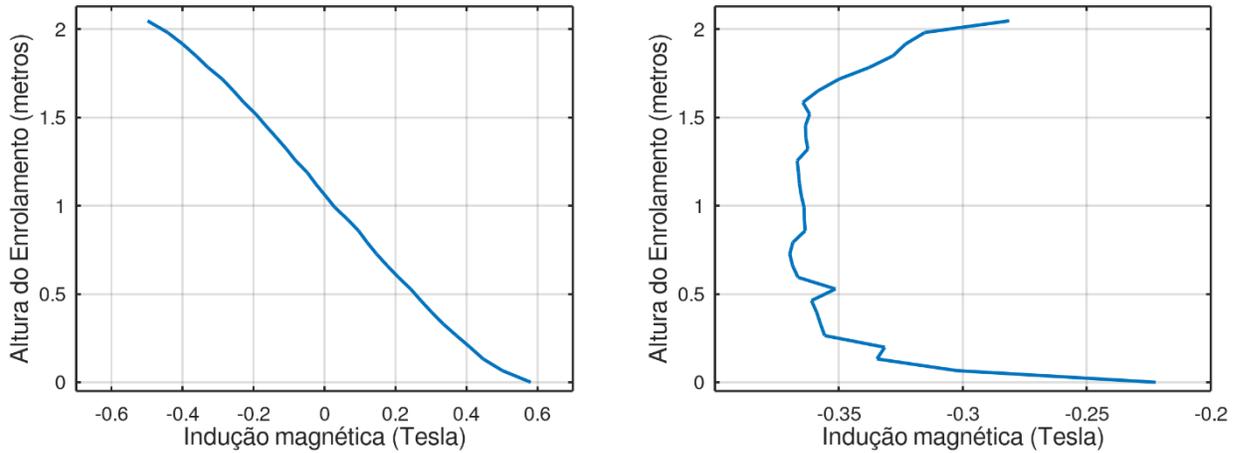
Figura 40 – Vetor de indução magnética no enrolamento externo (AT) do transformador durante a corrente de *inrush*.



Fonte: O Autor.

O vetor de indução magnética é representado em suas componentes axial e radial, respectivamente nas Figuras (41-a) e (41-b). O valor máximo para a componente radial é encontrado na parte central da altura do enrolamento (alcançando valor máximo de  $B_r = 0,58 T$ ). No entanto, a componente axial apresenta valor máximo nas extremidades superior e inferior do enrolamento (alcançando valores de  $B_a = 0,36 T$ ).

Figura 41 – Indução magnética nas componentes radial e axial no enrolamento do transformador durante a corrente de *inrush*.



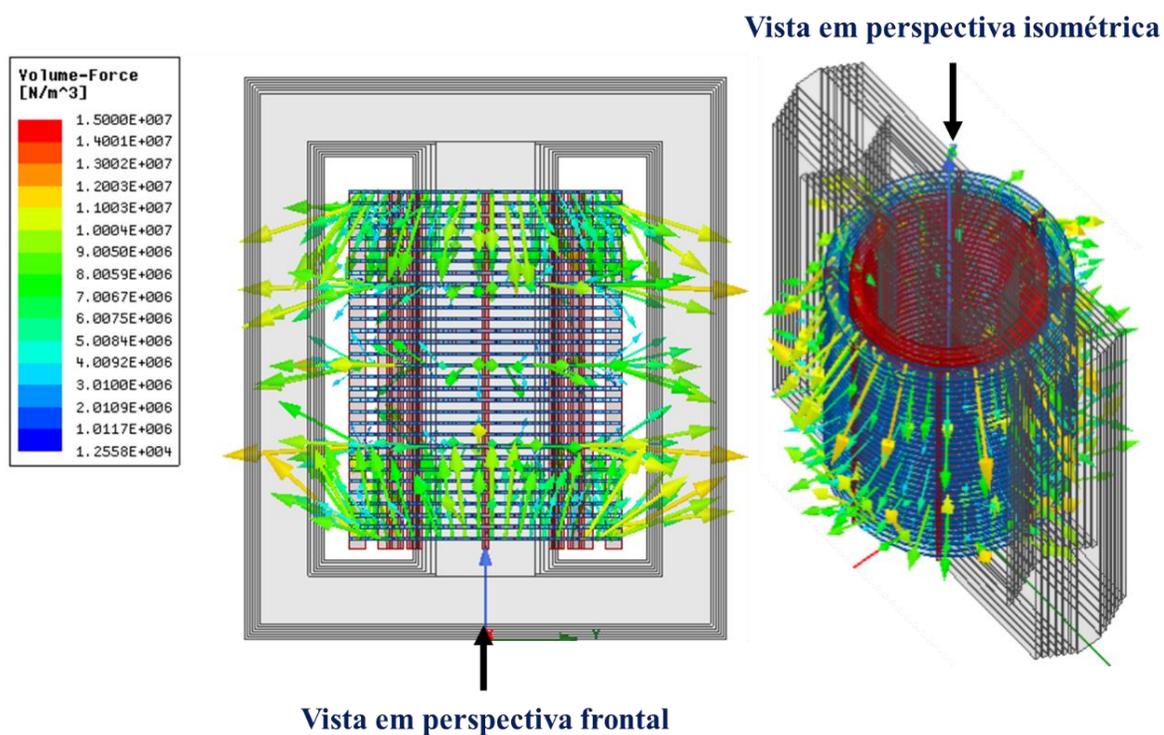
(a) Componente radial da indução sobre uma linha no enrolamento externo do transformador

(b) Componente axial da indução sobre uma linha no enrolamento externo do transformador

Fonte: O Autor.

A Figura (42) ilustra os vetores da força volumétrica resultante para o enrolamento externo do transformador que opera com a corrente de *inrush*. Assim, destaca-se que a força resultante apresenta um comportamento de compressão nas extremidades do enrolamento (parte superior e inferior). Ainda, apresenta forças no centro do enrolamento que tendem a expandir (forças que apontam para fora do enrolamento).

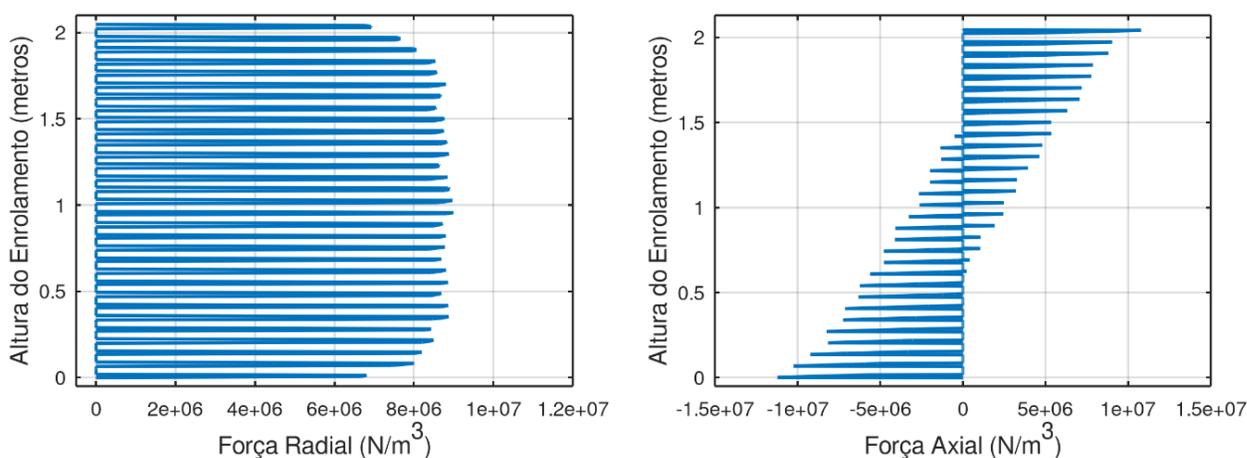
Destaca-se que devido a estrutura do enrolamento do transformador ser representada em discos (modelo computacional muito próximo ao real), o comportamento do vetor das forças magnéticas pode apresentar variações diferente do que é disponibilizado nas literaturas.

Figura 42 – Vetores das forças magnéticas no enrolamento do transformador durante a corrente de *inrush*.

Fonte: O Autor.

Como a intensidade das forças magnéticas nos enrolamentos de transformadores são proporcionais à intensidade da corrente elétrica, durante a energização, há um aumento considerável dessas forças. Logo, nas Figuras (43-a) e (43-b) são apresentadas as componentes axiais e radiais para a força resultante no enrolamento do transformador para durante a corrente de *inrush*.

Figura 43 – Forças magnéticas em componente radial e axial no enrolamento do transformador durante a corrente de *inrush*.



(a) Componente radial da força sobre uma linha no enrolamento externo do transformador.

(b) Componente axial da força sobre uma linha no enrolamento externo do transformador.

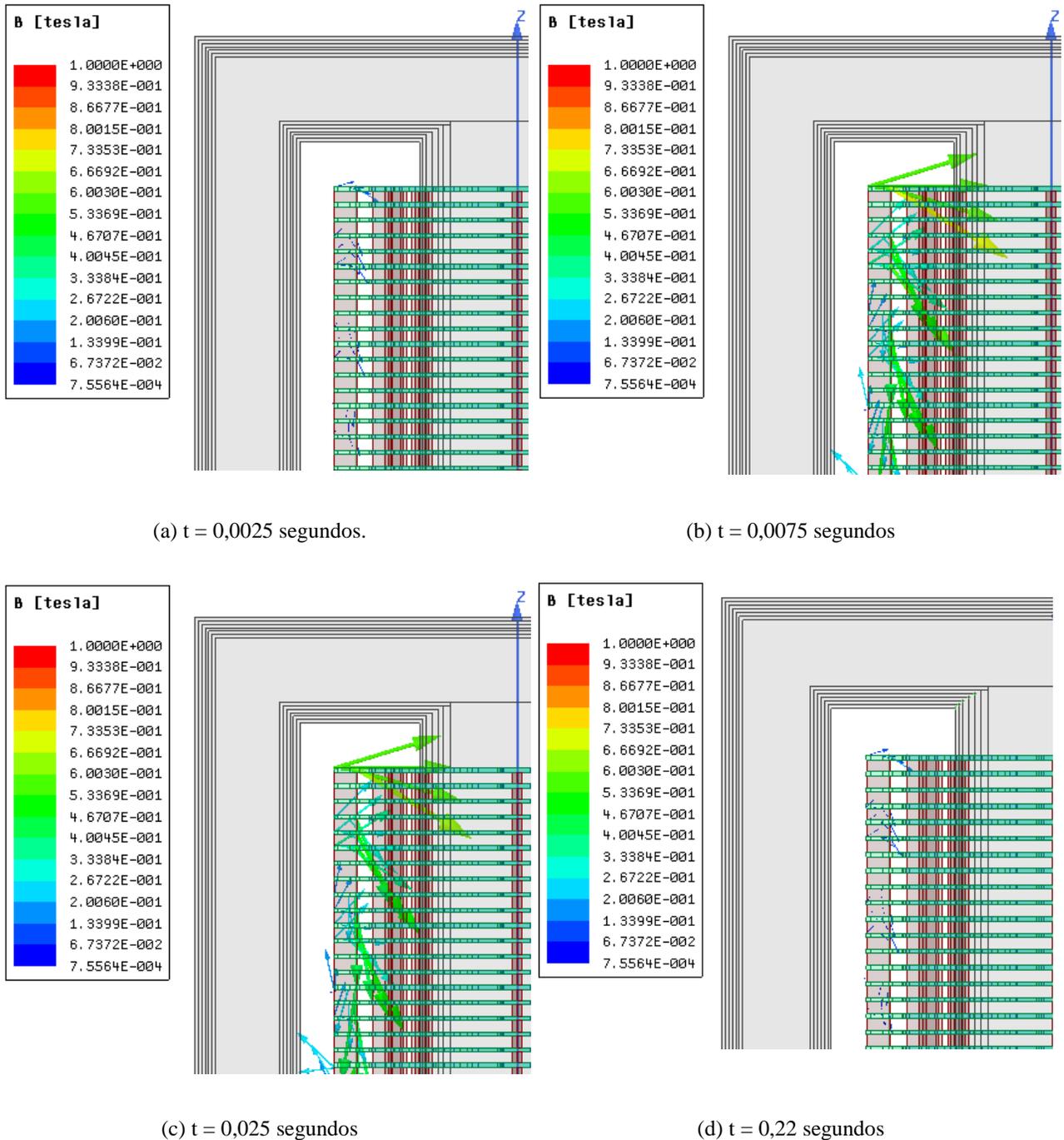
Fonte: O Autor.

A força radial alcança valores máximos no centro do enrolamento ( $Fr = 0,89 \cdot 10^7 \text{ N/m}^3$ ) e a força axial alcança valores máximos nas extremidades ( $Fa = 1,12 \cdot 10^7 \text{ N/m}^3$ ).

#### 6.2.4 ANÁLISE MAGNÉTODINÂMICA

Com os resultados apresentados anteriormente nas simulações na condição estática, foram apresentados resultados para as três condições de operação: condição nominal, energização solidária e corrente de *inrush*, pode-se observar que o efeito de maior severidade da força magnética ocorre para a última condição. Com isso, a simulação magnética no domínio do tempo foi realizada somente para a corrente de *inrush*. Logo, a curva da corrente de *inrush* conforme apresentada na Figura (25) foi inserida na análise magnética (ANSYS MAXWELL), com intuito de avaliar o comportamento da indução magnética e das forças magnéticas em função do tempo. O tempo de simulação da energização é de 0,625 segundos. A Figura (44) ilustra a indução magnética no núcleo do transformador com a presença da corrente de *inrush* em diferentes instantes de tempo. Com isso, pode ser observado o comportamento da indução magnética durante a energização do equipamento.

Figura 44 – Indução magnética no núcleo do transformador durante a corrente de *inrush* em diferentes instantes de tempo.

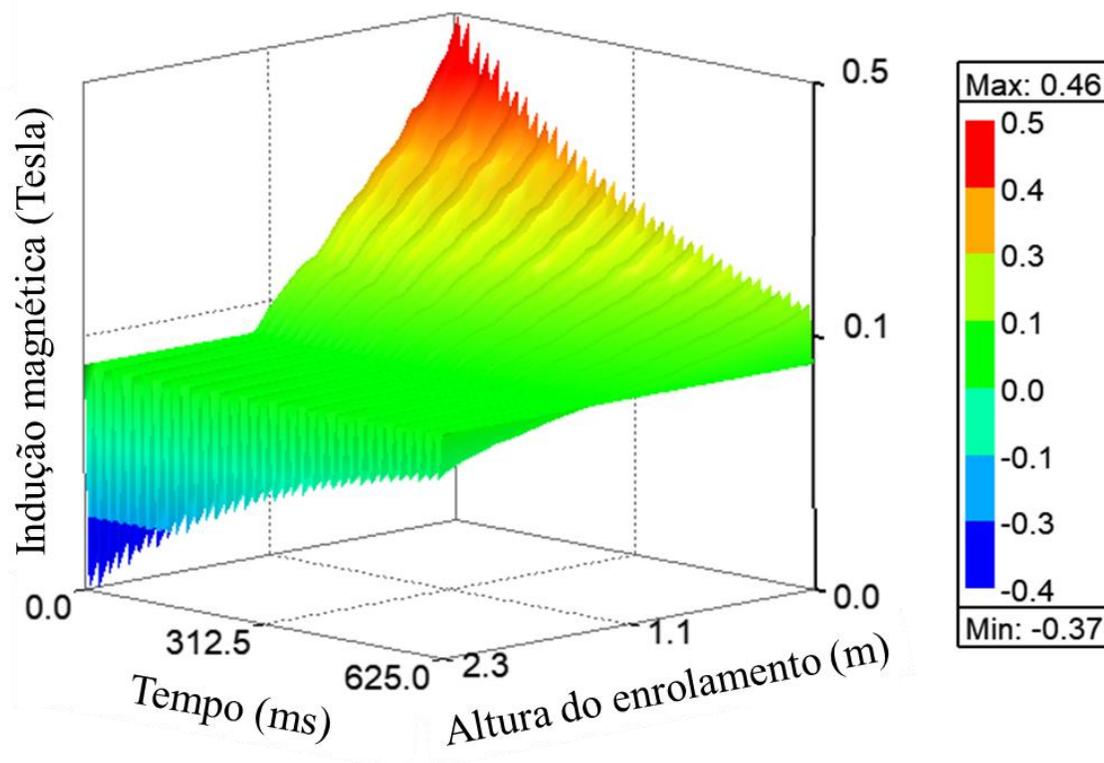


Fonte: O Autor.

A partir dos resultados, pode-se observar que a indução magnética no enrolamento do transformador sofre alterações em sua intensidade de acordo com o comportamento da corrente de energização. Na Figura (45) é ilustrado o comportamento da indução magnética (componente

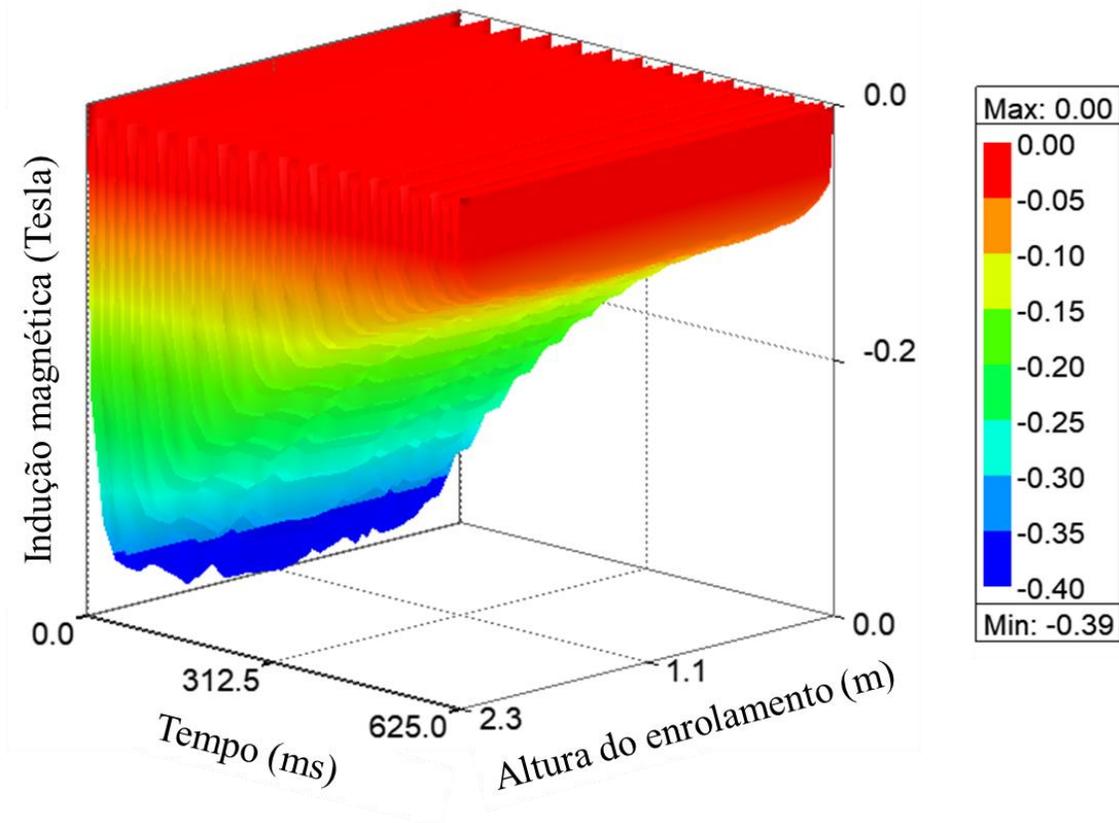
radial) no enrolamento externo do transformador durante a energização (corrente de *inrush*). Pode-se observar que a componente de indução radial apresenta maior intensidade nas extremidades do enrolamento (parte superior e inferior). Ainda, observa-se que a intensidade da indução magnética diminui com o tempo, ou seja, com a diminuição da amplitude alcançada com a corrente de *inrush*.

Figura 45 – Indução magnética radial no enrolamento externo para a corrente de *inrush*.



Fonte: O Autor.

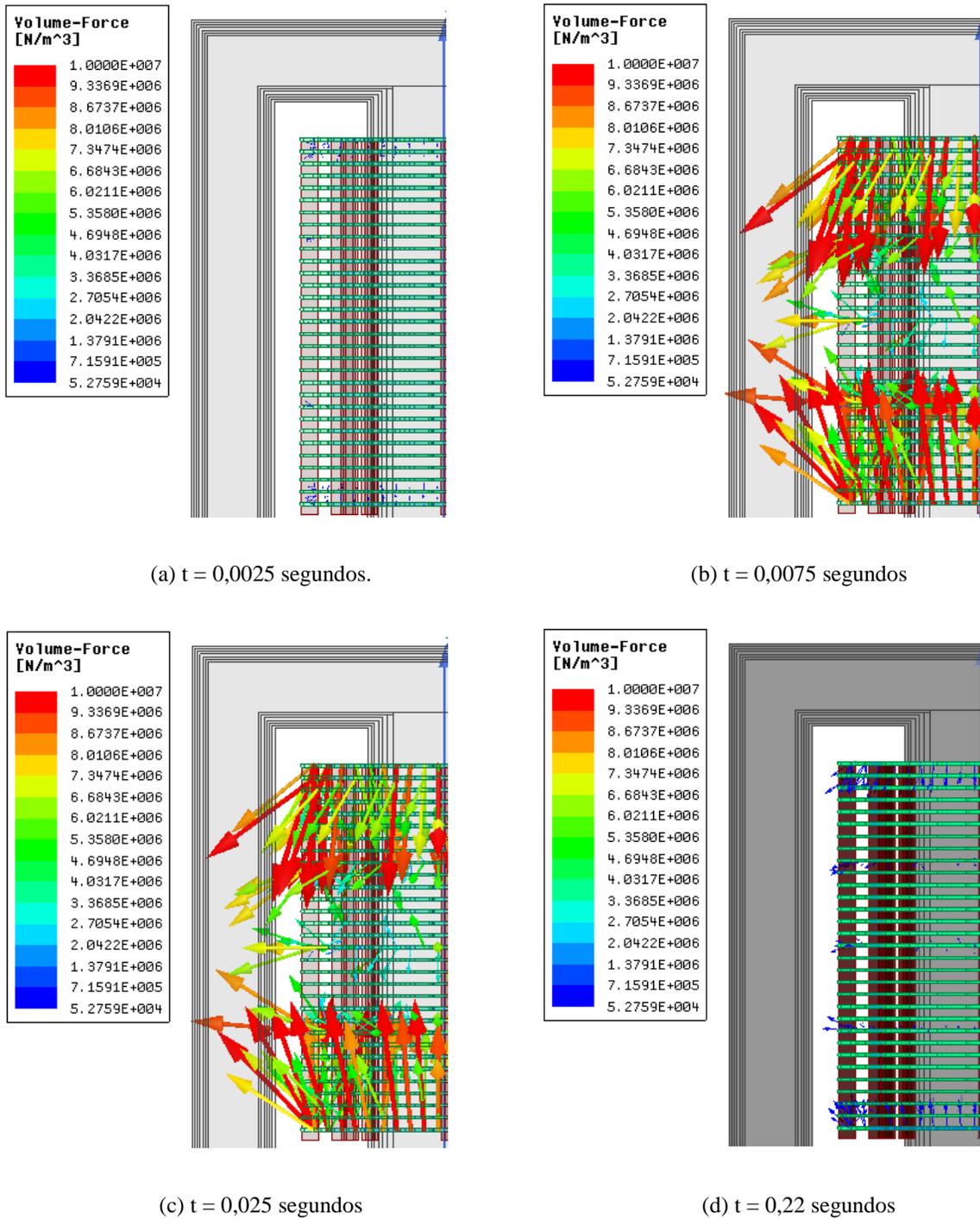
Na Figura (46) é apresentado o comportamento da indução magnética na componente axial durante a energização do transformador. Logo, pode ser observado que a componente axial de indução magnética apresenta maiores intensidades na parte central do enrolamento analisado e nos primeiros picos da energização (nos instantes iniciais).

Figura 46 – Indução magnética axial no enrolamento externo para a corrente de *inrush*.

Fonte: O Autor.

Ressalta-se que o sentido negativo da indução magnética é justificado pela escolha do sentido da excitação no enrolamento durante a simulação magnética. Logo, na etapa de excitação que é realizada em uma face do condutor (secção transversal), pode ser selecionado um dos dois sentidos. A Figura (47) ilustra os vetores de intensidade da força volumétrica resultante para o enrolamento externo do transformador durante a sua energização (corrente de *inrush*). Essa força resultante apresenta um comportamento de compressão nas extremidades do enrolamento (parte superior e inferior) e de expansão na parte central do enrolamento.

Figura 47 – Vetores das forças magnéticas no enrolamento do transformador durante a corrente de *inrush* em diferentes instantes de tempo.

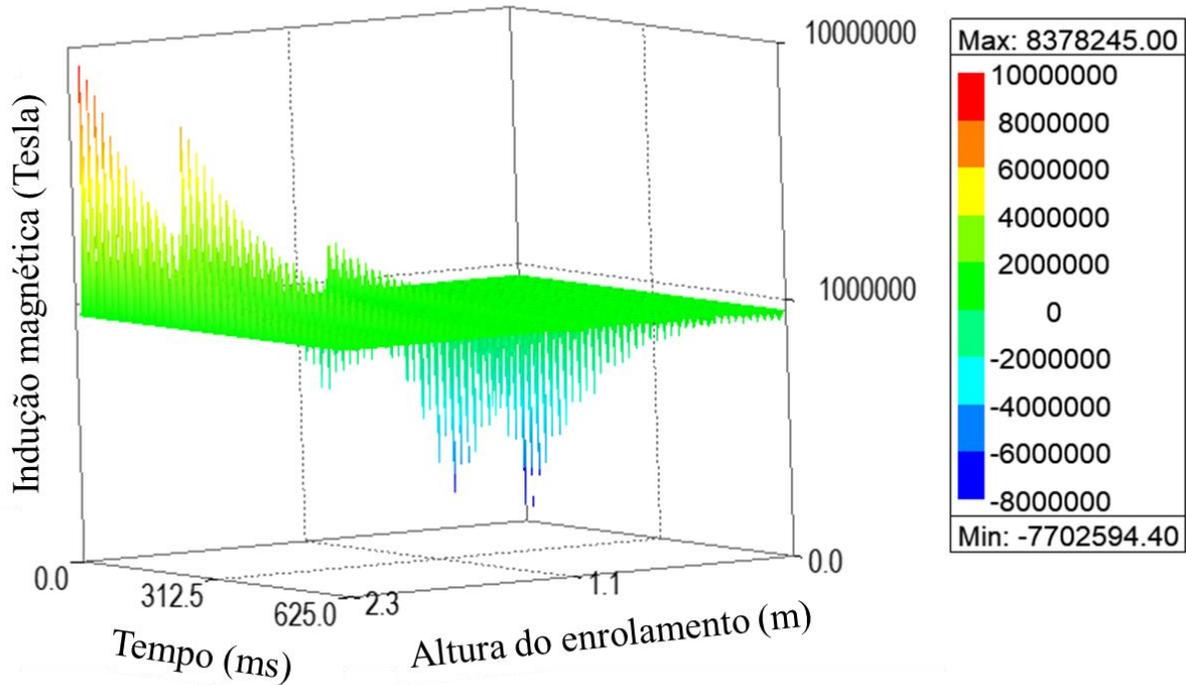


Fonte: O Autor.

O modelo utilizado na representação computacional é próximo ao real, os enrolamentos é representado em forma de discos, o que aumenta expressivamente o custo computacional

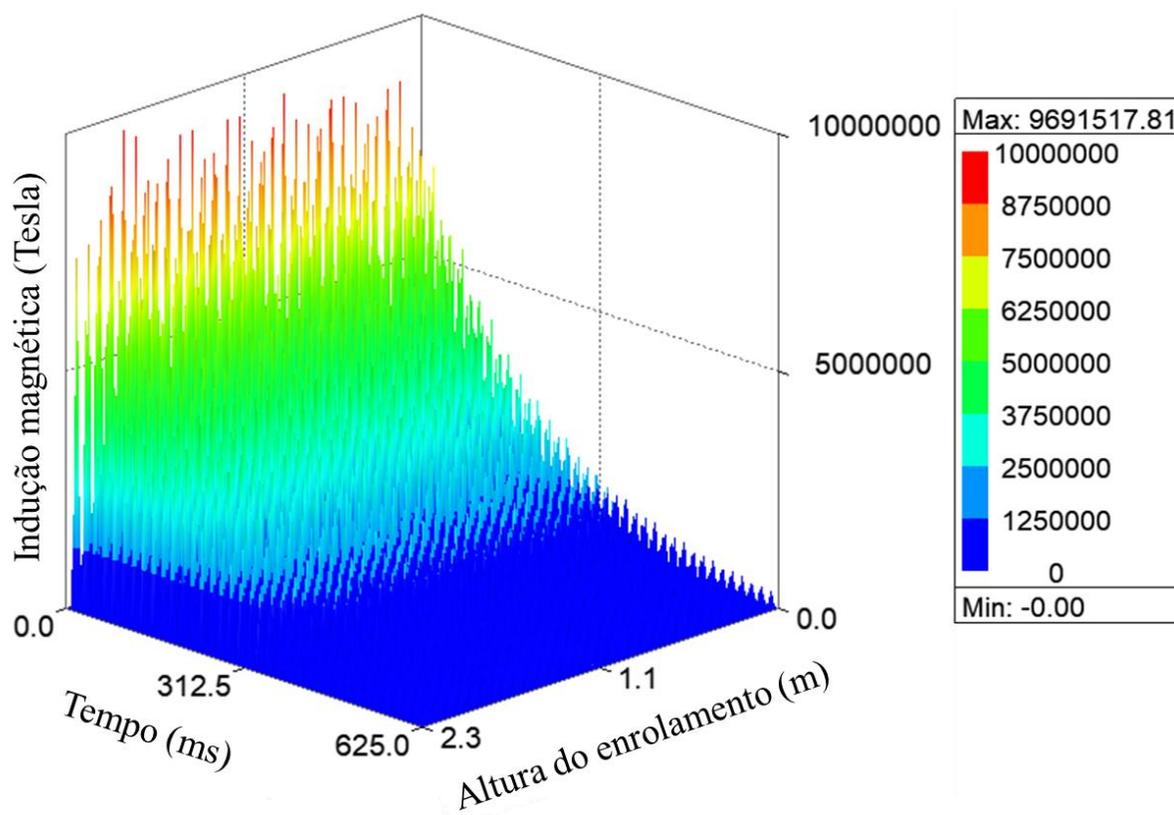
necessário para o desenvolvimento das análises. Com isso, os resultados apresentam comportamentos diferentes do que são disponibilizadas em algumas literaturas. A Figura (48) ilustra o comportamento da força axial sobre uma linha no enrolamento externo do transformador, sendo possível observar que as maiores intensidades ocorrem nos instantes de tempo inicial.

Figura 48 – Força radial no enrolamento externo para a corrente de *inrush*.



Fonte: O Autor.

Ressalta-se que devido utilizar uma geometria próxima a real, representando o enrolamento em discos, o resultado da força axial apresenta comportamento um pouco diferente. Na Figura (49) é ilustrado o comportamento da força radial no enrolamento externo do transformador durante a energização.

Figura 49 – Força radial no enrolamento externo para a corrente de *inrush*.

Fonte: O Autor.

Portanto, conforme pode ser observada na Figura (49), a força volumétrica na componente radial apresenta maiores intensidades nos instantes iniciais durante a energização do transformador. Ainda, é demonstrado que no segundo pico da corrente de *inrush*, a força na componente radial apresenta maior intensidade.

### 6.2.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS MAGNÉTICOS

A partir dos resultados apresentados na solução do problema magnético para as diferentes condições de operação, tanto na condição estática (condição nominal, energização solidária e corrente de *inrush*) quanto para a análise no domínio do tempo (somente para a corrente de *inrush*). Na Tabela (7) é demonstrada a síntese dos resultados para os valores máximos obtidos nessas diferentes condições de operação, sendo apresentadas informações da indução magnética em componentes axial e radial e a força magnética também em componente axial e radial, ambas no enrolamento externo ao longo de uma linha disposta axialmente.

Tabela 7 – Síntese dos resultados da análise magnética para as diferentes condições de operação do equipamento.

Descrição	Unidade de Medida	Condição Nominal	Energização Solidária	Corrente de <i>Inrush</i>
Força Volumétrica Axial	N/m <sup>3</sup>	$2,44 \cdot 10^5$	$1,04 \cdot 10^6$	$1,12 \cdot 10^7$
Força Volumétrica Radial	N/m <sup>3</sup>	$2,96 \cdot 10^5$	$0,84 \cdot 10^6$	$0,89 \cdot 10^7$
Indução magnética (Axial)	T	0,062	0,11	0,36
Indução magnética (Radial)	T	0,067	0,18	0,58

Fonte: O Autor.

Na Tabela (7) pode-se observar para a condição nominal a componente radial da força magnética apresenta maior intensidade. No entanto, em condição de energização (*inrush* ou energização solidária) a componente axial da força magnética apresenta maior intensidade. Ao comparar o comportamento dos esforços no enrolamento de um transformador para as condições de energização com a de curto-circuito, pode-se constatar que as mesmas apresentam comportamento semelhante, no entanto com intensidades diferentes. Pois, conforme apresentado anteriormente, as amplitudes das forças magnéticas são proporcionais a corrente no enrolamento. Ainda, torna-se importante ressaltar que essas forças ocorrem de forma simultânea, podendo proporcionar possíveis falhas com a atuação combinada das forças. No tópico a seguir será apresentada a análise do problema mecânico para condição estática e no domínio do tempo.

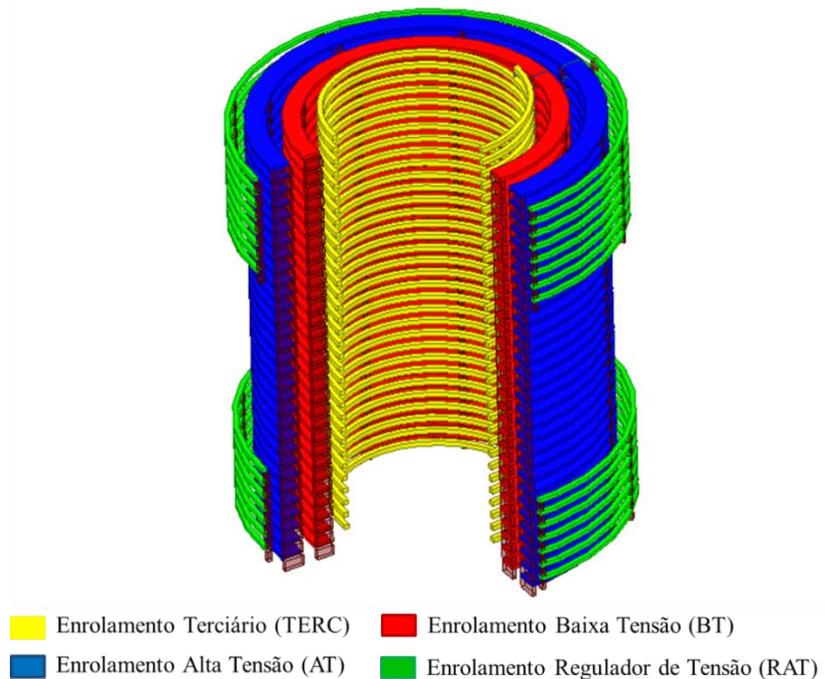
### 6.3 SOLUÇÃO DO PROBLEMA MECÂNICO

Tendo concluída a análise do problema magnético em 3D, iniciaram-se as análises do problema mecânico também em 3D. Para isso, utilizou-se dos dados obtidos na saída do problema magnético (forças axiais e radiais) como dados de entrada para o problema mecânica (carregamento nos enrolamentos devido às forças mecânicas). O principal objetivo desta metodologia é realizar análises do comportamento mecânico nos enrolamentos de transformador quando submetidos às correntes de energização.

Nesta perspectiva, a Figura (50) demonstra o modelo utilizado para a realização das análises mecânicas, sendo representado pelos enrolamentos de alta tensão (AT), baixa tensão (BT),

enrolamento terciário (TERC) e o regulador de tensão (RAT), além dos espaçadores que estão distribuídos ao longo do eixo axial dos enrolamentos.

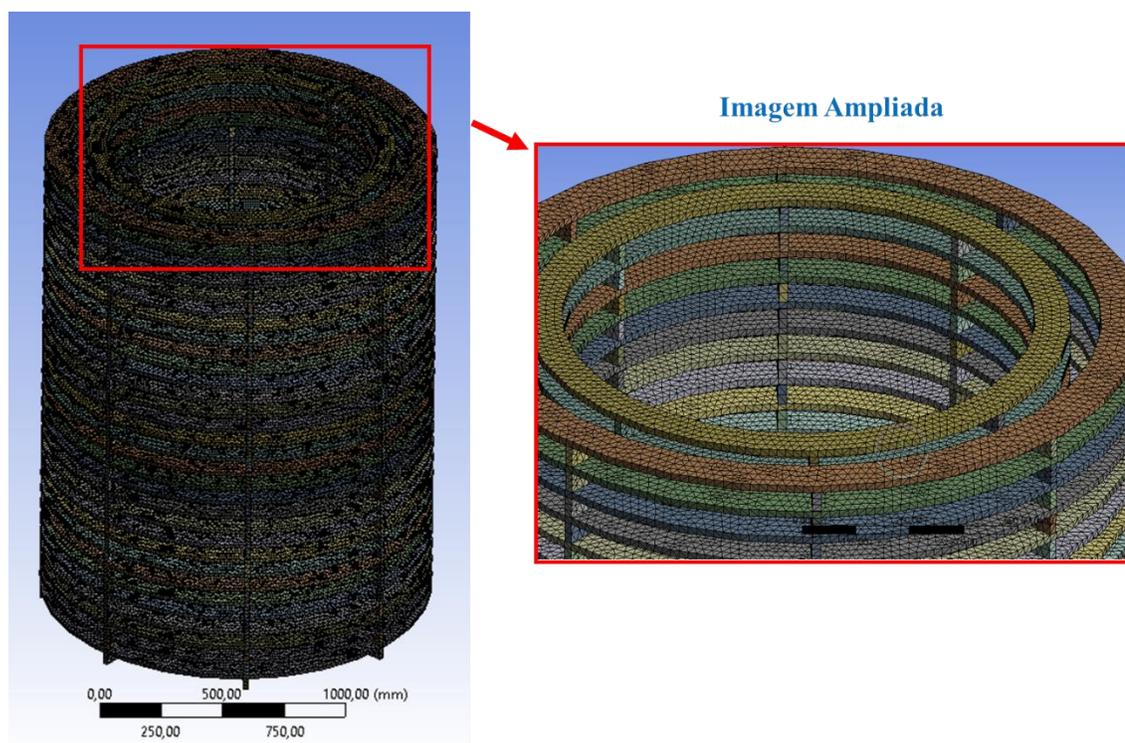
Figura 50 – Modelo em 3D com os enrolamentos do transformador e os espaçadores.



Fonte: O Autor.

Torna-se importante ressaltar que durante a energização de transformadores somente o enrolamento de alta tensão (AT) é submetido aos principais efeitos dessas correntes. No entanto, para a condição nominal, esse comportamento dinâmico das forças pode ser analisado em ambos os enrolamentos. O modelo computacional utilizado na análise mecânica em 3D realizada no *software* ANSYS STRUCTURAL apresenta um total de 550.521 elementos e 1.082.328 nós. Logo, o modelo é representado pelos espaçadores e os discos dos enrolamentos do transformador, que são os objetos de estudo deste trabalho, conforme a Figura (51).

Figura 51 – Modelo em 3D utilizado na análise mecânica.



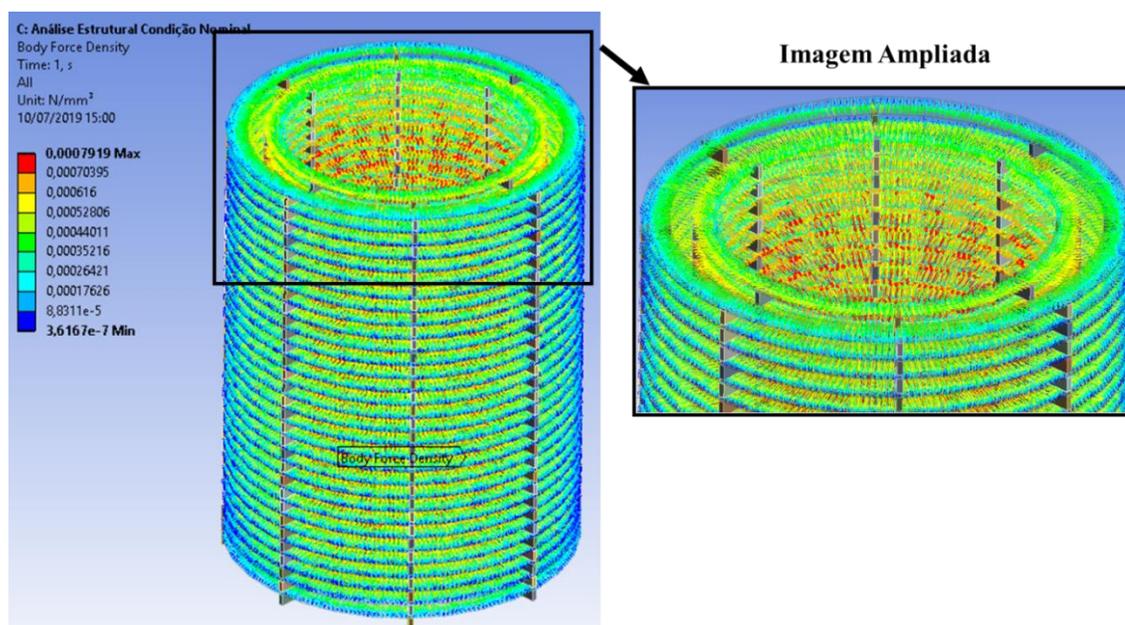
Fonte: O Autor.

Para esta análise, além das características do material utilizadas para representar enrolamento do transformador, utilizou-se como condição de contorno a força atribuída em cada elemento (importada na análise magnética) e a fixação dos espaçadores, onde não será permitido a sua movimentação e por isso, não serão utilizados para análise de deformação.

### 6.3.1 CONDIÇÃO NOMINAL

Para o desenvolvimento da análise mecânica na condição nominal, as forças magnéticas são importadas para os elementos do enrolamento do transformador a partir da solução magnética, sendo informações transferidas para o ambiente computacional da análise estrutural. Também foi estabelecida a presença do campo gravitacional e das faces de contato. A partir disso, podem-se observar as deformações totais sofridas, a tensão mecânica e o fator de segurança do equipamento com os carregamentos supracitados. Ainda, nos espaçadores são atribuídas informações de suporte fixado, já que os mesmos não sofrem movimento. A Figura (52) é apresentada o modelo em 3D dos enrolamentos com o carregamento de forças.

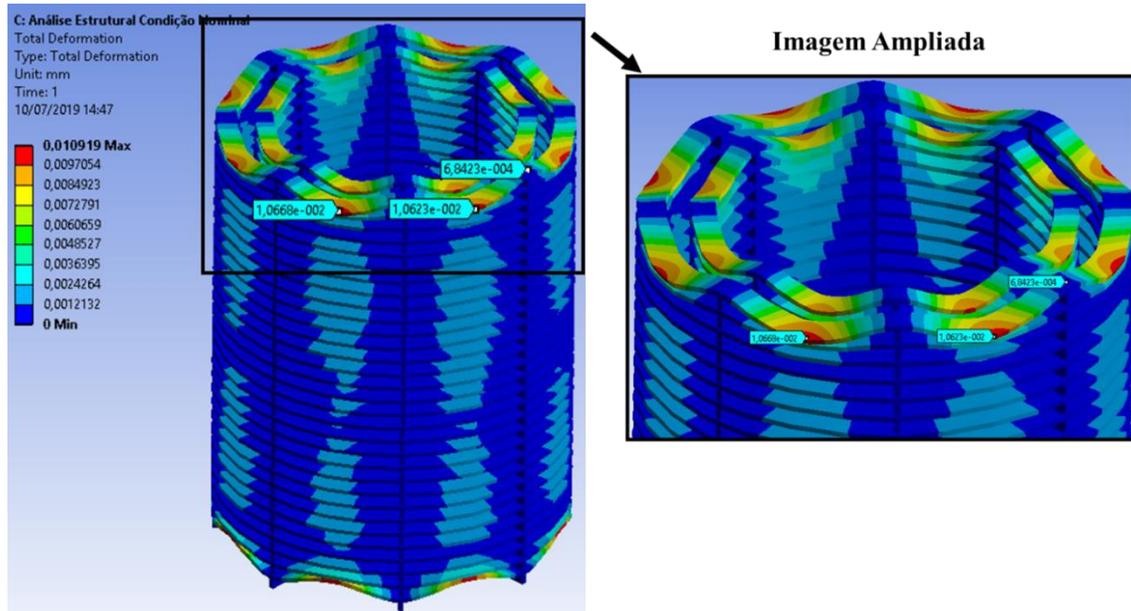
Figura 52 – Importação das forças combinadas para a condição nominal.



Fonte: O Autor.

A deformação é calculada a partir do comportamento sofrido no modelo em função dos três eixos (eixo x, y e z). Logo, na Figura (53) observa-se o perfil da deformação total no enrolamento do transformador, bem como sua amplitude resultante da solicitação proveniente dos esforços combinados.

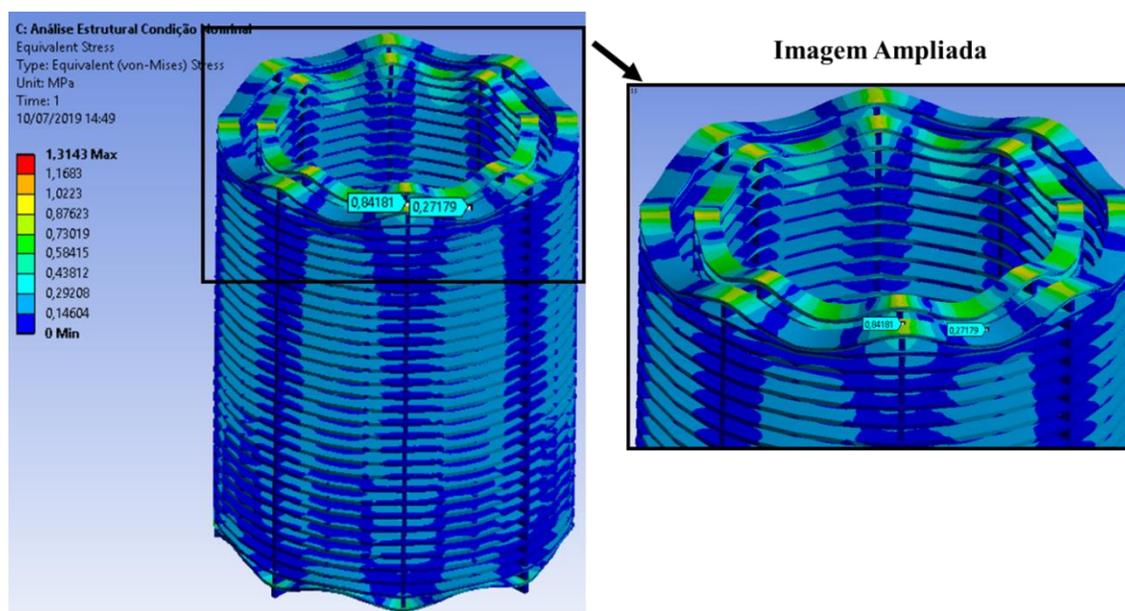
Figura 53 – Deformação total no enrolamento externo (AT) para a condição nominal.



Fonte: O Autor.

Conforme observado na Figura (53), a deformação em módulo é de  $1,06 \cdot 10^{-2}$  mm na direção axial. Ressalta-se ainda que para este tipo de análise, as deformações são simétricas, ou seja, de mesma intensidade com sentidos opostos. Na Figura (54) é demonstrado o máximo tensão mecânica máxima para o enrolamento do transformador (correspondendo a 0,84 MPa) quando submetido à combinação de esforços combinados em condição nominal de operação.

Figura 54 – Tensões mecânicas no enrolamento externo (AT) para a condição nominal.

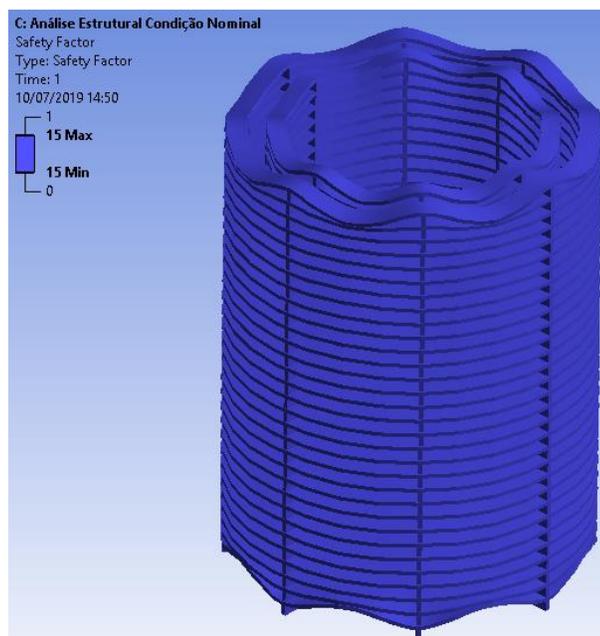


Fonte: O Autor.

Destaca-se que conforme esperado, esse comportamento não oferece risco estrutural ao enrolamento do equipamento. Isso pode ser afirmado, tendo em vista que o valor máximo obtido para a tensão mecânica foi de 0,84 MPa durante a sua operação em condição nominal, sendo este um valor bem inferior ao limite de escoamento do cobre (130 MPa) e do limite máximo da resistência à tração (280 MPa), ambos apresentados na Tabela (8).

Também, é disponibilizado o grau de segurança no enrolamento do equipamento frente à essas solicitações mecânicas. O grau de segurança (fator de segurança) de um equipamento é um valor admissional que representa a relação entre o limite de carregamento realizado (forças magnéticas) com o limite suportado pelo material (limites estabelecidos para o cobre), sendo valores previamente especificados na simulação. Na Figura (55) é apresentado o fator de segurança para o enrolamento externo do transformador operando em condição nominal.

Figura 55 – Fator de segurança no enrolamento externo (AT) para a condição nominal.



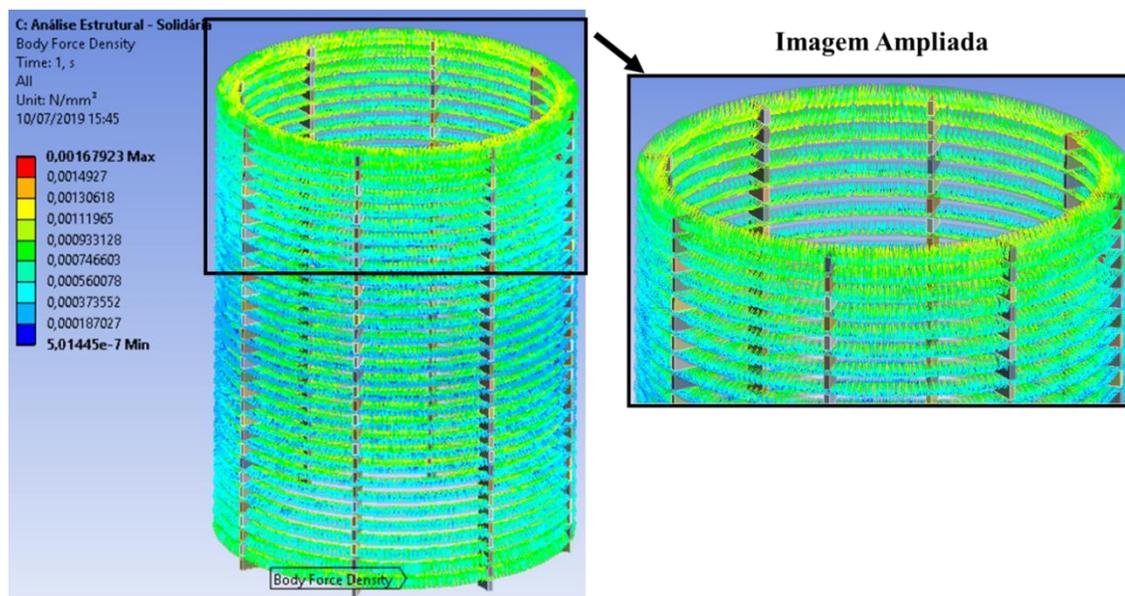
Fonte: O Autor.

Conforme apresentado na Figura (55), pode-se observar que o fator de segurança apresenta-se em índice elevado (valor igual a 15) em todo o enrolamento. Com isso, constata-se que o equipamento está em condição segura frente ao carregamento em condição nominal. Logo, a partir de todos os resultados apresentados na análise mecânica para a condição nominal (deformação total sofrida, tensão mecânica e fator de segurança) o equipamento não apresenta problemas que possa corroborar em possíveis problemas em seu funcionamento.

### 6.3.2 ENERGIZAÇÃO SOLIDÁRIA

Neste tópico serão apresentadas as análises mecânicas para um transformador que opera em paralelo a outro equipamento que inicia a sua energização (energização solidária). Durante a energização solidária, o equipamento apresenta elevações nas amplitudes de corrente, que ao comparar com a corrente de *inrush*, pode-se observar que a mesma ocorre em um tempo maior. Na Figura (56) é apresentado o carregamento das forças mecânicas no enrolamento de alta tensão (AT) para a condição de energização solidária. Destaca-se que essas forças são calculadas em cada elemento que compõe o modelo em estudo. Os espaçados são adicionados como pontos fixos, logo não se movimentam.

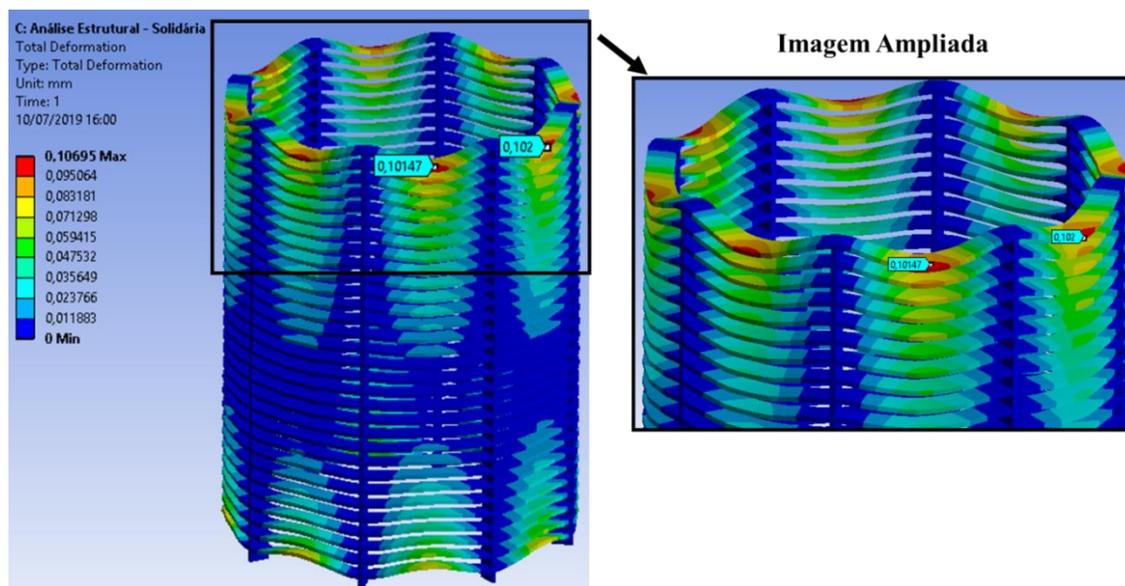
Figura 56 – Importação das forças combinadas para a energização solidária.



Fonte: O Autor.

Na Figura (57) é ilustrada a deformação total no enrolamento externo para a condição de energização solidária. Com isso, devido ao carregamento das forças para cada elemento, observa-se a deformação de 0,102 mm na direção axial. Ressalta-se que as deformações nas extremidades do enrolamento apresentam intensidades semelhantes e sentidos opostos.

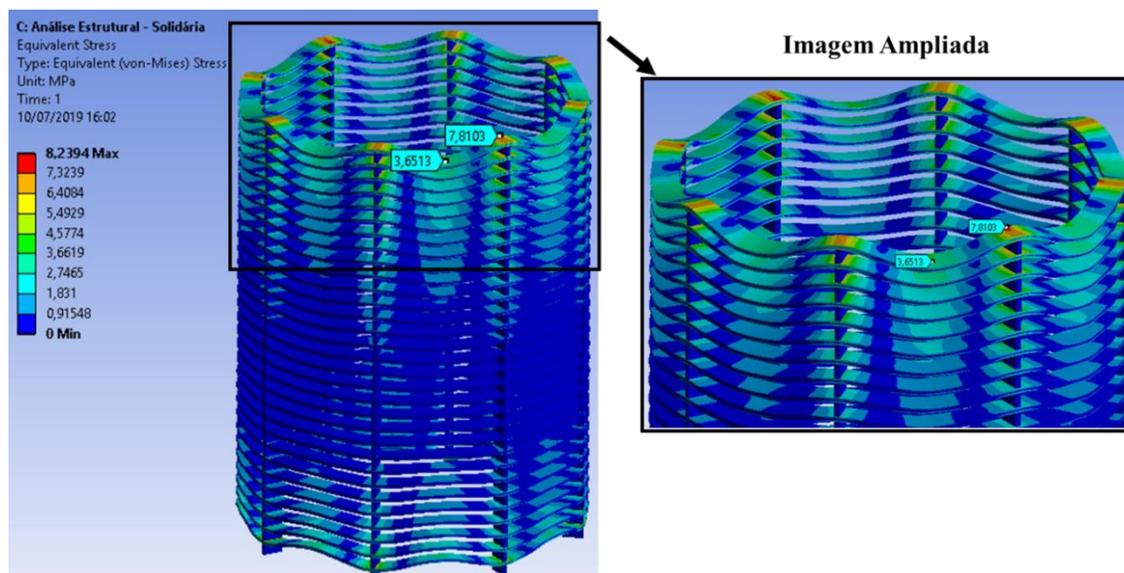
Figura 57 – Deformação total no enrolamento externo (AT) para a energização solidária.



Fonte: O Autor.

Na Figura (58) é apresentada a tensão mecânica máxima obtida para o enrolamento externo do transformador durante a energização solidária. Com isso, são alcançados os valores máximos no enrolamento externo do transformador são 3,65 MPa e 7,81 MPa entre os espaçadores e sobre os espaçadores, respectivamente. A partir disso, pode-se destacar como um ponto crítico a região do enrolamento sobre os espaçadores, já que os mesmos não permitem a movimentação do enrolamento (condição de contorno definida previamente na análise). No entanto, o equipamento opera de forma segura, tendo em vista que a tensão máxima é de 7,81 MPa (cerca de 35 vezes menor que o limite).

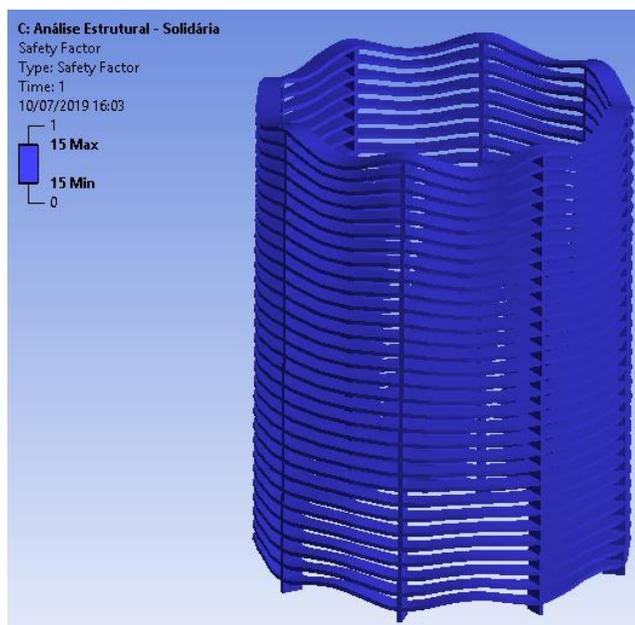
Figura 58 – Tensões mecânicas no enrolamento externo (AT) para a energização solidária.



Fonte: O Autor.

A partir da tensão mecânica, é disponibilizada a análise do grau de segurança do equipamento frente às perturbações durante a energização solidária. Na Figura (59) é apresentado o fator de segurança do enrolamento do transformador para esta condição, sendo possível inferir que o mesmo apresenta estado seguro para esta condição de operação, tendo em vista que o valor do grau de segurança foi alto (valor igual a 15).

Figura 59 – Fator de segurança no enrolamento externo (AT) para a energização solidária.

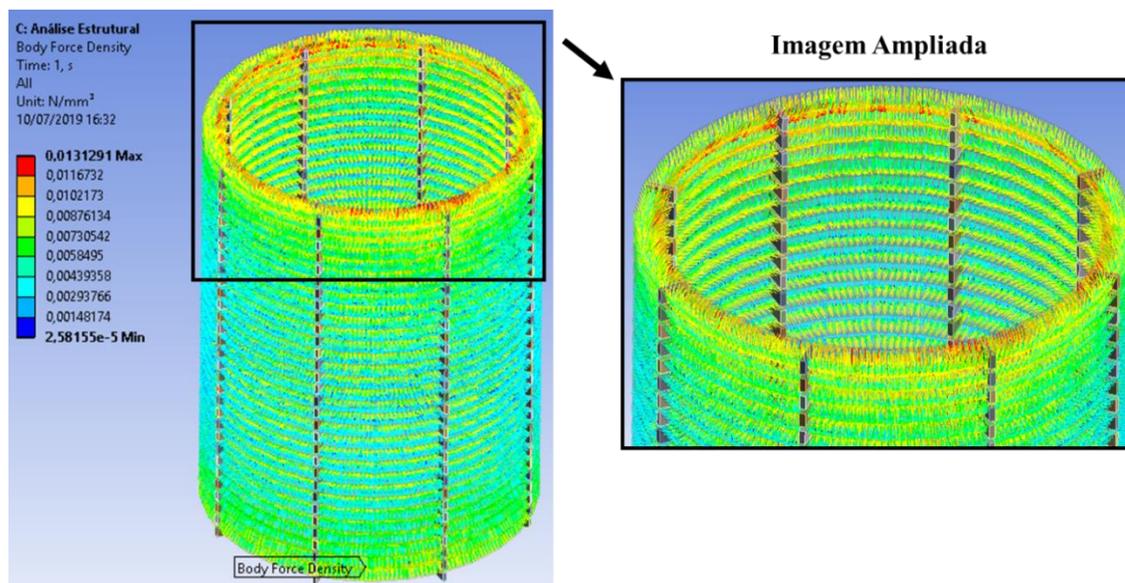


Fonte: O Autor.

O tópico a seguir será destinado para as análises mecânicas para a condição durante a energização do transformador (corrente de *inrush*).

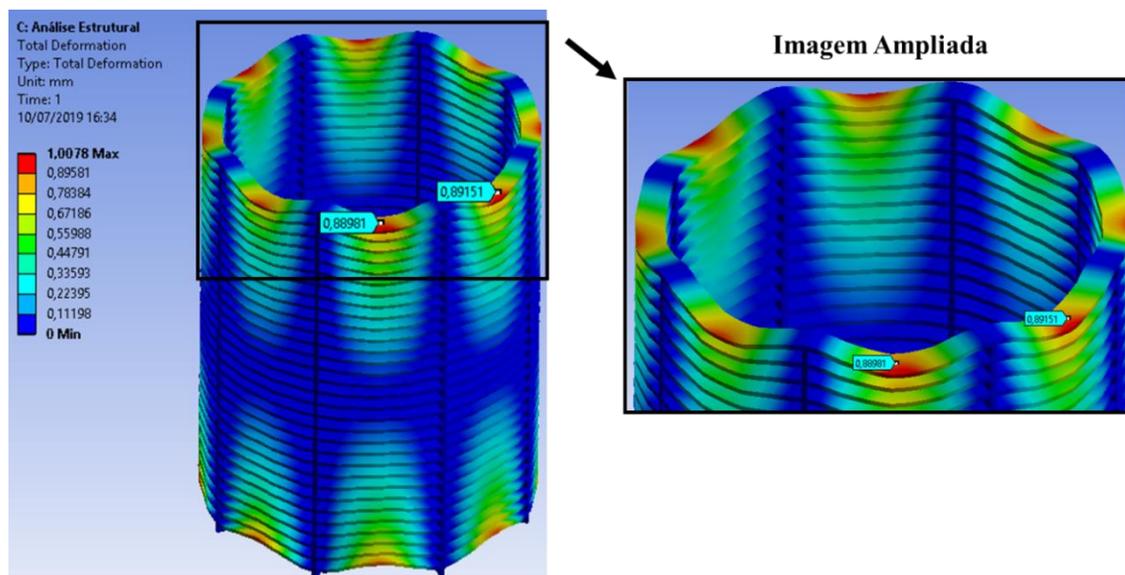
### 6.3.3 CORRENTE DE *INRUSH*

Neste tópico serão apresentados resultados do problema mecânico devido à presença da corrente de *inrush*. Com isso, na Figura (60) é ilustrado o carregamento das forças mecânicas (forças axiais e radiais) no enrolamento de alta tensão (AT) do transformador. Somente o enrolamento externo é analisado durante a energização.

Figura 60 – Importação das forças combinadas para a corrente de *inrush*.

Fonte: O Autor.

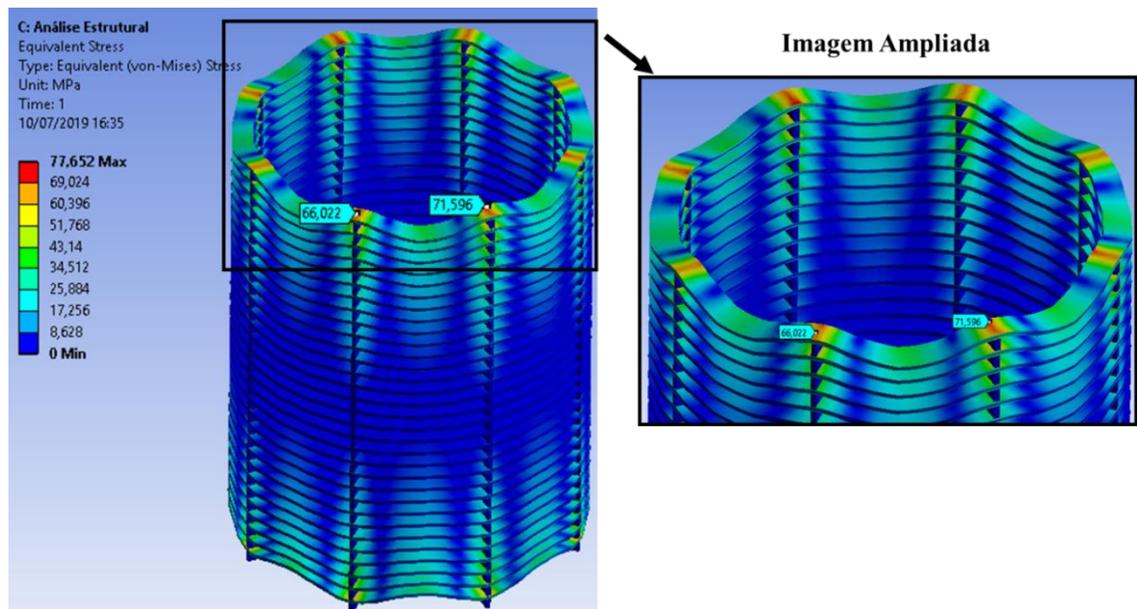
Após realizar o carregamento das forças magnéticas no enrolamento, sendo ainda estabelecidos os espaçadores como pontos fixos (geometria sem movimentação), pode-se obter o comportamento da deformação total no enrolamento externo do transformador, conforme ilustrado na Figura (61).

Figura 61 – Deformação total no enrolamento externo (AT) para corrente de *inrush*.

Fonte: O Autor.

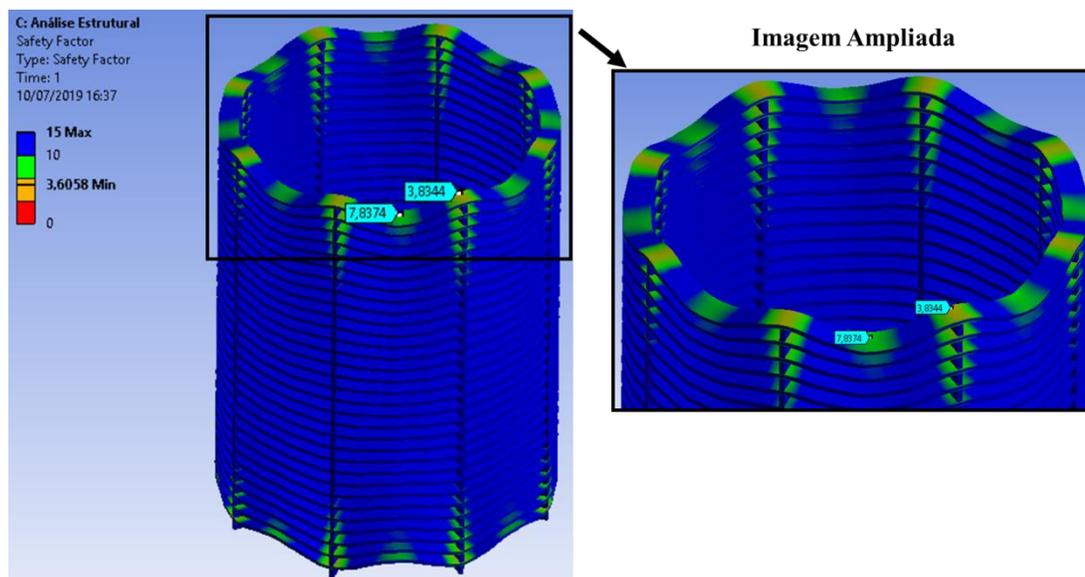
Na Figura (61) pode-se observar que a deformação apresenta maiores intensidades nas extremidades do enrolamento (parte superior e inferior), alcançando valores de 0,89 mm na direção axial do enrolamento.

A deformação máxima sofrida ocorre entre os espaçadores, tendo em vista que sobre os espaçadores a deformação é relativamente pequena, já que os mesmos são pontos fixos que não se movimentam. Também, foi avaliada a integridade do enrolamento frente às solicitações mecânicas com a presença da corrente de *inrush*, ilustrado na Figura (62).

Figura 62 – Tensões mecânicas no enrolamento externo (AT) para a corrente de *inrush*.

Fonte: O Autor.

Na Figura (62) é ilustrado que os valores máximos da tensão mecânica são de 35,20 MPa e 71,59 MPa no enrolamento, entre os espaçadores e sobre os espaçadores, respectivamente. Destaca-se que esses resultados são apresentados somente para o carregamento das forças magnéticas do primeiro pico da corrente de *inrush*. O grau de segurança do enrolamento frente as perturbações com a presença da corrente de *inrush* é apresentado na Figura (63).

Figura 63 – Fator de segurança no enrolamento externo (AT) para a corrente de *inrush*.

Fonte: O Autor.

Na Figura (63) pode-se observar que o equipamento alcança um baixo grau de segurança no enrolamento sobre os espaçadores. Sendo este considerado um ponto crítico que poderá apresentar problemas com as repetições das energizações. No entanto, para esta análise pontual o equipamento apresenta uma condição segura de operação, tendo em vista que o fator de segurança é de 3,83.

Portanto, a partir dos resultados apresentados obtidos para a operação durante a corrente de *inrush*, destaca-se que não apresentará possíveis problemas para uma ocorrência de energização do equipamento. Isso é destacado, tendo em vista que o valor limite de escoamento do cobre é cerca de duas vezes o valor máximo da tensão mecânica obtida na simulação e o valor limite da resistência à tração mecânica é aproximadamente quatro vezes o valor da tensão mecânica obtida. No tópico a seguir, será apresentada uma análise mecânica no domínio do tempo para a condição durante a corrente de *inrush*, com intuito de avaliar a integridade do enrolamento frente a toda a energização.

#### 6.3.4 ANÁLISE MECÂNICA TRANSITÓRIA

Nos tópicos anteriores foram apresentadas as análises mecânicas na condição estática quando o dispositivo opera em diferentes condições: condição nominal, energização solidária e corrente de *inrush*. Com a solução do problema, foi possível avaliar o comportamento do enrolamento

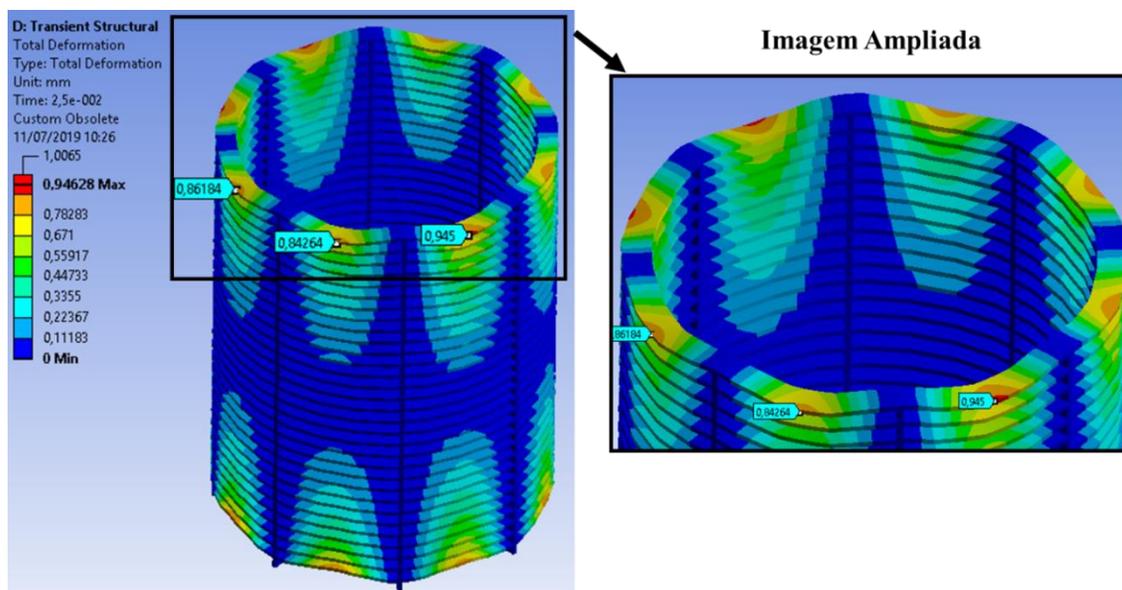
devido às solicitações de energização, como: deformação sofrida na direção axial, tensão mecânica (tensão de von-Mises) e fator de segurança.

Com isso, pode-se observar que as maiores severidades foram apresentadas durante a corrente de *inrush*. Devido ao elevado custo computacional para análises no domínio do tempo, somente para a condição com maior severidade (corrente de *inrush*) foi realizada a análise mecânica no domínio tempo. O tempo de simulação utilizado é o mesmo tempo de energização obtido no *software* ATPDraw (duração de 0,625 segundos com passo de tempo de 0,0025 segundos).

Ressalta-se que para cada simulação no instante de tempo, as forças da análise magnética são carregadas para análise mecânica, sendo atribuído as condições de contornos previamente informadas. Com isso, as informações avaliadas na análise mecânica são em decorrência da análise magnética para cada passo, aumentando consideravelmente o tempo de simulação.

A Figura (64) ilustra a deformação total no enrolamento externo no transformador em estudo no instante de tempo em 0,025 segundos. Este instante de tempo foi escolhido por apresentar maior severidade na deformação (segundo pico da corrente de *inrush*), apresentando uma deformação total na direção axial igual a 0,945 mm, sendo a deformação máxima sofrida no condutor localizado entre os espaçadores.

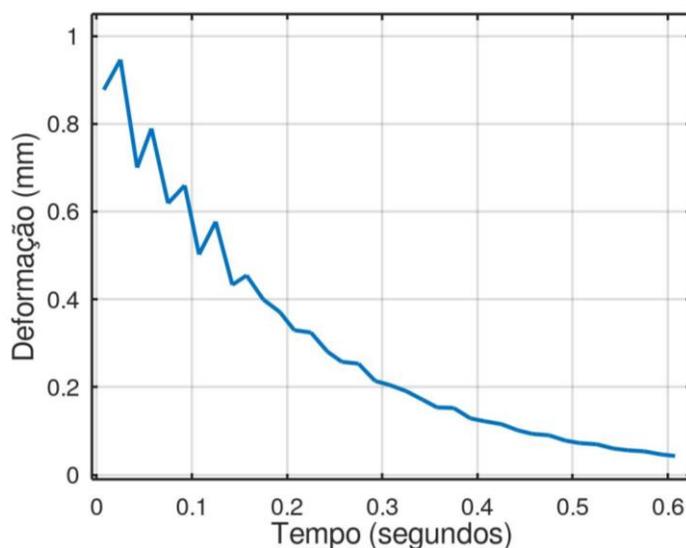
Figura 64 – Deformação total no enrolamento externo (AT) para a simulação no domínio do tempo.



Fonte: O Autor.

Na Figura (65) é mostrado o comportamento dinâmico da deformação sofrida no enrolamento externo do transformador durante o carregamento das forças magnéticas em condição de energização (corrente de *inrush*). Com isso, destaca-se que a maior deformação ocorre no instante de tempo igual a 0,025 segundos.

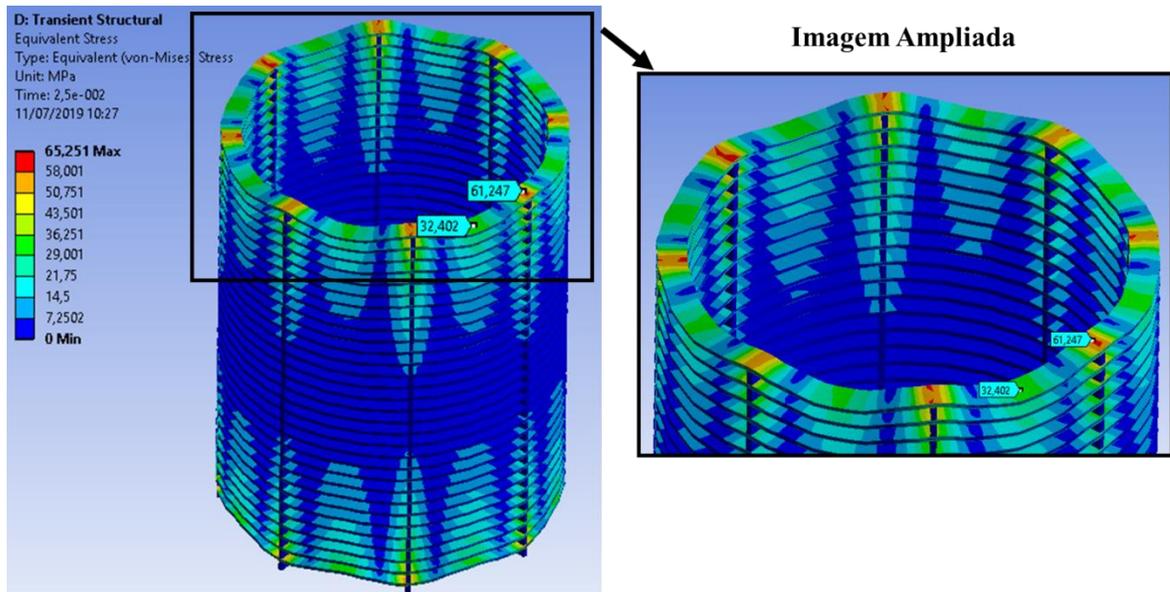
Figura 65 – Comportamento da deformação total no enrolamento externo (AT) em função do tempo.



Fonte: O Autor.

A Figura (66) ilustra a tensão mecânica equivalente no enrolamento externo do transformador no instante de tempo de 0,025 segundos da energização. Com isso, pode-se observar que o ponto que apresenta maior severidade no enrolamento, ocorre sobre os espaçadores, alcançando intensidades de 61,25 MPa, local do enrolamento sobre os espaçadores.

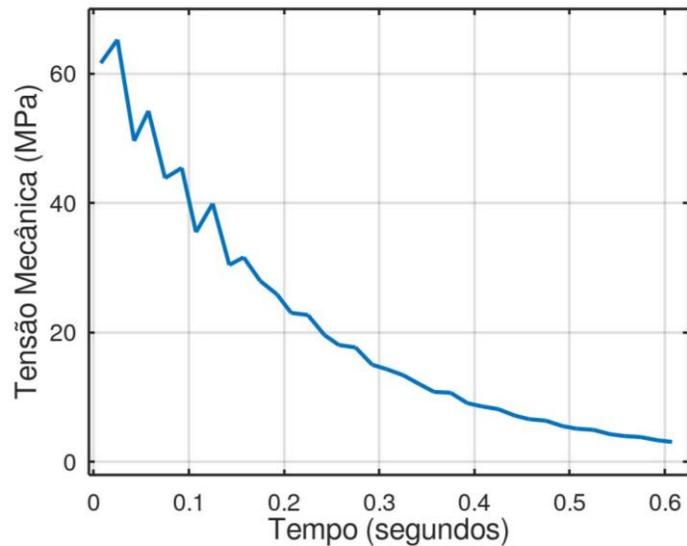
Figura 66 – Tensões mecânicas no enrolamento externo (AT) para a simulação no domínio do tempo.



Fonte: O Autor.

Na Figura (67) é apresentado o comportamento dinâmico da tensão mecânica no enrolamento externo durante a energização do transformador. Esse comportamento foi obtido a partir da aplicação das forças magnéticas (diferentes intensidades durante a energização) em função da área do enrolamento.

Figura 67 – Comportamento das tensões mecânicas no enrolamento externo (AT) em função do tempo.



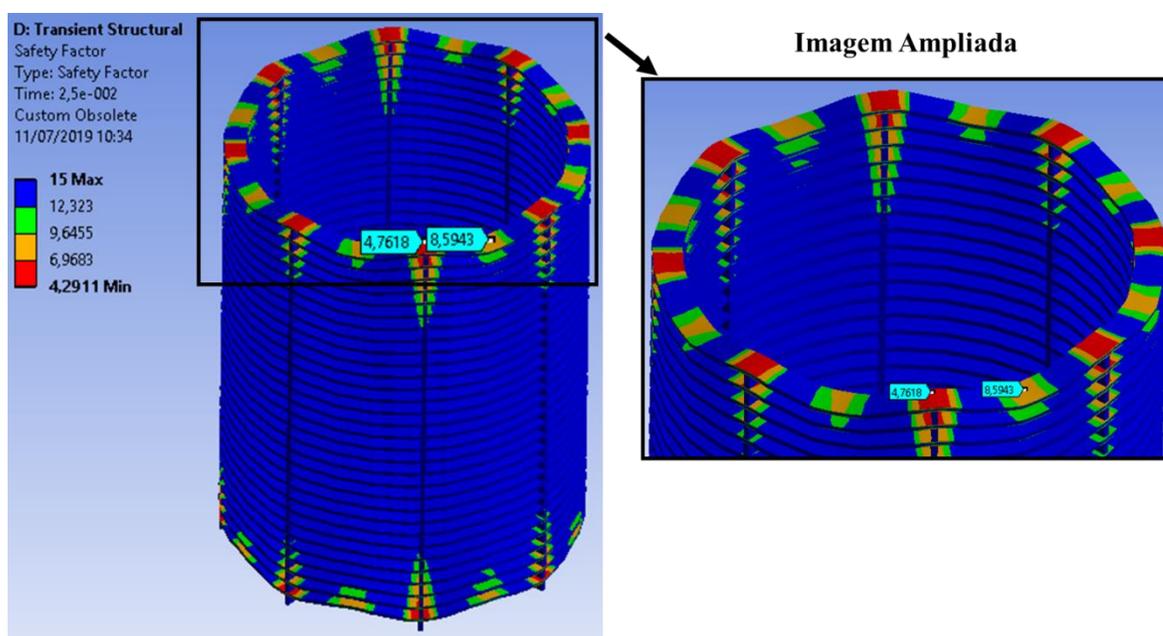
Fonte: O Autor.

A partir disso, tomando como base o valor máximo obtido para a tensão mecânica (61,25 MPa) e ao comparar com as informações apresentadas na Tabela (8), constata-se que durante a

ocorrência de uma energização, o equipamento não oferece riscos de funcionamento, tendo em vista que o valor obtido foi bem inferior ao limite de escoamento do cobre (130 MPa) e ao limite máximo da tensão mecânica (280 MPa).

A análise de segurança de um equipamento frente as solicitações mecânicas podem ser apresentadas da avaliação do grau de segurança. Com isso, a partir dos resultados das tensões mecânicas no enrolamento para cada instante de tempo e com as características intrínsecas fornecidas no início da simulação mecânica, é avaliado o comportamento do grau de segurança do enrolamento externo do transformador (fator de segurança), conforme a Figura (68).

Figura 68 – Fator de segurança no enrolamento externo (AT) para a simulação no domínio do tempo.



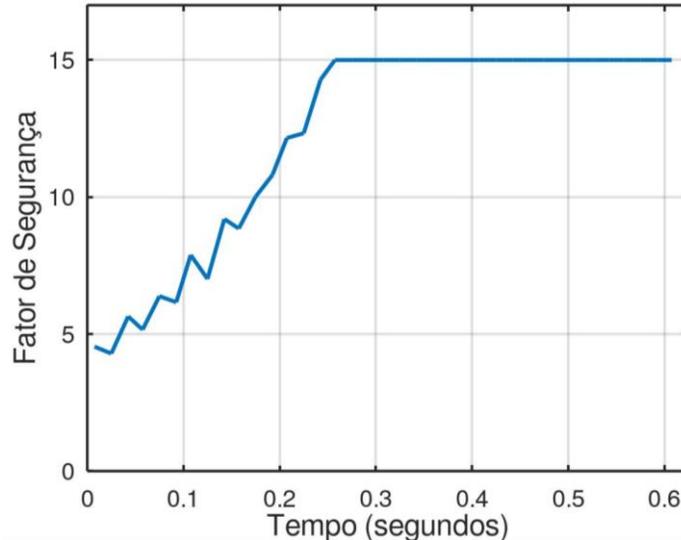
Fonte: O Autor.

Na Figura (68) foi apresentado o fator de segurança para o enrolamento externo no instante de tempo de 0,025 segundos da energização. Assim, são apresentados os pontos críticos do enrolamento, que alcançam intensidades de 4,762 e 8,59 no enrolamento sobre os espaçadores e também no enrolamento entre os espaçadores, respectivamente.

Na Figura (69) é apresentado o comportamento do fator de segurança no enrolamento externo do transformador durante a energização. O ponto de maior criticidade ocorre no instante de tempo de 0,025 segundos. Destaca-se que a partir de 0,25 segundos de duração da

energização, o equipamento apresenta o grau de segurança elevado (igual a 15), sendo o valor esperado quando o equipamento opera em condição nominal.

Figura 69 – Comportamento do fator de segurança no enrolamento externo (AT) em função do tempo.

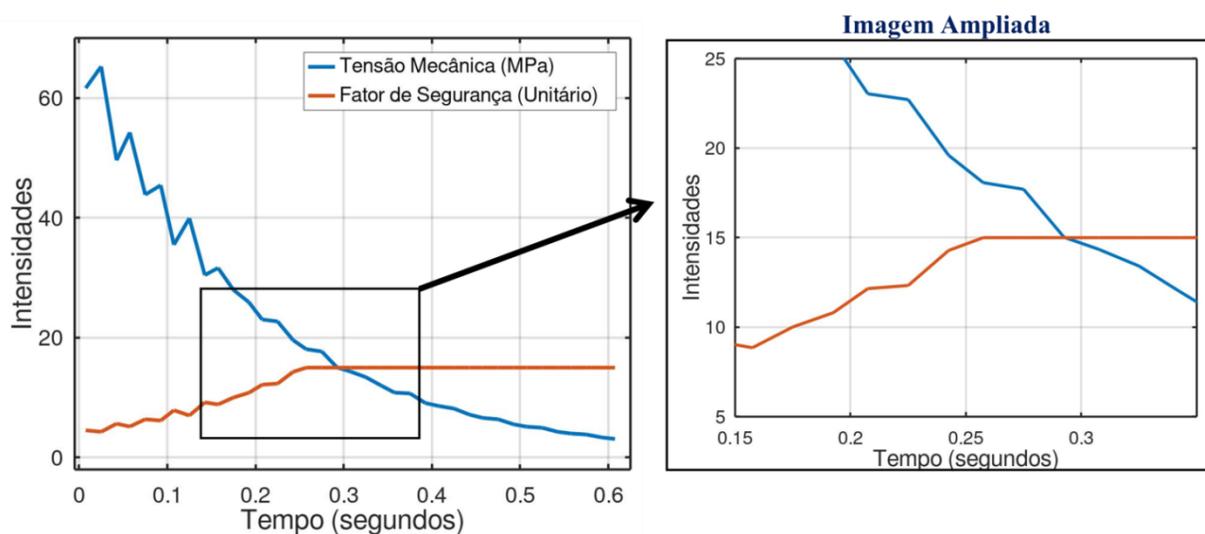


Fonte: O Autor.

Com a análise do comportamento do grau de segurança do enrolamento do transformador durante a sua energização, pode-se observar que esse efeito não oferece danos ao equipamento, tendo em vista que nos pontos críticos alcançam intensidades com valor igual a 4,76. Destaca-se que o fator de segurança apresenta uma faixa de operação insegura ao extremamente seguro (variações de 0 a 15).

Na Figura (70) é apresentado o comportamento da tensão mecânica (sendo a sua unidade representada em MPa) e o fator de segurança (admissional) durante a energização do transformador. A partir desses resultados pode ser observado que no instante de tempo de 0,25 segundos a tensão mecânica apresenta intensidade igual a 18,45 MPa e o fator de segurança alcança um valor admissional igual a 15. A partir disso, pode-se constatar que o equipamento opera em estado seguro e não apresenta nenhum ponto crítico de possíveis problemas.

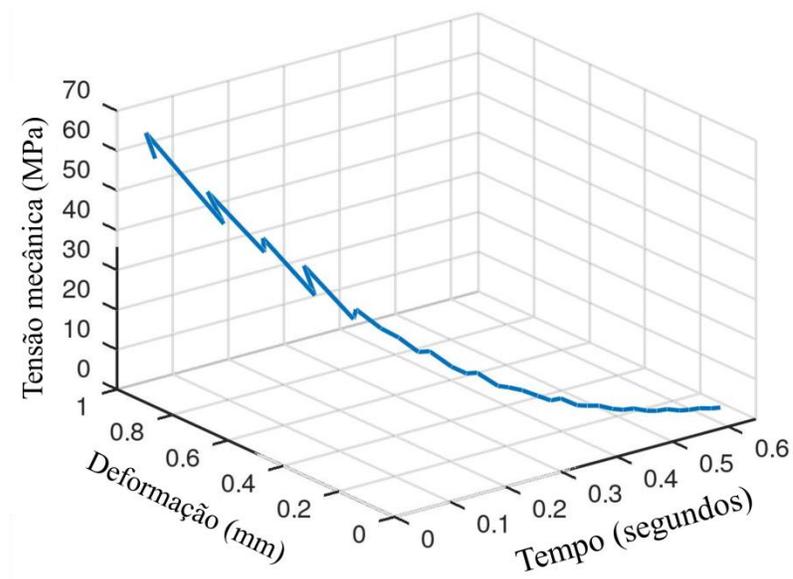
Figura 70 – Comportamento do fator de segurança no enrolamento externo (AT) em função do tempo.



Fonte: O Autor.

Na Figura (71) é apresentado um gráfico tridimensional com o comportamento entre a tensão mecânica e a deformação sofrida no enrolamento externo do transformador, ambos em função do tempo. Com isso, observa-se que nos instantes iniciais da energização, as intensidades da tensão mecânica e da deformação sofrida no enrolamento são elevadas e diminuem com o tempo.

Figura 71 – Comportamento da tensão mecânica e deformação no enrolamento externo em função do tempo.



Fonte: O Autor.

O tópico a seguir apresentará a síntese dos resultados para a análise do problema mecânico.

### 6.3.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS MECÂNICOS

Na Tabela (8) apresentam-se os resultados obtidos com o MEF na condição estática para as diferentes condições de operação: condição nominal, energização solidária e corrente de *inrush*. Com isso, são apresentadas informações como: deformação, tensão mecânica e fator de segurança (valores máximos e mínimos obtidos).

Tabela 8 – Síntese dos resultados obtidos para o problema mecânico.

Descrição	Unidade de Medida	Condição Nominal	Energização Solidária	<i>Inrush</i>
Deformação	mm	0,0106	0,102	0,89
Tensão Mecânica	MPa	0,84	7,81	71,59
Fator de segurança (Entre os espaçadores)	Unitário	15	15	7,83
Fator de segurança (sobre os espaçadores)	Unitário	15	15	3,83

Fonte: O Autor.

A partir dos resultados apresentados na Tabela (8) pode-se observar que durante a condição de *inrush* o valor do estresse mecânico aumenta consideravelmente, por isso torna-se importante ressaltar que nesta condição o equipamento sofrerá maiores deformações. No entanto, este equipamento tem a capacidade limite de 280 MPa de tensão mecânica. Destaca-se ainda que na condição de *inrush* o valor do fator de segurança diminui praticamente pela metade, o que fica subtendido a possibilidade da ocorrência de falhas.

## 6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas simulações computacionais utilizando os *softwares* ANSYS MAXWELL e ANSYS STRUCTURAL, em que ambos utilizam do método de elementos finitos para o desenvolvimento de análises em um transformador monofásico de 50 MVA que está sendo utilizado na subestação Guamá pela empresa Eletrobrás Eletronorte. Destaca-se que no capítulo 5 foi apresentado o modelo do circuito utilizado para obter o comportamento do enrolamento externo durante a energização de transformadores no *software* ATP (energização solidária e corrente de *inrush*). Posteriormente, o comportamento dessa

corrente foi utilizado durante a energização do banco de transformadores, sendo informações utilizadas como a entrada para as análises magnéticas no domínio do tempo (ANSYS MAXWELL) e, por conseguinte, nas análises mecânicas dinâmicas (ANSYS STRUCTURAL).

Também, foram realizadas análises estáticas, sendo considerada a pior condição de operação do equipamento, sendo representada a intensidade do primeiro pico da corrente durante a energização. Com isso, pode-se observar que devido ao aumento da intensidade da corrente que circula nos enrolamentos concêntricos durante a sua energização, ocorre um aumento das forças magnéticas. Como resultados da análise magnética, foi apresentado o comportamento da indução magnética e das forças magnéticas.

Essas forças são apresentadas em suas componentes axial e radial para facilitar a compreensão das análises e, por conseguinte, são importadas para a análise do problema mecânico. Na solução mecânica, os espaçadores não sofrem deformações ou deslocamentos, pois os mesmos são considerados como pontos fixos em sua condição de contorno. Nesses resultados, foram apresentadas informações relacionadas a deformação sofrida no enrolamento, estresse mecânico e o grau de segurança frente aos esforços solicitados durante a sua operação. Destaca-se que as análises foram apresentadas tanto para condição estática quanto no domínio do tempo (análise magneto-mecânica).

Ressalta-se que na análise estática é utilizado o primeiro pico da corrente durante a energização (amplitude de maior intensidade). Já para a análise transitória (no domínio do tempo) utiliza-se a toda a curva que representa a corrente de energização do equipamento. Com isso, pode-se observar que devido ao aumento da intensidade da corrente que circula nos enrolamentos concêntricos (durante a energização dos transformadores), provoca um aumento nas forças magnéticas. As mesmas foram apresentadas e comparadas em suas componentes axial e radial.

Essas forças magnéticas foram inseridas como dados de entrada para o desenvolvimento do problema mecânico. Ainda, os espaçadores são adicionados como suporte fixo, conseqüentemente, os mesmos não sofrem deslocamentos e deformações, sendo estas as condições de contorno do problema mecânico. Com isso, obteve-se como resultados para cada condição de operação: deformação total sofrida no enrolamento, estresse mecânico e fator de segurança. Essas análises foram realizadas tanto na condição estática quanto no domínio do tempo.

A partir de todos os resultados, os possíveis pontos de falhas no enrolamento no transformador podem ser observados devido a atuação dos esforços combinados durante a energização do transformador. Destaca-se que no enrolamento do transformador o possível ponto de falha seria na localização sobre os espaçadores, tendo como análise o baixo valor do fator de segurança devido às elevadas intensidades da tensão mecânica.

No entanto, mesmo com a elevada severidade das forças combinadas, o equipamento é robusto o suficiente e suporta as solicitações mecânicas. Ressalta-se que esta análise toma como base a ocorrência de uma energização, em caso de repetições desse fenômeno, o equipamento poderá apresentar possíveis problemas. Portanto, o objetivo principal deste capítulo foi apresentar os resultados obtidos a partir da metodologia computacional utilizada para os estudos de falhas em transformadores.

# CAPÍTULO VII

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo tem por objetivo apresentar as considerações finais do trabalho a partir de todos os resultados obtidos nesta tese. Neste trabalho foram apresentados resultados da análise do problema magnético e mecânico na condição estática no enrolamento do transformador para as diferentes condições de operação: condição nominal, energização solidária e corrente de *inrush*. A partir disso, pode-se observar que esta última condição apresenta maior severidade das forças magnéticas no enrolamento do transformador de potência. Portanto, esta condição foi utilizada em análise no domínio do tempo (*Time Stepping Finite Element Method*), devido ao elevado custo computacional para a realização deste tipo de análise.

Com isso, neste capítulo serão apresentadas informações relacionadas à máquina utilizada para as simulações, custo computacional e o tempo de simulação. Também, as conclusões a partir de todos os resultados desta tese, assim como as principais dificuldades enfrentadas, tendo em vista as características solicitadas pelo *software* para as simulações computacionais utilizando o método de elementos finitos e as propostas futuras.

### 7.2 DISPONIBILIDADE E CUSTO COMPUTACIONAL

Para o desenvolvimento das simulações computacionais apresentadas neste documento foi utilizado uma máquina virtual disponibilizada pela UNIFESSPA (Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará) junto ao CTIC (Centro de Tecnologia da Informação e Comunicação). Portanto, a seguir apresentam-se as características do computador utilizado nas simulações computacionais.

- a) Processador: Dois núcleos físicos Intel® Xeon® CPU E5-2623 v3 @ 3.00GHz;
- b) Memória RAM: 16 GB;

c) Memória de Armazenamento: 250 GB.

Portanto, para análise magnética foi realizada em um tempo total 31:02:10 (trinta e uma horas, dois minutos e dez segundos). Ressalta-se que todo este tempo é destinado a criação da malha (sendo utilizado o elemento tetraédrico) e a resolução do problema. Para análise mecânica, foi realizada em um tempo total de 00:15:10 (quinze minutos e 10 segundos). Ainda, destaca-se que este tempo foi utilizado somente para a obtenção dos resultados, onde nesta etapa já foram concluídas a definição e refinamento da malha, importação de forças, entre outras informações relacionadas a condição de contorno.

### 7.3 CONCLUSÕES DA TESE

Durante o desenvolvimento de projetos em transformadores de potência, vários fatores devem ser levados em consideração, dentre estes se destacam: o custo de fabricação e o seu desempenho em serviço; também algumas variáveis: valores nominais de carregamento (amplitude das correntes), forças de carregamento nos enrolamentos (forças magnéticas), valores máximos admissíveis de carregamento das forças magnéticas (devido a corrente de energização), variação de temperatura durante a operação, propriedades intrínsecas dos materiais utilizados, ainda deve ser levado em considerações algumas restrições, como aos níveis de segurança do equipamento, entre outros.

A partir de todas essas considerações realizadas no processo de desenvolvimento de projeto de transformadores, o processo de cálculo analítico torna-se complexo e impreciso. Em contrapartida, a simulação computacional pode ser utilizada como uma ferramenta eficiente e interativa na tentativa de analisar o comportamento do equipamento e no desenvolvimento por meio dos modelos computacionais. Com isso, pode-se utilizar esse tipo de simulação no processo de projeto desses equipamentos, tendo em vista que diferentes cenários e modificações podem ser realizadas, como: modificações na geometria, materiais utilizados, condições de contorno, entre outros.

De forma correlata, essa ferramenta computacional pode ser utilizada por meio de uma visão sistêmica do efeito que as alterações realizadas terão sobre o desempenho global de toda a análise desenvolvida. Nesta perspectiva, neste trabalho foi apresentada a metodologia utilizada na realização de um estudo computacional por meio de uma análise magnética-mecânica em um transformador monofásico de 50 MVA disposto em uma subestação da região metropolitana da

cidade de Belém - PA.

Para o desenvolvimento das análises, as diferentes condições foram analisadas na condição estática, como: condição nominal, energização solidária e corrente de *inrush*. Para esta última condição, também foi realizada uma análise no domínio do tempo (*Time Stepping Finite Element Method*). Ainda, torna-se importante ressaltar que as elevadas amplitudes da corrente durante a energização de transformadores é uma das preocupações que são levadas em consideração no desenvolvimento de projetos nesses equipamentos.

Neste trabalho, modelo em 3D foi utilizado para investigar o comportamento magnético e mecânico de um transformador monofásico de 50 MVA para as diferentes condições de operação, por meio do MEF. Para isso, foram realizadas análises estáticas e no domínio do tempo (análises quase estáticas). Para alcançar os objetivos deste trabalho, a metodologia foi dividida em três etapas: solução do comportamento da corrente de energização, solução do problema magnético e solução do problema mecânico.

Na primeira etapa de solução (solução do comportamento da corrente de energização), utilizou o *software* ATPDraw para a modelagem dos transformadores monofásicos de 50 MVA por meio da rotina BCTRAN. A não linearidade do núcleo do equipamento foi apresentada a partir de dados de testes de curto circuito e perdas a vazio.

A segunda etapa de solução (solução do problema magnético) foi realizada análises estáticas para diferentes condições de operação: condição nominal, energização solidária e corrente de *inrush*, sendo analisadas as piores solicitações enfrentadas pelo equipamento, como a elevadas amplitudes da corrente. Também, foi realizada uma análise dinâmica para a corrente de *inrush*, tendo em vista que foi a condição que apresentou maior severidade nos estudos na condição estática e levando em consideração o custo computacional para simular todas as demais condições de operação, somente este foi analisada por meio de um estudo no domínio do tempo. Para isso, todo o comportamento da corrente de *inrush* (obtida no *software* ATPDraw) foi inserida na análise magnética, sendo utilizado a curva da corrente, com tempo de 0,625 segundos e com passo de tempo de 0,0025 segundos.

Em todas essas análises foram apresentados resultados do comportamento da indução magnética (tanto no núcleo quanto no enrolamento do equipamento) e das forças magnéticas (forças em componentes axial e radial) no enrolamento do transformador. Com isso, pôde-se observar que durante a energização do transformador, com a presença da corrente de *inrush*,

elevadas intensidades de indução magnética e de forças magnéticas são encontradas. Esses resultados são ilustrados em suas componentes axiais e radiais por meio de gráficos em 2D com intuito de facilitar a compreensão da indução magnética e das forças magnéticas.

Na última etapa (solução do problema mecânico), todas as forças obtidas nesta solução foram importadas da solução do problema magnético. Destaca-se que essas forças são importadas para cada elemento. Algumas considerações são consideradas nesta análise, como as condições de contorno, importação de forças para cada elemento, os espaçadores foram adicionados como uma geometria fixa, não permitindo a movimentação dos mesmos, ainda as áreas de contato existentes, como as faces de contatos entre os diferentes materiais do cobre e espaçador. Também, foram adicionadas algumas características dos materiais utilizados no modelo, como o limite de escoamento do cobre (sendo o valor máximo de tensão suportado pelo equipamento dentro da zona elástica de operação do cobre) e o limite máximo de resistência à tração (valor máximo de tensão mecânica suportada pelo enrolamento antes de uma ruptura).

A partir de tudo isso, foi apresentado resultados referente à solução do problema mecânico, como a deformação total sofrida pelo enrolamento, tensão mecânica e o grau de segurança frente as perturbações sofridas, tornando possível a análise de integridade do equipamento. Ainda, destaca-se que da mesma forma da solução do problema magnético, nestas análises também foram apresentados resultados da análise estática e transitória. No entanto, ressalta-se que para a análise transitória somente a corrente de *inrush* foi analisada, tendo em vista o custo computacional.

Após a análise desses resultados, alguns pontos são considerados críticos durante a energização do transformador, como no enrolamento sobre os espaçadores. Isso é justificado pelo fato de que dentre as condições de contorno que foram estabelecidas na análise mecânica, a movimentação dos espaçadores não foi permitida, já que os mesmos foram inseridos como suporte fixo e assim, obtendo maiores intensidades da tensão mecânica e, conseqüentemente, o menor grau de segurança.

Mesmo assim, com a ocorrência de uma energização, o equipamento não oferece risco de queima e/ou defeito de forma imediata. No entanto, a repetição do fenômeno pode corroborar na diminuição da sua vida útil. As intensidades máximas da tensão mecânica alcançada na ocorrência da uma energização é praticamente a metade do limite de escoamento do material, ou seja, o mesmo não irá deformar permanentemente devido a uma energização. Entretanto, deve

estar preocupado caso haja repetições desse fenômeno, que pode agregar as intensidades das forças e assim, conseqüentemente, proporcionando deformações e contribuindo para o mau funcionamento e diminuído a sua vida útil.

#### **7.4 DIFICULDADES**

Um dos problemas relacionado a utilização do MEF é o custo computacional para obtenção dos resultados, principalmente durante a geração de malha, o que dificultava a utilização de *softwares* baseado em MEF em problemas de engenharia. No entanto, com o avanço da tecnologia em computadores, tornou-se popular a sua utilização. Logo, neste trabalho foi utilizado o MEF por ser uma ferramenta que apresentam resultados computacionais próximos aos valores reais. Para isso, foi utilizada uma discretização refinada da geometria, devido a uma maior quantidade de elementos, e conseqüentemente, gerando um aumento do custo computacional para a simulação.

Portanto, pode-se destacar como uma das maiores dificuldades encontradas para o desenvolvimento das análises apresentadas neste trabalho foi o custo computacional para o processamento exigido, tendo em vista que o modelo computacional do equipamento foi realizado em 3D e foi utilizado em simulações no domínio do tempo, o que solicita uma quantidade superior de elementos se comparado a outras simulações simplificadas.

#### **7.5 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS**

Neste trabalho foi realizada a investigação em um transformador de potência utilizando um modelo tridimensional real por meio de um acoplamento magnético-mecânico. No entanto, destaca-se que o acoplamento de análise utilizado foi o acoplamento fraco, tendo em vista que nos resultados apresentados nesta tese a deformação no enrolamento do transformador não gerava alterações no comportamento da indução magnética. Portanto, destaca-se a seguir os possíveis pontos que são propostas futuras de continuidade da pesquisa.

- Realização de estudos por meio de acoplamento forte;
- Análise do comportamento térmico do transformador durante a sua energização e a influência do óleo mineral isolante para o comportamento dinâmico da temperatura;
- Análise em transformadores quando conectados a fontes harmônicas, com intuito de

avaliar o comportamento as perdas no cobre e por histerese, além do comportamento das forças magnéticas e da indução magnética com a presença desses harmônicos.

- Realizar uma análise de fadiga para a ocorrência de energização em transformadores, sendo avaliado o comportamento da estrutura do enrolamento para os carregamentos repetidos durante a energização do equipamento.
- Verificação experimental para comprar os resultados das simulações computacionais.

## ANEXOS

Neste tópico serão adicionadas algumas informações que foram necessárias e importantes para a realização do trabalho. No entanto, torna-se importante ressaltar que algumas informações que não foram autorizadas a divulgação, não serão apresentadas neste tópico.

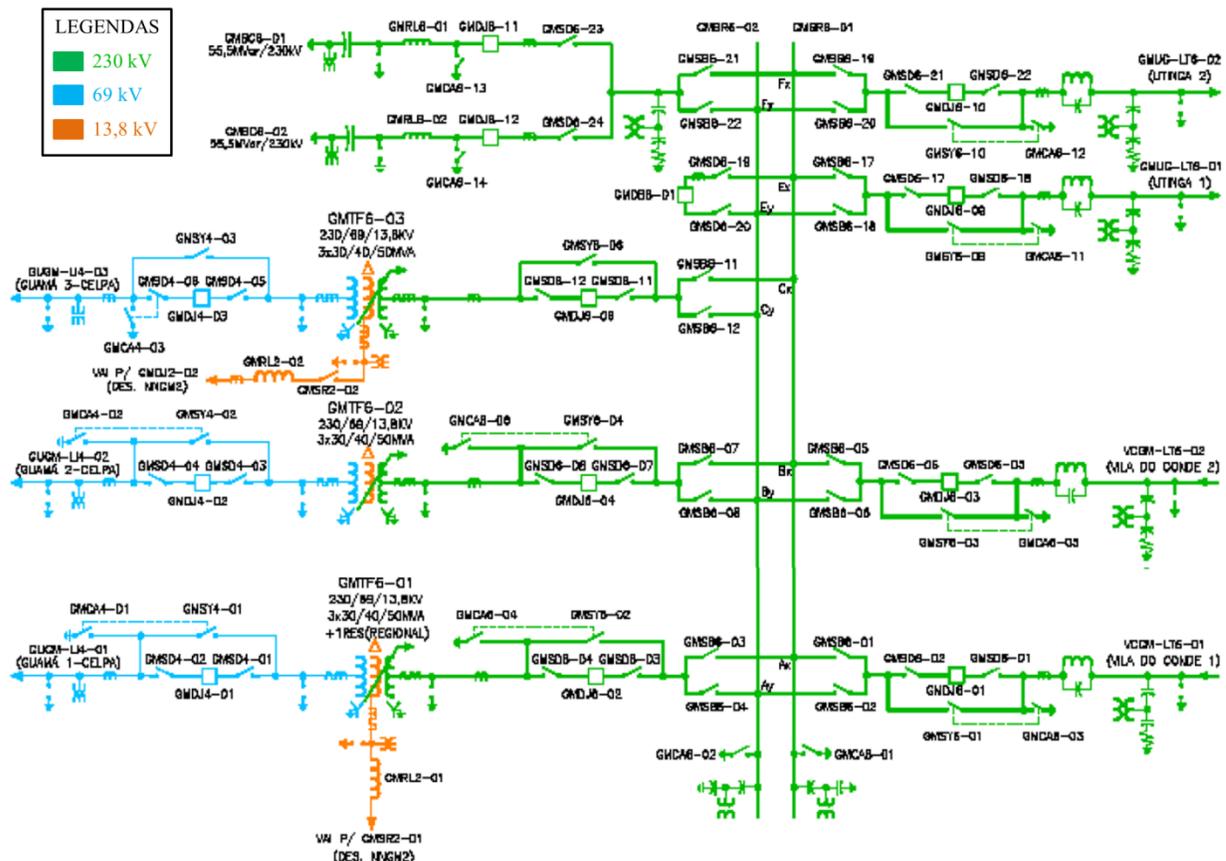
### **A. ANEXO 01: SUBESTAÇÃO GUAMÁ**

A Subestação Guamá compõe o sistema de transmissão de energia elétrica do Pará, tendo capacidade instalada de 450 MVA (fazendo parte do Sistema Elétrico Nacional). A mesma está conectada ao sistema elétrico por meio de quatro linhas de transmissão, sendo responsável pelo suprimento de energia da cidade de Belém – PA. Essa subestação é do tipo seccionadora-abaixadora e opera a três níveis de tensão (230 / 69 / 13,8 kV), na Figura (72) é apresentado o diagrama unifilar da subestação, sendo representado por meio das cores as classes de tensão de operação (ALVES, 2015).

Essa subestação, sendo de responsabilidade de gerenciamento atribuída à Divisão de Transmissão do Guamá – OTPG é uma instalação considerada estratégica para o setor elétrico à cidade de Belém, capital do estado paraense cuja população é de 1.485.732 habitantes (IBGE, 2018).

A subestação Guamá, Figura (72), é composta por quatro linhas de transmissão (tendo tensão base de 230 kV), sendo duas provenientes da SE Vila do Conde intitulada como VCGM-LT6-01 e VCGM-LT6-02 (localizada na cidade de Abaetetuba – PA). Ainda, outras duas linhas para o transporte de energia para a SE Utinga intitulada como GMUG-LT6-01 E GMUG-LT6-02 (localizada na cidade de Ananindeua – PA). Também, na mesma subestação apresentam-se três bancos de transformadores com as suas respectivas linhas de interligação com a rede de distribuição da CELPA. Com isso, os equipamentos (com configuração 230 / 69 / 13,8kV) disponibilizam uma capacidade total de 150 MVA em cada banco que são intitulados como: GMTF6-01, GMTF6-02, GMTF6-03, respectivamente para os 03 (três) circuitos.

Figura 72 - Diagrama unifilar da Subestação Guamá.



Fonte: ALVES, 2015.

Além disso, são utilizados equipamentos de compensação de reativos, montados por meio de dois bancos de capacitores tendo como principal objetivo contribuir para a manutenção da tensão em níveis aceitáveis, conforme estabelecido pela legislação brasileira. Para isso, esses bancos de capacitores apresentam uma capacidade instalada de 55 MVar cada, sendo intitulados como GMBC6-01 e GMBC6-02.

# CAPÍTULO VII

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELFATAH, M.; EL-SHIMY, M.; ISMAIL, H. M. “Reliability analysis of 220 kV power transformers in Egypt”. *Ain Shams Eng J*, 2 (2011), pp. 183-194.

AGUIAR, E. R. **Análise de Resposta em Frequência Aplicada em Transformadores de Potência**. Dissertação (Mestrado). Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Março de 2007.

AHN, H; OH, Y; KIM, J; SONG, J. and HAHN, S. “Experimental Verification and Finite Element Analysis of Short Circuit Electromagnetic Force for dry-type Transformer,” *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 48, pp. 819-822, 2012.

AMOIRALIS, I. E.; TSILI, A. M.; KLADAS, G. A. Transformers Design and Optimization: A Literature Survey. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, October 2009.

ARTURI, C. “Transient Simulation and Analysis of a Three-phase five-limb step-up transformer following an out-of-phase synchronization. *IEEE Transaction on Power Delivery*. V. 6. N.1. pp. 196-207. Jan. 1991.

AZEVEDO, A. C. Estresse Eletromecânico em Transformadores causado por Curtos-Circuitos “Passantes” e Correntes de Energização, (Tese de Doutorado), Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

BAKSHI, A.; KULKARNI, S. V.; Coupled Electromagnetic-Structural Analysis of the Spiraling Phenomenon in a Helical Winding of a Power Transformer. *IEEE Transactions On Power Delivery*, v. 29, n. 1, pp. 235-240, fevereiro 2014.

BANDEIRA, J. H. L; SAMPAIO, R. F.; PONTES, R. S. T; Simulation of Inrush Currents in a Wind Power Plant using ATP Draw. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*. 2018. pp. 1 – 6.

BARTLEY, W. H. “Analysis of Transformer Failures”. 36th Annual Conference of IMIA – The International Association of Engineering Insurers, v. 1, n. 1, p. 1 – 12, September 2003.

BARZEGARAN, M.R.; MIRZAIE, M.; SHAYEGANI AKMAL, A. “Investigating Short-circuit in Power Transformer Winding with Quasi-static Finite Element Analysis and Circuit-based Model”. IEEE PES, Conference and Exposition Transmission and Distribution, abril 2010.

BASTOS, J. P. A., Eletromagnetismo e Cálculo de Campos. 3. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1996. 452 p.

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

BEHJAT, V.; VAHEDI, A. “Numerical modeling of transformers interterm faults and characterizing the faulty transformer behavior under various faults and operating conditions”. IET Electric Power Application, v. 5, n.5, p. 415-431, maio 2011 .

BEHJAT, V; SHAMS, A; TAMJIDI, V. “Characterization of Power Transformer Electromagnetic Forces Affected by Winding Faults”. Journal of Operation and Automation in Power Engineering Vol. 6, No. 1, Jun. 2018, Pages: 40-49.

BERTAGNOLLI, G. **Short – Circuit Duty of Power Transformers**. 2<sup>nd</sup> Edition, ABB Transformers, Milano, Italy, 1998.

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

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

BRUNKE, J. H.; FROHLICH, K. J. “Elimination of Transformer Inrush Current by Controlled Switching: Theoretical considerations”. IEEE Transaction Power Delivery. 2001. pp. 276-280.

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

CHEN, X. “A Three-Phase Multi-legged Transformer model in ATP using the directly-formed inverse inductance matrix”. IEEE Transaction Power Delivery. Vol. 11. Nº. 3, pp. 1554-1562, Jul. 1996.

CHIESA, N.; MORK, B. A.; and HØIDALEN, H. K. “Transformer Model for Inrush Current Calculations: Simulations, Measurements and Sensitivity Analysis”. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 25, NO. 4, OCTOBER 2010.

CHMURA, L.; MORSHUIS, P.H.F.; GULSKI, E., SMIT, J. J.; JANSSEN, A.; Statistical analysis of subcomponent failures in power transformers. Electrical Insulation Conference, Holanda, junho 2011.

CHRISTINA, A. J.; SALAM, M. A.; RAHMAN. Q. M.; RAHMAN, Q. M.; FUSHUAN, W.; ANG, S. P.; VOON, W. “Causes of transformers failures and diagnostic methods – A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018.

CIGRE WG 12.19. **The Short Circuit Performance of Power Transformers**. [S.l.], 2002.

CIPCIGAN, L., WILSON, X., and DINAHAHI V. "A new technique to mitigate inrush current caused by transformer energization." in Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, 2002, pp. 570-574 vol.1.

CUI, Y; ABDUSALAM, S. G; CHEN, S; XU, W. “A sequential phase energization technique for transformer inrush current reduction - Part I: Simulation and experimental results”. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 20, no. 2, 2005.

DE LEÓN, F. and SEMLYEN, A. Complete transformer model for electromagnetic transients, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, January 1994, pp. 231–239.

DICK, E. P; WATSON, W. “Transformer Models for Transient Studies based on Field Measurement”. IEEE Transformer Power Application on Systems. PAS-100. 1981. pp. 401-419.

DOMMEL, H. W. **Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book)**. Portland, OR: Prepared for BPA, Aug. 1986.

DULAR, P. “Modélisation du Champ Magnétique et des Courants Induits dans des Systèmes Tridimensionnels non Linéaires”, Tese de Doutorado, Universidade de Liège, Bélgica, 1996.

ERTL, M. and VOSS, S. “The role of load harmonics in audible noise of electrical transformers,” *J. Sound Vib.*, vol. 333, no. 8, pp. 2253–2270, Apr. 2014.

ESLAMIAN, M; VAHIDI, B. New Methods for Computation of the Inductance Matrix of Transformer Windings for Very Fast Transients Studies. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 27, n. 4, p. 2326-2333, Oct. 2012.

FAIZ, J.; EBRAHIMI, B. M. and NOORI, T. “Three- and Two-Dimensional Finite-Element Computation of Inrush Current and Short-Circuit Electromagnetic Forces on Windings of a Three-Phase Core-Type Power Transformer”. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, No. 5, 2008.

FONSECA, W. S.; LIMA, D. S.; LIMA, A. K. F.; SOEIRO, N. S.; and NUNES, M. V. A. “Analysis of electromagnetic stresses and structural integrity on the winding of a transformer under inrush currents conditions,” in *Proc. 12th IEEE Int. Conf. Ind. Appl.*, 2016, pp. 1–8.

FONSECA, W. S.; LIMA, D. S.; LIMA, A. K. F.; SOEIRO, N. S.; BEZERRA, U. H. and NUNES, M. V. A. “Analysis of Structural Behavior of Transformer’s Winding Under Inrush Current Conditions”. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Volume 54; Issue 3. May-June 2018.

FONSECA, W. S.; NUNES, M.V.A.; LOPES, A.C.; Modelagem de Esforços Eletromecânicos de Transformador de Núcleo Amorfo através do Método de Elementos Finitos. *IEEE/PES 2012 Transmission & Distribution, Conference and Exposition Latin America*, São Paulo, novembro 2010.

GE, W.; ZHAO, J.; WANG, Y. “Analysis of the Residual Flux Influence on Inrush Current and Electromagnetic Force in Large Power Transformer”. *The 14<sup>th</sup> IET International Conference on AC and DC Power Transmission - ACDC*, 2019.

GEORGILAKIS, P. S. 2009. **Spotlight on Modern Transformer Design**. (1<sup>a</sup> ed.). London, New York. Editora: Springer Dordrecht Heidelberg London New York.

GONZÁLEZ, R. C.; SOLER, A. C; MACÍAS, J. A. R; CORDEIRO, G. A. “Inrush Current Mitigation in Three-phase transformers with isolated neutral”. *Electric Power Systems Research*. 2015.

HAGINOMORI, E.; KOSHIDUKA, T.; ARA, J.; IKEDA, H. **Power System Transient Analysis: Theory and Practice using Simulation Programs (ATP - EMTP)**. 2016. John Wiley & Sons, Ltd.

HALIM, H. A.; PHUNG, B. T. FLETCHER, J. “Investigation and modelling of sympathetic inrush due to transformer energization”. International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS). Pp. 22-27. 2014.

HARLOW, J. H. **Electric Power Transformer Engineering**. 2<sup>nd</sup> Ed. Boca Raton, CRC Press, 2006.

HEATHCOTE, J. M. **J&P Transformer Book**, 12<sup>th</sup> ed., Oxford, Elsevier Science Ltd, 1998.

HIBBELER, R. C., **Strength of Materials**, 5<sup>th</sup> ed. Tech. Sci. Books Publ., São Paulo, 2006.

HØIDALEN, H. K., MORK, B. A., GONZALEZ, F., ISHCHEKNO, D., and CHIESA, N., “Implementation and verification of the hybrid transformer model in ATPDraw,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 3, pp. 454 – 459, Mar. 2009, special Issue: Papers from the 7th International Conference on Power Systems Transients (IPST).

JAGERS, J. N.; KHOSA, J.; KLERK, P. J.; GAUNT, C. T. “Transformer reliability and condition assessment in a South African Utility”. Presented in XV International Symposium on High Voltage Engineering Slovenia; 2007.

JONGEN, R.; MORSHUIS, P.; GULSKI, E.; SMIT, J. “Statistical analysis of power transformer component life time”. 8<sup>th</sup> International Power Eng Conf Singapore. 2007. p. 1273–1277.

JONHSON, C. “Numerical Solution of Partial Differential Equations by the Finite Element Method”. Cambridge University Press, 1987.

KEFALAS, T.D. e KLADAS, A. G.; Analysis of Transformers Working Under Heavily Saturated Conditions in Grid-Connected Renewable-Energy Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 59, n 5, p. 2342-2350, maio 2012.

KHEDERZADEH, M. “Mitigation of the impact of Transformer Inrush Current on Voltage Sag by TCSC”. *Journal of Electric Power Systems Research*. Vol. 80. pp. 1049-1055. 2010.

KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. *Transformer Engineering: Design and Practice*, Marcel Dekker, Inc, New York, 2012.

KUMAR, A; MAHAJAN, S. M. “Correlation between time and frequency domain measurements for the insulation diagnosis of current transformers”. North American Power Symposium, 2010.

KUMBHAR, G. B; KULKARNI, S. V. “Analysis of Sympathetic Inrush Phenomena in Transformers Using Coupled Field-Circuit Approach”. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.

LIN, C. E., CHENG, C. L., HUANG, C. L., and YEH, J. C. Investigation of magnetizing inrush current in transformers —Part I: Numerical simulation, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, January 1993, pp. 246–254.

LUZ, F. M. V., **Desenvolvimento de um *Software* para Cálculo de Campos Eletromagnéticos 3D Utilizando Elementos de Aresta, levando em conta o Movimento e o Circuito de Alimentação**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2003. pp. 2016.

MACHADO, P. V. Modelo Híbrido de Autotransformador para Estudos de Alta Frequência – Dissertação (Mestrado). 2014. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro – RJ - Brasil, pp – 67.

MADRUGA, E. H. Redução da Corrente de *Inrush* em Transformadores de Potência Monofásicos. 2018. Monografia. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa – PB – Brasil. pp. 67.

MARDEGAN, C. **Proteção dos transformadores**. O Setor Elétrico, p. 26-39, 2010.

MARINHO, I. J. “Projeto Ótimo de Estruturas Metálicas de Arquibancadas Reutilizáveis via ANSYS”. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RIO. Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

MARTINEZ, J. A.; MORRIS, A. B. “Transformer Modeling for Low and Mid-Frequency Transients – A Review”. IEEE Transactions Power Delivery. Vol. 20. Nº. 2. April. 2005.

MEDEIROS, R. P. Proteção Diferencial de Transformadores de Potência Utilizando a Transformada *Wavelet*. Dissertação de Mestrado. 2014. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal – RN – Brasil. pp. 110.

METWALLY, I. A.; **Failures, Monitoring, and New Trends of Power Transformers**. Journal IEEE Potentials, v. 30, n. 3, pp. 36-43, maio 2011.

MIHAILOVIC, V.; “Probabilistic Model for Planning Keeping of Power Transformers spare components with general repair tune distribution”. Electric Power Systems. 2013. pp. 109-115.

MINHAS, M. S. A., Dynamic Behavior of Transformer Winding under Short-Circuits (PhD. Thesis), Faculdade de Engenharia, Universidade de Witwatersrand, Johannesburg. 2007.

MINHAS, M. S. A.; REYNDERS, J. P.; KLERK, P. J. “Failure in power System Transformer and Appropriate Monitoring Techniques”. 11<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering London. 1999.

MORK, B. A; GONZALEZ, F.; ISHCENKO, D.; STUEHM, D. L.; MITRA, J. “Hybrid transformer model for transient simulation – Part I: Development and parameters”. IEEE Transaction Power Delivery 22 (2007a) 248–255.

MORK, B. A; GONZALEZ, F.; ISHCENKO, D.; STUEHM, D. L.; MITRA, J. “Hybrid transformer model for transient simulation-Part II: Laboratory measurements and benchmarking”. IEEE Transaction Power Delivery. 22 (2007b) 256–262.

MURUGAN, R.; RAMASAMY, R.; “Failure Analysis of Power Transformer for Effective maintenance Planning in Electric Utilities”. Engineering Failure Analysis. 2015. pp. 182-192.

NAGHIZADEH, R. A.; VAHIDI, B. and HOSSEINIAN, S. H. “Modeling of inrush current in transformers using inverse Jiles–Atherton hysteresis model with a neuro-shuffled frog-leaping algorithm approach,” IET Elect. Power Appl., vol. 6, pp. 727–734, Nov. 2012.

NAGPAL, M.; MARTINICH, T. G.; MOSHREF, A.; MORISON, K. and KUNDUR, P. “Assessing and limiting impact of transformer inrush current on power quality,” IEEE Transaction Power Delivery, vol. 21, no. 2, pp. 890–896, Apr.2006.

NAJAFI, A.; ISKENDER, I. "Electromagnetic Force Investigation on Distribution Transformer under Unbalanced Faults based on Time Stepping Finite Element Method". Electrical Power and Energy Systems. 2016.

NETO, L. B. **ANÁLISE NUMÉRICA DE DUTOS SUJEITOS À FLAMBAGEM**. 2009. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia. Universidade Federal do Paraná, Paraná, Brasil, pp. 142.

NI, R.; WNAG, P.; MOXLEY, R.; FLEMMING, S.; and SCHNEIDER, S. "False trips on transformer inrush - avoiding the unavoidable," presented at the 2015 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, USA, 2015.

OZGONENEL, O., KARAGOL, S. "Power Transformer Protection based on Decision Tree Approach" IET Electric Power Applications, 2014, Vol. 8, Iss. 7, pp. 251-256.

PATEL, K. J. "Effect of Transformer Inrush Current" thesis, University of Southern Queensland, pp. 116. 2013.

PELESKO, A.; BERNSTEIN, D. H. "Modeling MEMS and NEMS". Chapman & Hall/CRC, 2003.

PENG, J.; LI, H.; WNAG, Z.; GHASSEMI, F. and JARMAN, P. "Influence of sympathetic inrush on voltage dips caused by transformer energisation," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 7, no. 11, pp. 1173– 1184, November 2013.

PETER, G.P.; Calculations for short circuit withstand capability of a distribution transformer. Int. J. Adv. Technol., vol. 2, no. 1, pp. 142–150, 2011.

PIRES, I. A.; MACHADO, A. A. P.; CARDOSO FILHO, B. de J. "Mitigation of Electric Arc Furnace Transformer Inrush Current Using Soft-Starter-Based Controlled Energization". IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 54, N° 4, JULY/AUGUST. pp. 3909-3918. 2018.

POLYCARPOU, A. C. 2006. **Introduction to the Finite Element Method in Electromagnetics**. (1ª Ed.). USA. Editora: Morgan & Claypool.

QIA, X; YIN, X.; ZHANG, Z. “Sympathetic Inrush Current in a Transformer and a Method for its Identification”. IEEJ - Transactions on Electrical and Electronic Engineering. 2016, pp. 442 – 450.

RIGATOS, G.; SIANO, P. “Power transformers’ condition monitoring using neural modeling and the local statistical approach to fault diagnosis”. Electrical Power and Energy Systems. 2016. pp. 150-159.

ROCHA, J. E. **Qualidade da Energia Elétrica**. Curitiba, 2016.

RUDEZ, U.; and MIHALIC, R. “Sympathetic inrush current phenomenon with loaded transformers,” *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 138, pp. 3–10, Sep. 2016.

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

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.; BASTOS, J. P. A. “Analysis of Power Transformer Geometry Simplifications on Electromagnetic and Thermodynamic Simulations”. *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol. 51, No. 3, March 2015.

SILVESTER, P.P.; CHARI, M. V. K.; *Finite elements Solution for Saturable Magnetic Fields Problems*, 1970, IEEE Trans. Power, USA.

SLUIS, L. V. D. **Transients in Power Systems**. 2001

SOUSA, A. R. M. **Análises Multifísica via Método de Elementos Finitos para Auxílio à Manutenção Preditiva em Transformadores de Potência**. 2018. pp 131. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, Pará, Brasil.

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

TAKEHARA, J.; KITAGAWA, M.; NAKATA, T.; and TAKAHASHI, N. “Study on factors affecting the inrush current phenomena of transformers,” Elect. Eng. Japan, vol. 109, no. 1, pp. 41–48, Jan. 1989.

TAMASHIRO, M. A., PERES, L. M., PICCINI, A. R., REZENDE, J. O. e GUIMARÃES, G. C.. “Avaliação de Programas Gratuitos para Análise de Estabilidade Transitória em Sistemas Elétricos de Potência”. SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. 2014.

TAMASHIRO, M. A.; GUIMARÃES, G. C.; RODRIGUES, A. R.; MONTEIRO, R. V. A.; OLIVEIRA, T. L.; SILVA, L. R. C. “Comparative Study of TACS/DBM and MODELS of ATP-EMTP Applied to Power Systems Computer Simulation” IEEE Latin America Transactions Vol.:14, Iss.:2, Feb. 2016.

TOKIC, A; MILARDIC, V.; UGLESIC, I; JUKAN, A. “Simulations of Three-phase Transformer Inrush Currents by using Backward and Numerical Differentiation Formulae”. Electric Power Systems Research. 2015.

TORRES, I. F. R. **Desenvolvimento e aplicação dos Métodos dos Elementos Finitos generalizados 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.

TSOURAKIS, G; MILIS, I; PROUSALIDIS, J. “Transformer Sympathetic Inrush: A case Study”. 8<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion – MEDPOWER. 2012.

VIANA. L. B. “Modelagem de transformador no programa ATP para o estudo do Fenômeno da Ferrorressonância”. 2010. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

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, December 2002.

WARDANI, N. U. A; PURNOMOADI, A. P; SEPTIANI, H. I; ARIFianto, I.; CAHYONO, B. "Condition Assessment of 500/150 kV Power Transformer based on Condition Based Maintenance". International Conference on Electrical Engineering and Informatics. Bandung, Indonesia. 2011.

WENG, H. and LIN, X., "Studies on the Unusual Mal-operation of Transformer Differential Protection During the Nonlinear Load Switch-In," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, pp. 1824-1831, 2009.

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

YANG, B.; WANG, S; HUANG FU, Y; WANG, G. and ZANG, H. "Dynamic deformation analysis of power transformer windings by considering the effect of elasticity characteristics of Kraft paper," Proc. 2013 IEEE Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices Conf., pp. 395-398.

ZHANG, A. Q.; JI, T. Y.; LI, M. S.; WU, Q. H.; ZHANG, L. L. "An Identification Method Based on Mathematical Morphology for Sympathetic Inrush". IEEE-Transaction Power Delivery. 2018.

ZHANG, H., YANG, B.; XU, W.; WANG, S.; G.; HUANGFU, Y.; ZHANG, J. "Dynamic Deformation Analysis of Power Transformer Windings in Short-Circuit Fault by FEM". IEEE Transactions On Applied Superconductivity, v. 24, n. 3, June 2014.

ZHANG, L. L.; WU, Q. H.; JI, T. Y.; ZHANG, A. Q. "Identification of inrush current in power transformers based on higher-order statistics". Electric Power Systems Research. 2017. pp. 161-169.

ZHANG. A. Q.; JI, T. Y.; LI, M. S.; WU, Q. H.; ZHANG, L. L. "An identification method based on mathematical morphology for sympathetic inrush". Transactions on Power Delivery. 2016.

ZHOU, G. Y.; SHEN, J. X. "Rotor Notching for Electromagnetic Noise Reduction of Induction Motors". IEEE Transactions on Industry Applications, vol. PP, ISSUE 99, 2017.

---

ZIRBES, R.; ROLIM, J. G.; ZÜRN, H. H. “Metodologias para avaliação e diagnóstico do estado de isolamentos de papel impregnado com óleo mineral”. Revista Controle & Automação, vol.16, n. 3, Campinas, 2005.